

熊波, 万卫星, 宁百齐等. 2014. 基于北斗、GLONASS 和 GPS 系统的中低纬电离层特性联合探测. 地球物理学报, 57(11):3586-3599, doi:10.6038/cjg20141112.

Xiong B, Wan W X, Ning B Q, et al. 2014. Investigation of mid- and low-latitude ionosphere based on BDS, GLONASS and GPS observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3586-3599, doi:10.6038/cjg20141112.

基于北斗、GLONASS 和 GPS 系统的 中低纬电离层特性联合探测

熊波^{1, 2, 3}, 万卫星³, 宁百齐³, 胡连欢^{3, 5}, 丁锋³, 赵必强³, 李建勇⁴

1 华北电力大学数理学院, 保定 071003

2 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

4 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036

5 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于 GNSS(Global Navigation Satellite Systems)的发展,我们利用具有北斗、GLONASS 和 GPS 三系统信号接收功能的接收机观测的数据,结合电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)的反演算法,提取出 GNSS 三系统观测的电离层 TEC;同时,将 GNSS 三系统获取的 TEC 应用到电离层 TEC 地图、行进式扰动、不规则体结构和电离层的太阳耀斑响应等方面的研究中,这也是首次使用三种 GNSS 系统数据对电离层进行联合探测研究. 研究表明,增加了北斗系统的 GNSS 三系统在研究中国地区电离层 TEC 地图、周日变化、逐日变化,行进式扰动以及电离层的实时监测等方面较单系统的 GPS 具有明显的优势.

关键词 电离层;TEC;GNSS;北斗

doi:10.6038/cjg20141112

中图分类号 P352

收稿日期 2014-06-25,2014-09-17 收修定稿

Investigation of mid- and low-latitude ionosphere based on BDS, GLONASS and GPS observations

XIONG Bo^{1, 2, 3}, WAN Wei-Xing³, NING Bai-Qi³, HU Lian-Huan^{3, 5},
DING Feng³, ZHAO Bi-Qiang³, LI Jian-Yong⁴

1 School of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

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

4 National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, the ionospheric total electron content (TEC) is derived by the observations from BDS (BeiDou Navigation Satellite System), GLONASS and GPS. The TEC obtained from GNSS (Global Navigation Satellite Systems) is firstly utilized to study the ionospheric map, travelling ionospheric disturbances, ionospheric irregularities and ionospheric

基金项目 国家自然科学基金(41404127,41131066)、中国博士后科学基金资助项目(2012M520370,2014T70118)、国家重点基础研究发展计划项目(2011CB811405)和国家重点实验室专项基金资助项目联合资助.

作者简介 熊波,男,1979年生,博士,主要从事电离层太阳耀斑响应方面的研究工作. E-mail:xiongbo@mail.iggcas.ac.cn

responses to solar flares. The results show that three systems of BDS, GLONASS and GPS are obviously superior to the single system of GPS in the researches of regional ionosphere map over China, diurnal variation of TEC, day to day variability of TEC, travelling ionospheric disturbances, and monitoring ionospheric TEC.

Keywords Ionosphere; Total Electron Content; GNSS; Beidou

1 引言

电离层是人类空间活动最重要的区域之一,它是在太阳 X 射线、EUV 等辐射作用下,离地面约 60~1000 km 高度上地球中性大气被部分电离而形成的区域.在这一区域除了中性大气外,还存在着大量的、能显著影响无线电波传播的自由电子和离子,整个区域宏观上呈现电中性.电离层是近地大气与外层空间连接的纽带,下与中高层大气相连,上与磁层相接,是整个日地空间中承上启下的重要部分和关键环节.作为描述电离层结构、状态和变化的电离层总电子含量(TEC)一直是空间物理学界关注的最重要的参量之一.早在 1959 年,Altchison 和 Weeks 在假设电离层折射指数各向同性、电离层球面分层以及忽略地磁场影响的条件下,首次求出了电离层 TEC.随着 1973 年美国国防部批准研制 GPS,到 1978 年第一颗 GPS 卫星发射升空,为高效率的电离层 TEC 的探测提供了可能.尽管 GPS 是作为一个功能强大的卫星定位导航系统设计研制的,但作为副产品的 GPS-TEC 在电离层研究中的应用,一直受到空间物理学家的青睐.随着全球导航卫星系统(GNSS)的不断发展,GNSS 卫星因其覆盖面广,观测实时性强,时空分辨率好,测量精度高,以及不受天气影响等优点,在当前电离层气候与电离层天气诸方面均得到了广泛的应用.

国内外诸多学者利用 GNSS 卫星观测数据反演的 TEC 参量,对电离层进行了广泛的研究(Ma and Maruyama, 2006),其主要研究内容包括:电离层的周日、逐日变化,年度变化以及长期变化(Yu et al., 2004; Yue et al., 2007);电离层的异常现象,例如,年异常、半年异常、季节异常和赤道异常等(Millward et al., 1996; Liu et al., 2004; Mansilla et al., 2005; Liu et al., 2006);电离层 TEC 对太阳耀斑、日食、台风和地震等的响应(Afraimovich, 2000; Zhang et al., 2011; Xiong et al., 2014; Le et al., 2010; Zhao et al., 2008);磁暴期间的电离层形态、电离层的大尺度行扰、电离层不规则结构的

运动和演化等(Liu et al., 2010; Wang et al., 2007; Ding et al., 2012; Pi et al., 1997; Li et al., 2009);另外,在电离层 TEC 地图、监测和预报等方面也开展了大量的研究工作(Juan et al., 1997; Ping et al., 2002; Wielgosz et al., 2003; Meggs et al., 2004; 万卫星等,2007).因此,通过 GNSS 观测数据准确反演获得的电离层 TEC 参量,在科学研究和工程应用上都有着重要的意义.随着北斗卫星导航系统的不断发展和完善,中国地区的 GNSS 用户在同一个时刻,可以接收到超过 30 颗 GNSS 卫星的信号,这极大地增强和丰富中国地区电离层研究的观测资料.同时,随着具有北斗接收功能的多系统 GNSS 观测站的广泛建设,将为我国进一步开展电离层空间天气的预警和预报工作奠定坚实的观测基础,并将在电离层气候学研究和卫星定位导航电波修正等方面发挥重要的作用.因此,本文的主要目的是针对增加了北斗系统的 GNSS 三系统(BDS、GLONASS 和 GPS)在电离层研究中的应用和特点进行初步的探索,为下一步大范围开展 GNSS 三系统的电离层探测研究打下一定的基础.

2 基于 GNSS 三系统的电离层 TEC 反演

2.1 伪距 TEC 的计算

伪距测量的观测方程可表示为

$$P_r^s = \rho_r^s + c(\Delta t_r - \Delta t^s) + I_r^s + T_r^s + cb^s + cb_r + M_r^s + \epsilon_p, \quad (1)$$

其中, P_r^s 为伪距观测量; ρ_r^s 为 GNSS 信号从卫星 s 到测站 r 的几何距离; c 为光速; Δt_r 为测站 r 的时钟相对于 GNSS 系统时间的偏移量; Δt^s 为卫星 s 的时钟对于 GNSS 系统时间的偏移量; I_r^s 为 GNSS 信号由卫星 s 到测站 r 路径上所受到的电离层延迟量; T_r^s 为 GNSS 信号由卫星 s 到测站 r 路径上所受到的对流层延迟量; b^s 为卫星 s 的硬件延迟, b_r 为接收机 r 的硬件延迟,硬件延迟的单位为 s; M_r^s 为 GNSS 信号中由卫星 s 传播到接收机 r 所受的多路径效应的影响; ϵ_p 为伪距观测的噪声,在本文中多路径效应和观测噪声对观测方程的影响主要通过限

制仰角范围来控制,对两个频率的伪距观测进行差分,可以得到伪距 TEC(也称绝对 TEC,用 TECSa 表示),具体公式如下:

$$\begin{cases} P_{r,1}^s = \rho_r^s + c(\Delta t_r - \Delta t^s) + I_{r,1}^s + T_r^s + cb^{s,1} \\ \quad + cb_{r,1} + M_r^s + \varepsilon_P, \\ P_{r,2}^s = \rho_r^s + c(\Delta t_r - \Delta t^s) + I_{r,2}^s + T_r^s + cb^{s,2} \\ \quad + cb_{r,2} + M_r^s + \varepsilon_P. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_{r,1}^s = \frac{40.3}{f_1^2} \text{TECSa} \\ I_{r,2}^s = \frac{40.3}{f_2^2} \text{TECSa} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\text{TECSa} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_2^2 - f_1^2)} \left[(P_1 - P_2) - c(b^{s,1} - b^{s,2}) - c(b_{r,1} - b_{r,2}) \right]. \quad (4)$$

2.2 相位 TEC 的计算

载波相位测量的观测方程可表示为

$$L_r^s = \rho_r^s + c(\Delta t_r - \Delta t^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda N_r^s + \lambda(\delta^s + \delta_r) + M_r^s + \varepsilon_L, \quad (5)$$

其中, $L_r^s = \Phi \frac{c}{f}$, L_r^s 表示距离, Φ 为相位观测量, c 为光速, f 为工作频率; λ 为载波 L 的波长, N_r^s 为相位观测起始时刻的整周模糊度,单位为周; δ^s 为卫星初始相位偏差(卫星天线相位中心偏差), δ_r 为接收机初始相位偏差(接收机天线相位中心偏差),单位为周; M_r^s 为 GNSS 信号中由卫星 s 传播到接收机 r 所受的多路径效应的影响; ε_L 为相位观测的噪声. 对两个频率的相位观测进行差分,同时通过校正或者忽略卫星和接收机天线相位中心偏差的影响,可以得到相位 TEC(也称相对 TEC,用 TECSr 表示),具体公式如下:

$$\begin{cases} L_{r,1}^s = \rho_r^s + c(\Delta t_r - \Delta t^s) - I_{r,1}^s + T_r^s + \lambda_1 N_{r,1}^s + \lambda_1(\delta^{s,1} + \delta_{r,1}) + M_r^s + \varepsilon_L, \\ L_{r,2}^s = \rho_r^s + c(\Delta t_r - \Delta t^s) - I_{r,2}^s + T_r^s + \lambda_2 N_{r,2}^s + \lambda_2(\delta^{s,2} + \delta_{r,2}) + M_r^s + \varepsilon_L, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{TECSr} &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} \left[\left(\frac{c\Phi_1}{f_1} - \frac{c\Phi_2}{f_2} \right) - (\lambda_1 N_{r,1}^s - \lambda_2 N_{r,2}^s) - (\lambda_1 \delta^{s,1} - \lambda_2 \delta^{s,2}) - (\lambda_1 \delta_{r,1} - \lambda_2 \delta_{r,2}) \right] \\ &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} \left[\left(\frac{c\Phi_1}{f_1} - \frac{c\Phi_2}{f_2} \right) - (\lambda_1 N_{r,1}^s - \lambda_2 N_{r,2}^s) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 伪距和载波相位联合求解斜 TEC

伪距观测的精度相对较差,但其绝对值结果可靠性高;载波相位观测量相对精度很高,但载波信号是一种周期性的信号,其相位测量只能测定不足一个波长部分,存在着整周数不确定性的问题,因此,其观测量只能反映相对变化情况.为了充分利用伪距测量的高可靠性和载波相位观测的高精度,可将它们进行有效的组合,形成载波相位平滑伪距的组合观测,获取高精度的电离层斜 TEC.在载波相位平滑伪距的过程中,平滑值采用在一次卫星连续过顶弧内,为各观测点的伪距观测量与载波相位观测量之差的算术平均值,因此,在连续 N 次历元观测中第 i 次观测的斜 TEC(TECS),具体表达式如下:

$$\begin{aligned} \text{TECS}_i &= \text{TECSr}_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{TECSa}_i - \text{TECSr}_i) \\ &= \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_2^2 - f_1^2)} \left\{ \left(\frac{c\Phi_{2,i}}{f_2} - \frac{c\Phi_{1,i}}{f_1} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(P_{1,i} - P_{2,i}) + \left(\frac{c\Phi_{1,i}}{f_1} - \frac{c\Phi_{2,i}}{f_2} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - c(b^{s,1} - b^{s,2}) - c(b_{r,1} - b_{r,2}) \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

2.4 斜向 TEC 转换为垂直 TEC

斜 TEC 是电子密度沿各卫星信号传播路径上的积分,为了便于分析全球 TEC 的分布以及形态变化,需把斜 TEC 转化成垂直 TEC(TECV).从公式(8)中可以看出,在斜向 TEC 中包含着卫星和接收机在两个频率上差分的硬件延迟项,在转换成垂直 TEC 之前,需将该硬件延迟项的影响消除.目前,同时解决卫星和接收机硬件延迟的方法主要有以下两种方法(张东和和萧佐,2000),一种是把卫星和接收机的硬件误差作为未知的两个常数,利用最小二乘法对多颗卫星和多个站的观测数据联合进行求解,获得卫星和接收机的硬件延迟值;另外一种方法是利用 GNSS 卫星的观测量,通过特定的电离层模型求出卫星与接收机硬件延迟.在本文中,主要是通过 GNSS 的观测量,结合美国加利福尼亚喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提供的全球电离层地图,对比高仰角时刻 GNSS 的观测量与 JPL 全球电离层地图对应时刻和位置的 TEC,求解出卫星和接收机硬件延迟偏差,从而计算出真实的电离层斜 TEC.同时,在转换垂直 TEC 的过程中,我们将电离层的带电粒子看成集中在与地球同心的

薄层中,此薄层位于 F 层的峰值电子密度区域,其离地高度随昼夜、地理位置、太阳活动等因素变化,典型取值为 350 ~ 480 km (Hernández-Pajares et al., 2011; Xiong et al., 2014). 斜 TEC 转垂直 TEC 的公式具体如下:

$$\text{TECV} = \text{TECS} \times \sqrt{1 - \left(\frac{r_e \cos E_0}{r_e + h_m} \right)^2}, \quad (9)$$

其中, r_e 是地球的平均半径; E_0 是接收机位置相对于卫星处的仰角; h_m 是电离层薄层模型的高度取为 400 km. 基于以上过程,我们在图 1 中给出了基于 GNSS 三系统的电离层 TEC 反演的具体流程.

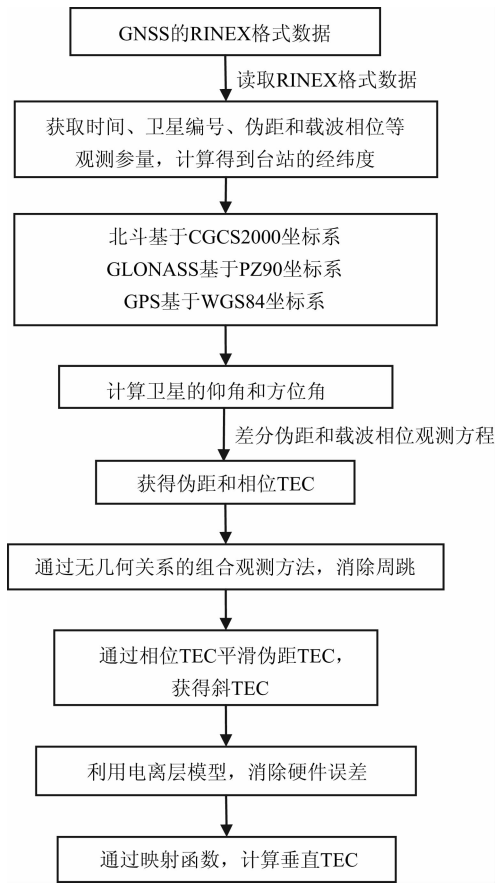


图 1 GNSS 三系统电离层 TEC 反演流程图

Fig. 1 Flow-process diagram of ionosphere TEC inversion based on GNSS

3 观测手段和数据

根据电离层观测的需要,结合目前国内外开发的比较成熟的具有北斗功能的 GNSS 三系统芯片,中科院地质与地球物理研究所基于 NovAtel OEM628 板卡和威强工控板集成了一款功耗低

(20 W)、自动化程度高、操作简便和性价比高的 BG2 接收机. 该款接收机实现了数据采集、传输和处理的全程自动化;在数据采集方面具有稳定性强、交互性好的特点;在数据传输方面具有设置简单、传输稳定的优点;在数据处理方面具有准实时读取北斗、GLONASS 和 GPS 的观测数据,并反演出基于 GNSS 三系统观测的电离层 TEC 等参量的功能. 图 2 中给出了 BG2 接收机和相应的数据采集、传输与处理的工作状态图. 目前该款接收机已经在北京设置了 4 个观测点,分别位于中科院地质与地球物理研究所,中科院光电研究院,中科院高能物理研究所和中科院地质与地球物理研究所十三陵台站,形成了一个短基线观测阵. 同时, BG2 接收机也被设置到中科院地质与地球物理研究所的三亚台站,用于电离层闪烁的观测.

本文中采用的数据主要由中科院地质与地球物理研究所的 BG2 接收机在国内 5 个观测站采集的数据和中国大陆构造环境监测网络提供 236 个 GNSS 台站的数据(包含 5 个带有北斗功能的接收站),其采样周期为 30 s(李强等,2012). 图 3 给出了所有接收机在 2013 年 12 月 10 日 12 时接收到的 GNSS 三系统卫星在电离层高度上的分布图. 目前,由于具有北斗卫星接收功能的观测站相对较少(10 个接收站),因此,大部分站接收的北斗卫星的分布图是通过仿真结果获得. 从图 3 中可以看出,如果中国大陆构造环境监测网络所有台站都具备了 GNSS 三系统卫星的观测能力,其某一时刻的观测数据基本上能覆盖中国地区的电离层. 同时,从图 3 中可以看出,GNSS 三系统卫星的观测点分布具有明显的差异:GPS 偏重于全球分布, GLONASS 更偏重于覆盖中高纬地区,为更好地满足俄罗斯的定位精度需求;北斗系统目前更多地分布在中低纬地区,北斗卫星系统的分布为位于中低纬地区的中国电离层研究提供了有利的条件. 对比图 3 中北斗、GLONASS 和 GPS 卫星观测的分布可以发现,三系统卫星较单系统 GPS 卫星在观测点的分布上具有明显的优势,三系统卫星的观测更有利于电离层 TEC 的监测和电离层 TEC 地图的构建.

4 GNSS 三系统在电离层研究中的初步应用

利用 GNSS 三系统的观测数据反演的电离层

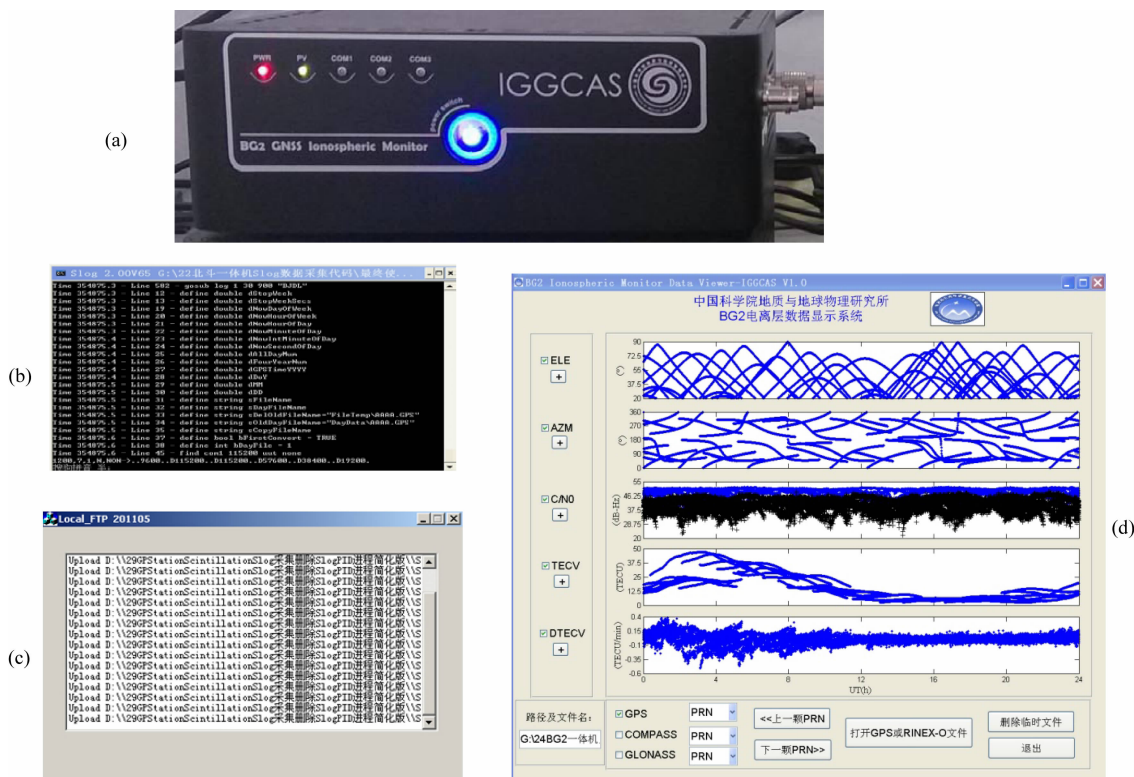


图 2 BG2 接收机(a)和数据采集(b)、传输(c)与处理(d)的工作状态图

Fig. 2 State diagram of BG2 (a) receiver, (b) data collection, (c) transmission and (d) processing

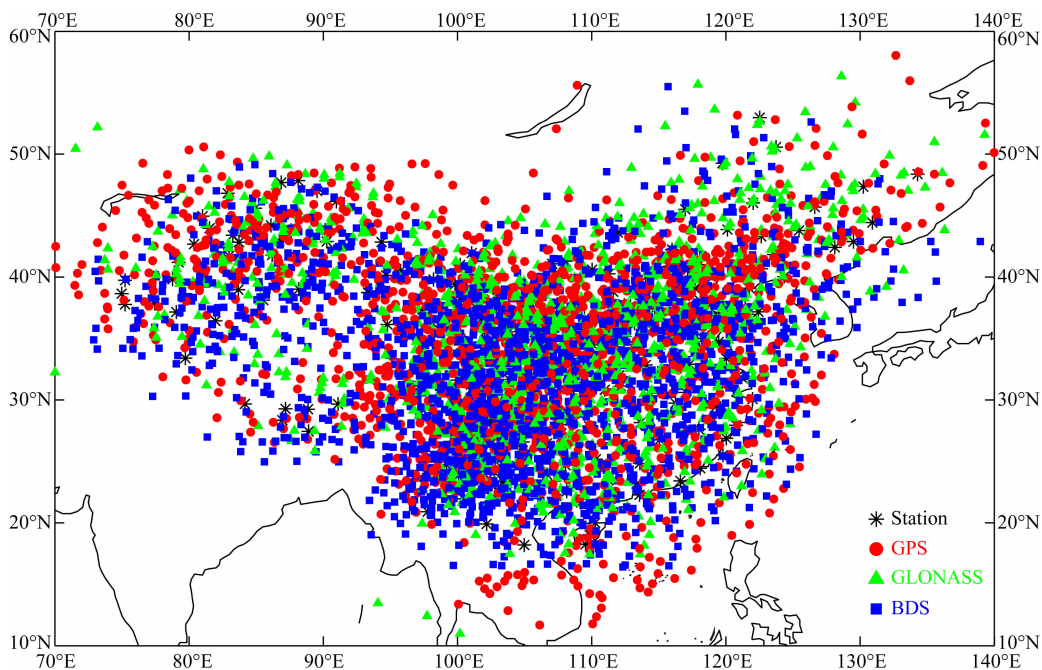


图 3 接收机在 2013 年 12 月 10 日 12:00LT 观测的 GPS、GLONASS 和北斗卫星穿透点的分布图
Fig. 3 Distribution of the intersection points between the ionospheric shell and the line from satellite to receiver over China at 12:00 LT on 10 December 2013

TEC 的主要研究内容集中于以下四个方面。

4.1 电离层周日变化、逐日变化和 TEC 地图

图 4 给出了 2014 年 5 月 1 日至 7 日期间,北京

地区 BG2 接收机通过 GPS 和北斗地球静止轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 卫星获取的电离层垂直 TEC 的分布。从图中可以清晰看出,北京

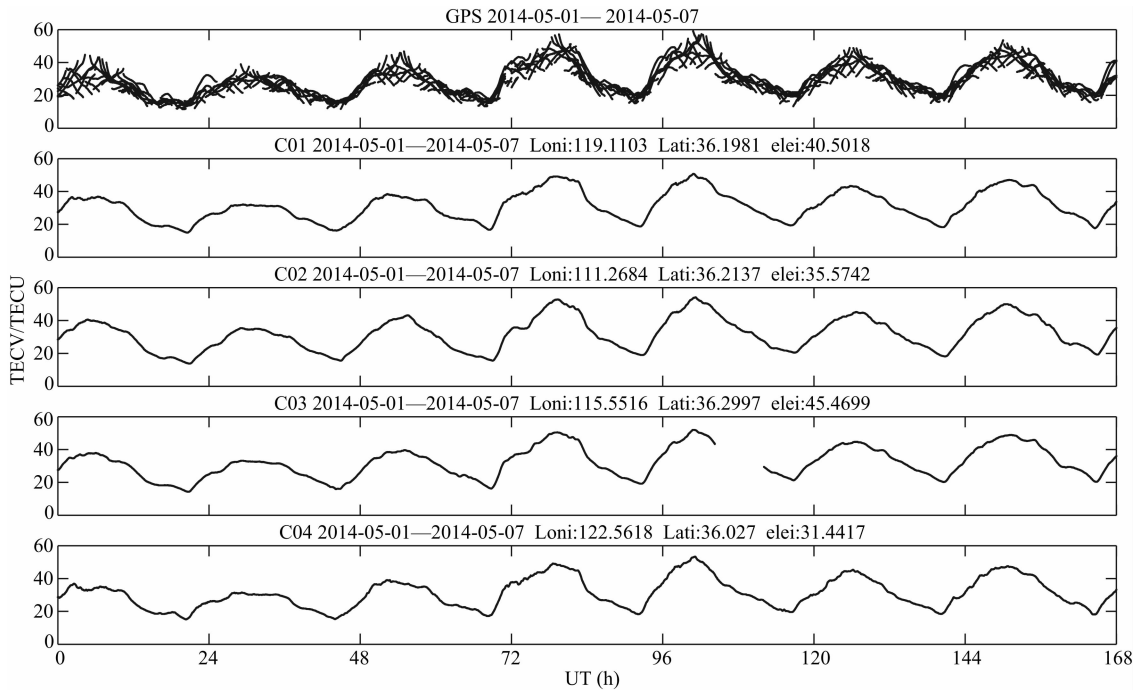


图 4 2014 年 5 月 1—7 日 BG2 接收机在北京地区通过 GPS 和北斗 GEO 卫星获取的电离层垂直 TEC 的分布

Fig. 4 Distribution of the vertical TEC derived by the data of GPS and Beidou GEO satellites observed by BG2 receiver at Beijing during May 1—7th 2014

地区电离层 TEC 具有明显的周日和逐日变化. 电离层 TEC 的变化主要受光化学过程的控制, 而光化学过程随太阳天顶角变化, 太阳天顶角呈现出以天为周期的波动, 因此, 电离层 TEC 具有明显的周日变化规律(Mao et al., 2008). 由于电离层的延迟效应, TEC 的最大值一般出现在正午过后的 14LT 时左右, 最小值一般出现在 04LT 时左右, 图 4 中不同北斗 GEO 卫星观测的 TEC 分布都证实了这一点. 同时, 从图中还可以看出在 TEC 的周日变化中, 还存在日出增强和日落增强的现象. 在日出时段, 随着太阳辐射的增加, 电离层 TEC 随之也出现了一个快速增加的过程. 日落增强则主要是由于赤道地区日落时的东向电场的突然增强使得电子产生很大的向上漂移, 导致赤道区 F 层快速抬升并沿磁力线水平输运, 这样, 赤道地区的 TEC 迅速降低, 电子沿着磁力线输运到中低纬地区, 导致中低纬地区电离层 TEC 的增强. 另外, 在周日变化中上午与午后 TEC 极大值之间以及极大值和黄昏之间会有一个次极小出现, 称之为 bite-out 现象(Huang and Jeng, 1978). 从图 4 中可以看出, 5 月 2 日 02UT 时(10LT 时)左右, 4 颗 GEO 卫星观测的电离层 TEC 都出现了一个次极小值. 电离层 TEC 除了有规律性的重复出现的周日变化外, TEC 还存在着很强的逐日变化性. 从图 4 中可以发现, 在 5 月 1 日至 7 日期间每颗

GEO 卫星每天观测的 TEC, 虽然其周日变化趋势相同, 但每天 TEC 的峰值和峰值附近 TEC 的变化率都存在明显的差异. 引起 TEC 逐日变化的因素主要有太阳辐射、地磁活动和低层大气; 其中, 低层大气对 TEC 逐日变化在定量上的贡献, 目前还不是十分清楚. 从图 4 中 GPS 和北斗 GEO 卫星观测的 TEC 分布我们还可以看出, 中国地区单站对某一颗 GPS 卫星的观测在一天中有中断, 而对北斗 GEO 卫星的观测十分连续, 并且在电离层 TEC 周日和逐日变化上, 北斗 GEO 观测结果相对于 GPS 卫星的观测更加清晰. 因此, 拥有北斗卫星的三系统较 GPS 卫星的单系统在电离层 TEC 周日和逐日变化研究上有较明显的优势.

根据全球或局域 GNSS 跟踪站观测的电离层 TEC, 按一定的模型如球谐函数模型、球冠谐函数模型、三角级数模型、多项式模型等, 可获得全球或局域电离层 TEC 的分布. 目前国际上主要是在国际全球导航卫星系统服务中心(International GNSS Service, IGS)主持下, 由美国加利福尼亚喷气动力实验室, 瑞士伯尔尼的欧洲定轨中心, 加拿大渥太华资源、矿山与能源中心, 德国达姆施塔特的欧洲空间局以及西班牙卡塔卢尼亚理工大学等机构利用 IGS 的全球 GNSS 观测站的数据, 结合各自不同算法, 建立起了准实时的全球电离层 TEC 地图(Global

Ionosphere Map, GIM), 监测全球范围内 TEC 的变化(李强等, 2012). 同时, 越来越多区域性 GNSS 观测站, 构建适合自己国家或地区的局域电离层地图(Regional Ionosphere Map, RIM). 中科院地质与地球物理研究所利用经验正交函数方法, 结合准实时的 GNSS 观测数据, 建立了首个覆盖我国全境的电离层 TEC 现报系统(万卫星等, 2007). 在此基础上, 将多种插值方法如三角网格插值、Kriging 插值等应用到电离层 TEC 地图的研究中(Mao et al., 2008). 图 5 给出了利用中科院地质与地球物理研究所和中国大陆构造环境监测网络 GNSS 观测数据获得的我国地区电离层 TEC 地图. 图中分别给出了穿透点处的 TEC, Kriging 插值的 TEC 以及观测数据驱动统计本征模算法的 TEC 分布. 从三幅子图中可以看出, TEC 整体分布比较一致, 在地理纬度 20° 左右都明显的存在一个峰值区(赤道异常区), 都能较好地反映我国地区电离层 TEC 的分布. 准确的电离层 TEC 地图的建立, 在研究电离层暴、电离层行进式扰动(Traveling Ionospheric Disturbances,

TID)等对时空分辨率要求较高的电离层扰动现象方面具有重要意义.

4.2 电离层行进式扰动

TID 是电离层 F 层中重要的大气波动过程之一, 它是电离层对声重力波的响应. TID 的传播规律主要受大气重力波的支配, 其频率、波长和传播的相速度都与激发它的重力波相同. 在电离层 TID 的研究中, GNSS 由于具有低成本、高时空分辨率, 全球覆盖等特点一直是 TID 探测的重要方式. 国内外学者主要通过 GNSS 密集台站建立二维 TEC 地图分析不同尺度 TID 的传播特征和触发机制(Ding et al., 2012). 同时, 部分学者基于短基线 GNSS 接收阵的数据, 研究了电离层 TID 的扰动周期和传播速度等参量的分布特征(万卫星等, 1998). 基于北京地区 BG2 接收机组成的短基线接收阵(中科院光电研究院(BJOE)、中科院地质与地球物理研究所(BJGG)和中科院高能物理研究所(BGHE)组成的短基线接收阵分布如图 6 所示), 我们分析了 2014 年 5 月 4 日期间的一次 TID 事件. 图 6 给出了 5 月

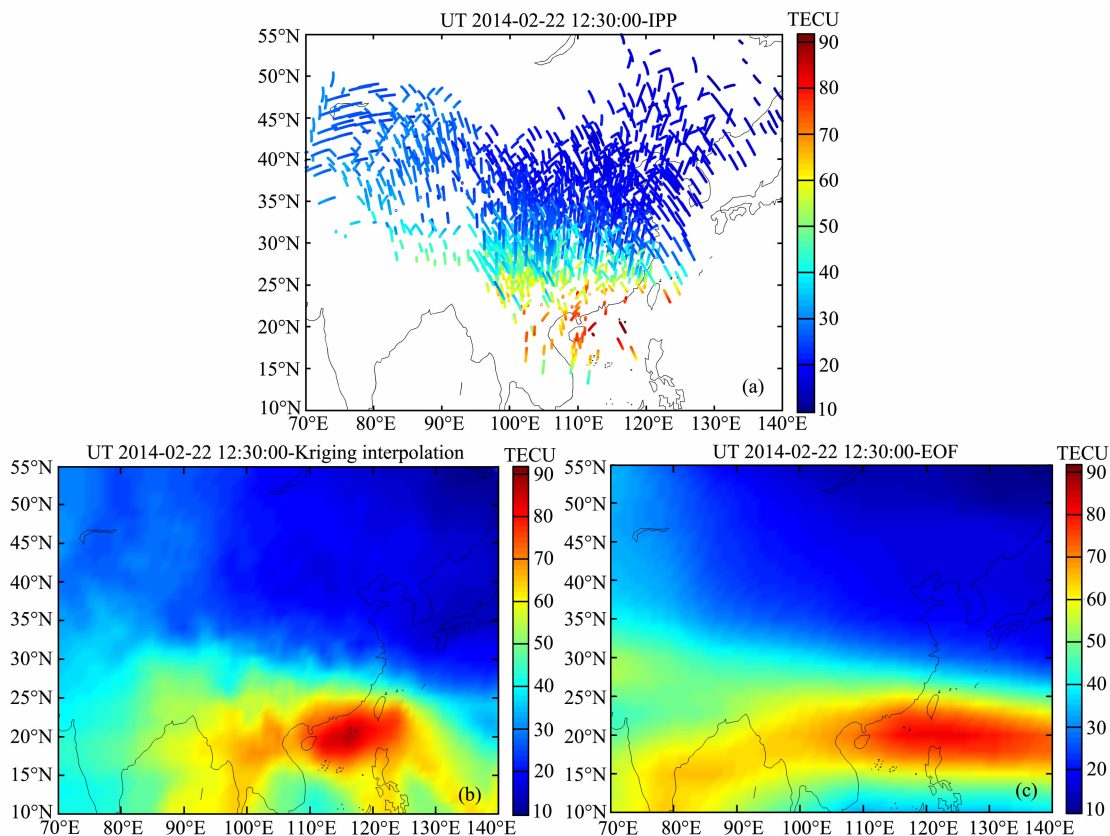


图 5 2014 年 2 月 22 日 12:30 UT 中国地区电离层 TEC 的分布图

(a) 穿透点处的 TEC 地图; (b) Kriging 插值的 TEC 地图; (c) 观测数据驱动统计本征模算法的 TEC 地图.

Fig. 5 TEC distribution of ionosphere over China at 12:30 UT on 22 February 2014

(a) TEC map of ionospheric penetration points; (b) TEC map by Kriging interpolation;

(c) TEC map derived by empirical orthogonal function analysis.

4 日 00:00—04:00 UT 期间北斗 1 号 GEO 卫星在北京 3 个台站观测到的经过滤波后电离层 TEC 扰动分布,为了便于分析 3 个站的扰动时序,我们在 BJOE 和 BJGG 的 TEC 扰动时序上分别增加和减去了 0.2 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$). 从图中可以看出,扰动的峰值最大可达 0.56 TECU ;同时,不同站的扰动时序存在明显的时延,这表明扰动以一定的速度传播.基于 3 个台站的扰动时序数据,结合最大熵动态互谱方法,我们计算出了 TID 在这段时间的扰动周期、水平相速度和传播的方位角(以正北为 0° ,顺时针为正),如图 7 所示.从图 7 的下图可以看出,在 01:40—02:10 UT 期间电离层 TID 传播的方位角位于 280° 附近,保持相对稳定,几乎没有变化,这表明此段时间内的 TID 传播方向为西北方向;另外,TID 传播的周期在 30 min 左右,相速度位于 $125 \sim 230 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.根据以上分析结果可以看出,此次扰动是一次发生在夏季日出后的中尺度 TID. 以往的研究表明,日出时日夜交替线激发的中尺度 TID 主要是由于低层大气受太阳辐射加热膨胀,温度、压力和浓度产生一定的梯度,诱发重力波从低层大气上传到已受太阳辐射的电离层 F 层高度,从而引起 TID(Wang et al., 2007).

4.3 电离层闪烁

电离层闪烁是指当电波穿越电离层时,由于电离层结构的不均匀性和随机时变性,造成信号的振幅、相位、到达角等特性短周期变化,形成电离层闪烁(熊波等,2007). 电离层闪烁与工作频率、地理位置、太阳活动情况、季节和地方时等有关.在频率上,从 10 MHz 到 6 GHz 都能观测到电离层闪烁现象, 3 GHz 频率以下,电离层闪烁是最为严重的电离层现象.在纬度方面主要发生在低纬和高纬地区.在季节方面,电离层闪烁主要发生在春秋分前后,而每一次闪烁其持续时间可为 30 min 到数小时.在地方时上,发生的时间通常在日落后 ($18:00 \text{ LT}$) 至深夜 ($24:00 \text{ LT}$). 引起电离层闪烁的不规则结构尺度从几十厘米到上千公里,各种形式的电离层不规则结构会对无线电信号的传播产生扰动和衰落,造成信息失真;因此,研究电离层不规则结构的分布对电波传播具有重要的现实意义.

在 GNSS 中,电离层幅度闪烁可以造成数据丢失和跳周,相位闪烁则会引起信号的多普勒频移,从而可能超出锁相环的带宽而导致相位失锁.衡量闪烁强度最重要的指数有幅度闪烁指数 S_4 ,相位闪烁指数 δ_ϕ 和基于 TEC 观测提出的 TEC 时间变化率

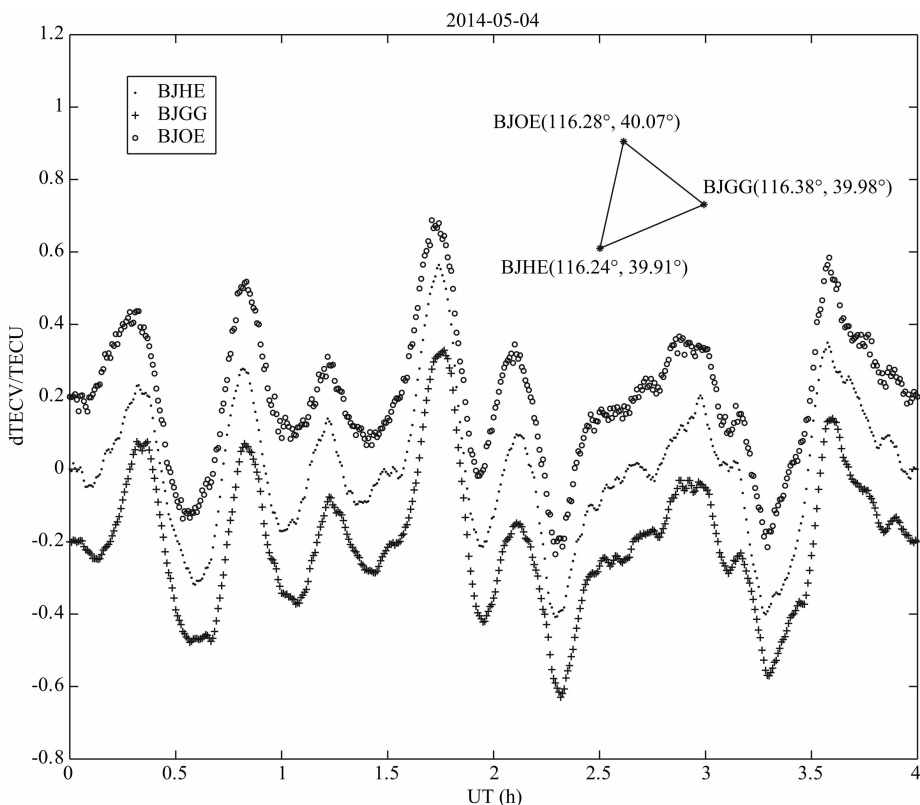


图 6 滤波后三个站的 TEC 扰动时序

Fig. 6 TEC curves of ionospheric disturbances observed by three receivers

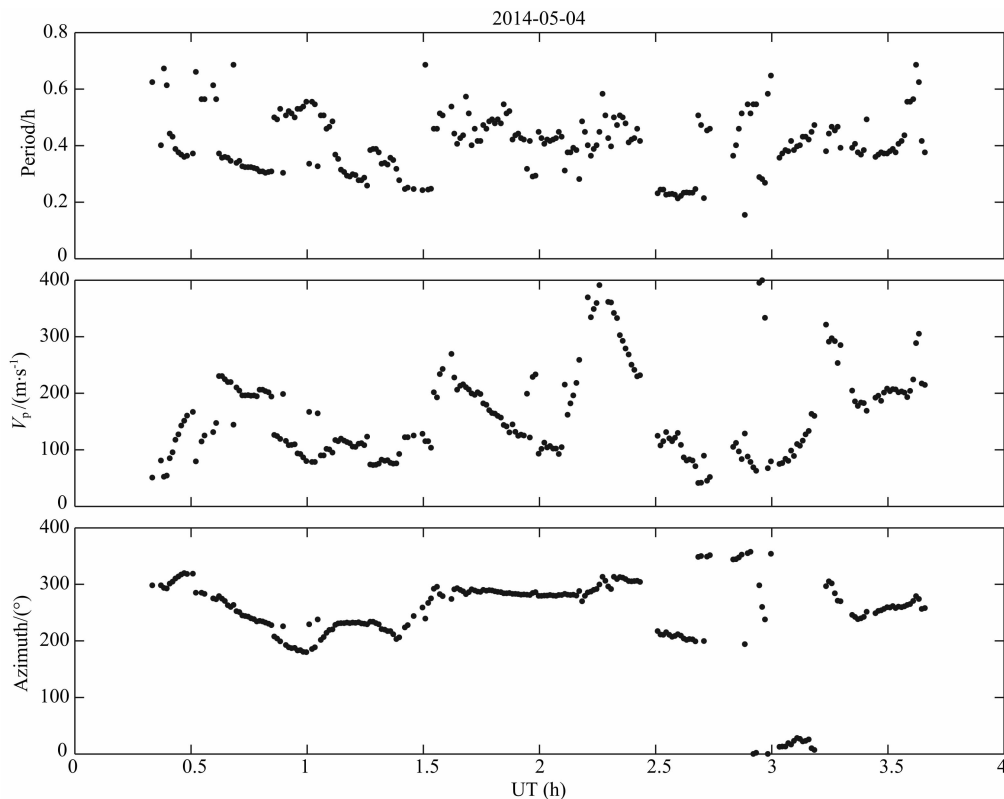


图7 由短基线 GNSS 阵观测到的电离层 TID 的周期(上)、水平相速度(中)和传播的方位角(下)
 Fig. 7 The period (top), horizontal phase velocity (middle) and propagation azimuth (bottom) of ionospheric disturbances deduced from the observation of short baseline GNSS array

标准差的 ROTI 指数 (Aarons et al., 1996; Pi et al., 1997; Xu et al., 2007). 基于中国地区 GNSS 三系统的观测数据, 我们利用 ROTI 指数初步分析了电离层大尺度不规则结构的变化. 图 8 给出了中国大陆构造环境监测网络 MMNS 站北斗卫星在 2014 年 2 月 26 日电离层闪烁期间观测的 ROTI 指数. 从图中可以看出 13:00 UT 左右电离层不规则体在中国的东部出现, 随后逐渐在西部产生, ROTI 在闪烁期间最大达到了 2.7, 并且不规则体引起的电离层闪烁造成北斗 1 号卫星信号失锁长达 174 min. 同时, 利用中科院地质与地球物理研究所和中国大陆构造环境监测网络的 GNSS 观测数据, 在图 9 中给出了中国地区电离层 ROTI 指数的分布. 图 9 详细给出了不同强度的 ROTI 指数 (青色: ROTI 0—0.1; 绿色: ROTI 0.1—0.3; 蓝色: ROTI 0.3—0.5; 红色: ROTI 0.5—1; 黑色: ROTI ≥ 1) 在不规则体结构产生前 (11:00—12:00 UT)、中 (12:00—14:00 UT) 和后 (22:00—23:00 UT) 的分布. 从图 9 中可以看出 ROTI 大于 0.3 的闪烁主要出现在 90°E—130°E 和 10°N—30°N 之间, 并且不规则体产生的位置与图 8 中北斗 GEO 卫星观测

的结果一致. 综合图 8 和图 9 的观测结果可以看出, 此次不规则体主要是 F 区不规则体, 发生在春季的 20:00 LT 到午夜前后, 其主要由顶部等离子体泡受广义的 Rayleigh Taylor 不稳定性激发演化形成的 (Li et al., 2011).

4.4 太阳耀斑的电离层响应

太阳耀斑是发生在太阳上剧烈的扰动之一, 在几分钟到几小时之内向外空间喷发大量的能量; 同时, 耀斑期间太阳 X 射线和 EUV 辐射显著增加, 造成电离层突然骚扰. 这些突然扰动一般会以短波衰减、宇宙噪声突然吸收、突然相位异常、总电子含量突然增强 (Sudden Increase in Total Electron Content, SITEC) 等现象被观测到 (Xiong et al., 2011). 由于 GNSS 卫星观测具有高时空分辨率的特点, 其系统已成为监测和研究太阳耀斑期间电离层扰动的一个重要工具. 图 10a 给出了 2014 年 2 月 25 日 X4.9 级太阳耀斑期间 GOES 卫星观测的 0.1~0.8 nm 和 0.05~0.4 nm 的辐射通量的变化, 此次耀斑开始于 00:39 UT, 在 00:49 UT 达到峰值, 结束于 01:03 UT, 耀斑位于太阳日面的边缘 (12°S, 82°E). 图 10b 给出了位于北京的中科院地质与地球

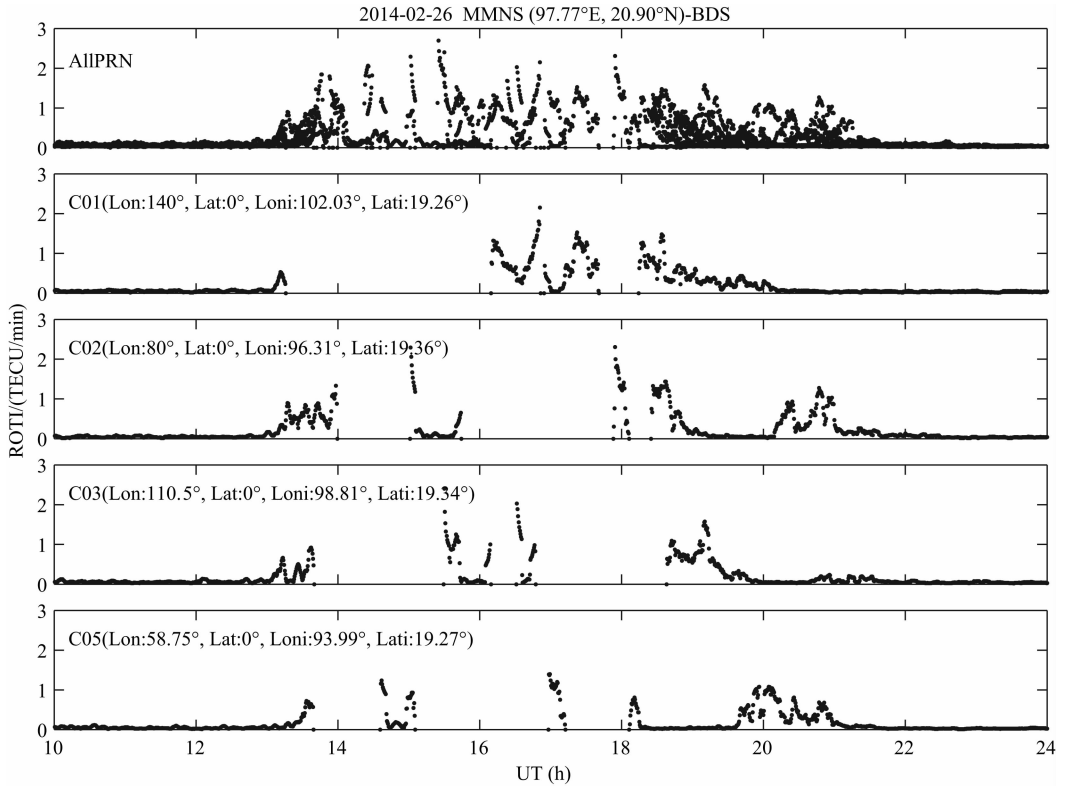


图 8 中国大陆构造环境监测网络 MMNS 站北斗卫星在 2014 年 2 月 26 日期间观测的 ROTI 指数

Fig. 8 ROTI index distribution observed by the receiver at MMNS station of Crustal Movement Observation Network of China based on BDS on 26 February 2014

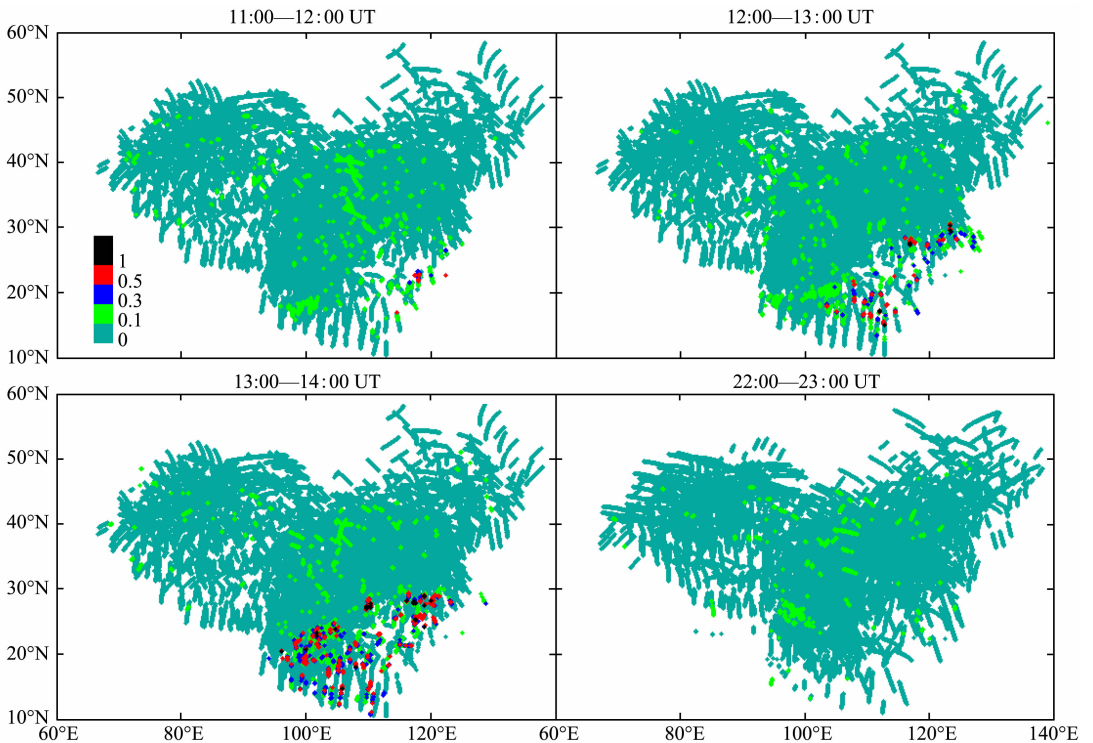


图 9 2014 年 2 月 26 日期间中国地区电离层 ROTI 指数的分布(单位:TECU/min)

Fig. 9 ROTI index distribution observed by the GNSS receivers over China on 26 February 2014 (unit: TECU/min)

物理研究所 BG2 接收机在耀斑期间所有北斗卫星观测的电离层 TEC 随时间的变化. 从图中可以看出, 所有北斗卫星都监测到了太阳耀斑事件的发生, 并且耀斑事件引起 TEC 变化率从耀斑前的 0.2 TECU/min 左右, 增加到耀斑期间的 0.8 TECU/min 左右.

同时, 我们利用中科院地质与地球物理研究所和中国大陆构造环境监测网络的 241 个 GNSS 观测站的数据, 分析了耀斑峰值时刻 (00:49 UT) TEC 相对于耀斑前 (00:30 UT) 的变化, 如图 11 所示. 从图中可看出, 耀斑峰值时刻中国地区位于天顶角 $50^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 的范围内, TEC 的增加随天顶角的增加而减弱 (Wan et al., 2005); 在相同太阳天顶角的情况下 (天顶角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 范围内), 低纬地区 TEC 的绝对增加明显大于中纬地区, 在低纬地区 TEC 的增加主

要为 5 TECU 左右, 而中纬地区为 3 TECU 左右, 增幅的差异主要与背景 TEC 的大小有关. 基于图 10 和图 11 显示的结果可以看出, 增加了北斗系统观测卫星的 GNSS 不仅增加了电离层 TEC 的覆盖范围, 而且可以为监测和研究太阳耀斑的电离层效应提供更准确、更精细的数据支持.

5 总结和展望

利用 GNSS 三系统的观测数据对电离层周日变化、逐日变化, TEC 地图、行进式扰动、不规则体结构和电离层的太阳耀斑响应等方面进行了初步的研究, 其主要分析结果如下:

(1) 基于 GNSS 三系统获取的电离层 TEC 能清晰地反映周日变化中的日出、日落增强和 bite-

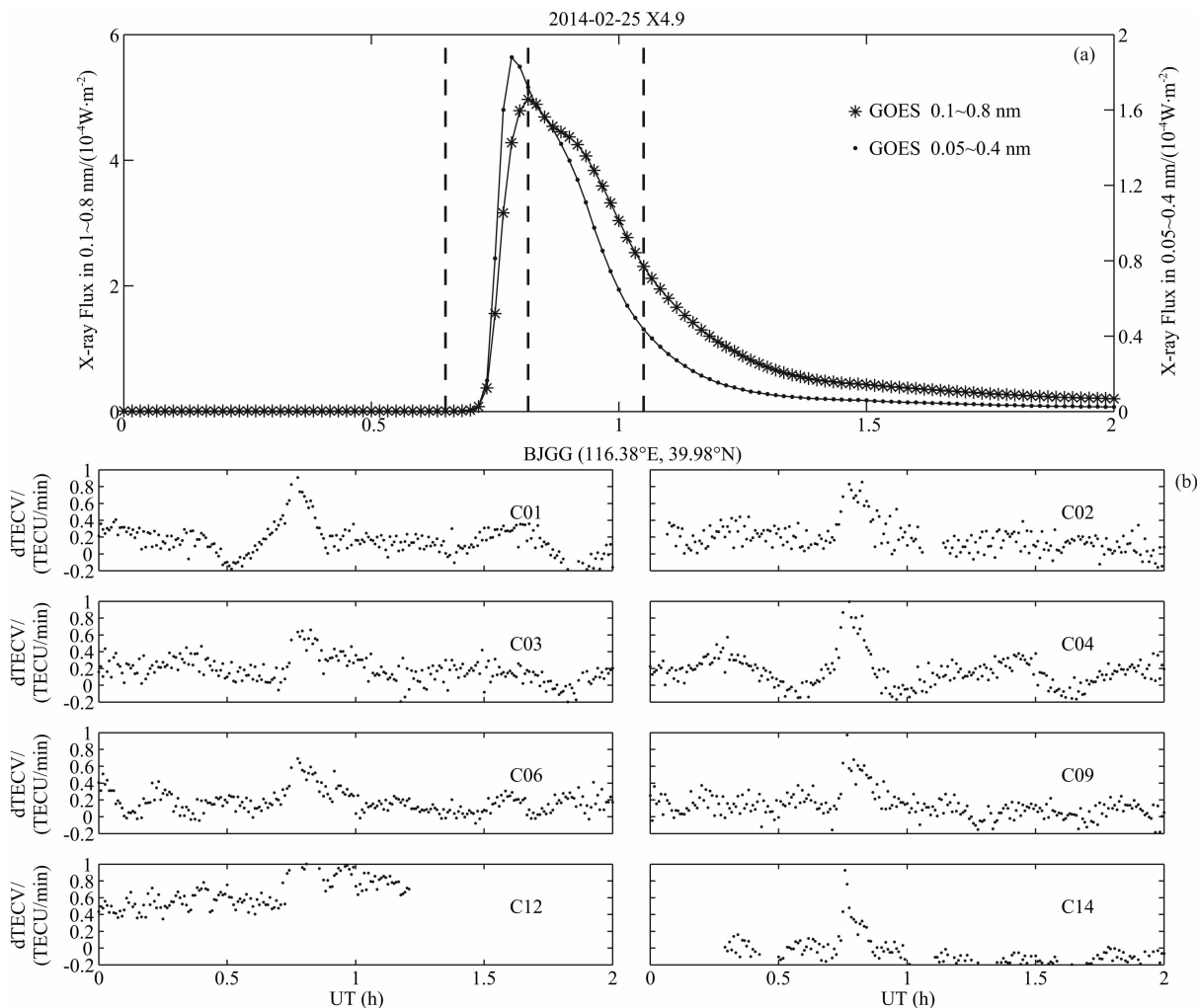


图 10 2014 年 2 月 25 日 X4.9 级耀斑期间 GEOS 卫星观测的 X 射线通量的变化 (a) 和北京地区单站北斗卫星观测的 TEC 变化率 (b)

Fig. 10 Temporal variation of the X-ray flux measured by GOES satellite during the X4.9 class flare on 25 February 2014 (a); Variation rate of TEC observed by the receiver at Beijing based on BDS during the flare (b)

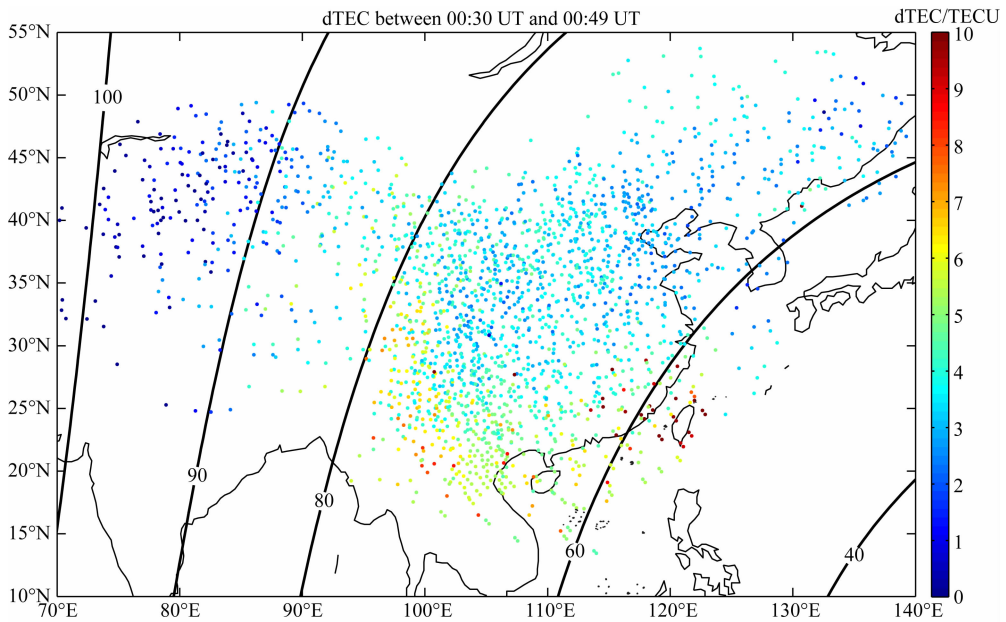


图 11 2014 年 2 月 25 日 X4.9 级耀斑期间中国地区电离层 TEC 的变化

Fig. 11 Temporal variation of TEC during the X4.9 class flare on 25 February 2014 over China

out 现象,以及逐日变化特征;同时,利用两种不同算法建立的中国地区电离层 TEC 地图与穿透点处的 TEC 地图比较一致,并且都能较好地反映中国地区电离层的分布特征。

(2) 利用 GNSS 三系统中北斗 GEO 卫星短基线观测阵的数据,结合最大熵动态分析方法,对 2014 年 5 月 4 日的一次中尺度 TID 事件进行了分析,分析发现 TID 的传播方向为西北方向,水平相速度为 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,传播周期为 30 min 左右。

(3) 利用中国地区 GNSS 观测数据获取的 ROTI 指数对 2014 年 2 月 26 日期间的闪烁事件进行了分析,研究表明在 13:00 UT 左右电离层不规则体在中国的东部出现,随后逐渐在西部产生,ROTI 在闪烁期间最大达到了 2.7,并且不规则体引起的电离层闪烁造成北斗 1 号卫星信号失锁长达 174 min。

(4) 基于中科院地质与地球物理研究所和中国大陆构造环境监测网络的 241 个 GNSS 观测站的数据分析了 2014 年 2 月 25 日 X4.9 级太阳耀斑期间电离层 TEC 的响应.分析结果表明:耀斑峰值时刻中国地区位于天顶角 $50^\circ \sim 100^\circ$ 的范围内,TEC 的增加随天顶角的增加而减弱;在相同太阳天顶角的情况下,低纬地区 TEC 的绝对增加明显大于中纬地区,在低纬地区 TEC 的增加主要为 5 TECU 左右,而中纬地区为 3 TECU 左右。

通过以上的初步研究表明:基于 GNSS 三系统较 GPS 单系统在电离层研究方面具有以下几方面

的优势.首先,增加了北斗卫星的 GNSS 三系统在中国中低纬地区的观测数据成倍增加,使得该区域电离层研究在时空分辨率上较其他区域具有明显的优势;其次,利用北斗 GEO 卫星获取的电离层 TEC 与 GPS 相比,能更清晰和完整地显示电离层 TEC 的周日变化、逐日变化和扰动;同时,由于北斗 GEO 卫星与动态 GPS 卫星相比,其卫星速度几乎保持不变,因此,基于北斗 GEO 卫星观测提取的电离层 TID 传播方向和速度参量,与 GPS 卫星相比更准确;最后,增加了北斗卫星的 GNSS 三系统的观测数据将极大提高中国地区电离层 TEC 地图的时空分辨率和精度。

综上所述,随着具有北斗接收功能的多系统 GNSS 观测站的广泛建设,将为我国电离层空间天气监测工作打下坚实的基础;同时,也将在电离层与低层大气耦合、中国电离层区域特性等科学问题研究方面,以及中国地区高精度电离层 TEC 地图和导航电波修正等方面发挥重要的作用。

致谢 感谢中国科学院光电研究院、中国科学院高能物理研究所对短基线观测阵提供的协助与支持。

References

- Aarons J, Mendillo M, Yantosca R, et al. 1996. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. *J. Geophys. Res.*, 101(A12): 26851-26862.
- Afraimovich E. 2000. GPS global detection of the ionospheric

- response to solar flares. *Radio Sci.*, 35(6): 1417-1424.
- Ding F, Wan W X, Ning B Q, et al. 2012. Two-dimensional imaging of large-scale traveling ionospheric disturbances over China based on GPS data. *J. Geophys. Res.*, 117(A8): A08318, doi: 10.1029/2012JA017546.
- Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. 2011. The ionosphere: Effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques. *J. Geod.*, 85(11): 887-907, doi: 10.1007/s00190-011-0508-5.
- Huang Y N, Jeng B S. 1978. On the forenoon bite-out in the critical frequency of the F2-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 40(5): 581-584.
- Juan J M, Rius A, Hernández-Pajares M, et al. 1997. A two-layer model of the ionosphere using Global Positioning System data. *Geophys. Res. Lett.*, 24(4): 393-396.
- Le H J, Liu L B, Ding F, et al. 2010. Observations and modeling of the ionospheric behaviors over the East Asia zone during the 22 July 2009 solar eclipse. *J. Geophys. Res.*, 115(A10): A10313, doi: 10.1029/2010JA015609.
- Li G Z, Ning B Q, Zhao B Q, et al. 2009. Characterizing the 10 November 2004 storm-time middle-latitude plasma bubble event in Southeast Asia using multi-instrument observations. *J. Geophys. Res.*, 114(A7): A07304, doi: 10.1029/2009JA014057.
- Li G Z, Ning B Q, Abdu M A, et al. 2011. On the occurrence of postmidnight equatorial F region irregularities during the June solstice. *J. Geophys. Res.*, 116(A4): A04318, doi:10.1029/2010JA016056.
- Li Q, Ning B Q, Zhao B Q, et al. 2012. Applications of the CMONOC based GNSS data in monitoring and investigation of ionospheric space weather. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(7): 2193-2202, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.006.
- Liu J, Zhao B, Liu L. 2010. Time delay and duration of ionospheric total electron content responses to geomagnetic disturbances. *Ann. Geophys.*, 28: 795-805, doi: 10.5194/angeo-28-795-2010.
- Liu L B, Wan W X, Ning B Q. 2004. Statistical modeling of ionospheric f_oF_2 over Wuhan. *Radio Sci.*, 39(2): RS2013, doi: 10.1029/2003RS003005.
- Liu L, Wan W, Ning B. 2006. A study of the ionogram derived effective scale height around the ionospheric h_mF_2 . *Ann. Geophys.*, 24: 851-860.
- Ma G Y, Maruyama T. 2006. A super bubble detected by dense GPS network at East Asian longitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 33(21): L21103, doi: 10.1029/2006GL027512.
- Mansilla G A, Mosert M, Ezquer R G. 2005. Seasonal variation of the total electron content, maximum electron density and equivalent slab thickness at a South-American station. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 67(17-18): 1687-1690.
- Mao T, Wan W X, Yue X A, et al. 2008. An empirical orthogonal function model of total electron content over China. *Radio Sci.*, 43(2): RS2009, doi: 10.1029/2007RS003629.
- Meggs R W, Mitchell C N, Spencer P S J. 2004. A comparison of techniques for mapping total electron content over Europe using GPS signals. *Radio Sci.*, 39(1): RS1S10, doi: 10.1029/2002RS002846.
- Millward G, Rishbeth H, Fuller-Rowell T, et al. 1996. Ionospheric F₂ layer seasonal and semiannual variations. *J. Geophys. Res.*, 101(A3): 5149-5156.
- Pi X, Mannucci A J, Lindqwister U J, et al. 1997. Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network. *Geophys. Res. Lett.*, 24(18): 2283-2286.
- Ping J, Kono Y, Matsumoto K, et al. 2002. Regional ionosphere map over Japanese Islands. *Earth, Planets and Space*, 54(12): e13-e16.
- Wan W X, Liu L B, Yuan H, et al. 2005. The GPS measured SITEC caused by the very intense solar flare on July 14, 2000. *Adv. Space Res.*, 36(12): 2465-2469.
- Wan W X, Ning B Q, Yuan H, et al. 1998. Observation of ionospheric disturbances with GPS beacons. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 18(3): 247-252.
- Wan W X, Ning B Q, Liu L B, et al. 2007. Nowcasting the ionospheric total electron content over China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 22(4): 1040-1045.
- Wang M, Ding F, Wan W X, et al. 2007. Monitoring global traveling ionospheric disturbances using the worldwide GPS network during the October 2003 storms. *Earth, Planets and Space*, 59(5): 407-419.
- Wielgosz P, Grejner-Brzezinska D, Kashani I. 2003. Regional ionosphere mapping with Kriging and multiquadric methods. *Journal of Global Positioning Systems*, 2(1): 48-55.
- Xiong B, Wan W X, Ning B Q, et al. 2007. A comparison and analysis of the S_i index, C/N and ROTI over Sanya. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(6): 1639-1648.
- Xiong B, Wan W X, Liu L B, et al. 2011. Ionospheric response to the X-class solar flare on 7 September 2005. *J. Geophys. Res.*, 116(A11): A11317, doi: 10.1029/2011JA016961.
- Xiong B, Wan W X, Ning B Q, et al. 2014. A statistic study of ionospheric solar flare activity indicator. *Space Weather*, 12(1): 29-40, doi: 10.1002/2013SW001000.
- Xu J S, Zhu J, Li L. 2007. Effects of a major storm on GPS amplitude scintillations and phase fluctuations at Wuhan in China. *Adv. Space Res.*, 39(8): 1318-1324.
- Yu T, Wan W X, Liu L B, et al. 2004. Global scale annual and semi-annual variations of daytime N_mF₂ in the high solar activity years. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 66(18): 1691-1701.
- Yue X, Wan W, Liu L, et al. 2007. Statistical analysis on spatial correlation of ionospheric day-to-day variability by using GPS and Incoherent Scatter Radar observations. *Ann. Geophys.*, 25: 1815-1825.
- Zhang D H, Xiao Z. 2000. Method of calculating TEC with GPS data and its application to the ionospheric disturbances. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 43(4): 451-458.
- Zhang D H, Mo X H, Cai L, et al. 2011. Impact factor for the ionospheric total electron content response to solar flare irradiation. *J.*

Geophys. Res., 116(A4): A04311, doi: 10.1029/2010JA016089.

Zhao B Q, Wang M, Yu T, et al. 2008. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? *J. Geophys. Res.*, 113 (A11): A11304, doi: 10.1029/2008JA013613.

附中文参考文献

李强, 宁百齐, 赵必强等. 2012. 基于陆态网络 GPS 数据的电离层空间天气监测与研究. *地球物理学报*, 55(7): 2193-2202, doi:

10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.006.

万卫星, 宁百齐, 袁洪等. 1998. 电离层扰动的 GPS 探测. *空间科学学报*, 18(3): 247-252.

万卫星, 宁百齐, 刘立波等. 2007. 中国电离层 TEC 现报系统. *地球物理学进展*, 22(4): 1040-1045.

熊波, 万卫星, 宁百齐等. 2007. 海南三亚地区 S_i 指数与 C/N、ROTI 的比较分析. *地球物理学报*, 50(6): 1639-1648.

张东和, 萧佐. 2000. 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*, 43(4): 451-458.

(本文编辑 何燕)