0254-6124/2018/38(6)-855–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HOU Weizhen, ZHANG Shaocheng, YIN Fei, YU Tao. Statistical analysis of the ionosphere disturbance based on the IGS global ionosphere TEC map (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(6): 855-861. DOI:10.11728/cjss2018.06.855

基于 IGS 电离层 TEC 格网的扰动特征统计分析 *

侯威震[1] 张绍成[1] 殷 飞[1] 余 涛[2]

1(中国地质大学信息工程学院 武汉 430074)

2(中国地质大学地球物理与空间信息学院 武汉 430074)

摘 要 电离层总电子含量 (TEC) 是研究空间天气特性的重要参量, 通过分析电离层 TEC, 可以了解空间环境的变化特征. 利用 IGS 提供的 1999—2016 年全球电离层 TEC 格网数据, 按照地磁纬度将全球划分为高、中、中低、低磁纬四个区域, 计算不同区域的电离层扰动; 利用大量统计数据选取电离层扰动事件的判定阈值, 分析电离层扰动与太阳活动、时空之间的关系; 计算电离层扰动指数与地磁活动之间的相关系数. 结果显示: 电离层扰动与太阳活动变化具有较强的正相关特性. 在太阳活动低年, 电离层扰动事件发生的概率约为 1.79%, 在太阳活动高年发生扰动的概率约为 10.18%. 在空间分布上, 无论是太阳活动高年还是低年, 高磁纬地区发生扰动事件的概率均大于其他磁纬出现扰动事件的概率. 计算得到的中磁纬和中低磁纬地区电离层扰动指数与全球地磁指数 Ap 的相关系数分别为 0.57 和 0.56, 说明电离层扰动指数与 Ap 具有较好的相关关系; 高磁纬电离层扰动指数与 Ap 的相关系数为 0.44; 低磁纬扰动指数与 Ap 的相关系数为 0.39. 以上结果表明, 不同区域电离层扰动与全球地磁指数 Ap 的相关性不同, 测定区域地磁指数可能会提高与电离层扰动的相关性.

关键词 电离层总电子含量, 电离层扰动, 地磁活动, 相关性分析

中图分类号 P 353

Statistical Analysis of the Ionosphere Disturbance Based on the IGS Global Ionosphere TEC Map

HOU Weizhen[1] ZHANG Shaocheng[1] YIN Fei[1] YU Tao[2]

1(*Faculty of Information Enginieering, China University of Geosciences, Wuhan* 430074)

2(*Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan* 430074)

Abstract The ionospheric Total Electron Content (TEC) is an important parameter for space weather research and helps to understand the changes of space environment. In this paper, 18 years' IGS ionospheric TEC grid data from 1999 to 2016 are employed to calculate the ionosphere disturbance over four different areas, including high, middle, mid-low and low magnetic latitude. The thresholds of the ionosphere disturbance are selected according to the statistic results on different TEC grid point, and the relationship between ionosphere disturbance and other physical elements, such as solar activity, geomagnetic latitudes and geomagnetic activities, are studied. The results

* 国家自然科学青年基金项目资助 (41504023)

2017-05-18 收到原稿, 2018-04-25 收到修定稿

E-mail: ionabc.hwz@foxmail.com, gnss.zsc@foxmail.com

show that the ionosphere disturbances are closely related with the solar activities. The occurrence rate of TEC disturbance event's is about 1.79% at lower solar activity, while the rate increases to 10.18% at higher solar activity. The high latitude areas always have higher ionosphere disturbance rate than other areas. The correlation coefficient between TEC disturbance index of middle and mid-low magnetic latitude and geomagnetic index Ap are 0.57 and 0.56 respectively. The coefficients in high and low magnetic latitude are 0.44 and 0.39 respectively. There are different correlations between ionosphere disturbance of different areas and global geomagnetic index Ap, and using regional geomagnetic index could help improving the correlations between geomagnetic index and ionospheric disturbance.

Key words Ionospheric Total Electronic Content (TEC), Ionospheric disturbance, Geomagnetic activity, Correlation analysis

0 引言

电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 是描述电离层特征的一个重要参量. 电离层 TEC 的时空变化对全球卫星导航、定位、授时等服务具有重要影响, 对电离层 TEC 的探测是空间环境天气监测的重要研究内容 [1,2]. 随着全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的发展和国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 组织地基观测站网的完善, 可利用地面基准观测站获取高精度的电离层 TEC 数据, 数据精度可达 1~3 TECU. 通过对 TEC 数据的分析, 可以深入了解电离层的活动形态, 进而为环境和灾害监测提供理论支撑 [3−5].

电离层扰动作为重要的空间天气事件, 直接影响穿过扰动区域的无线电信号传播. Rishbeth 等 [6,7] 认为电离层扰动主要源于太阳活动、地磁活动及低层大气活动的影响. Yu 等 [8] 定义了一种计算全球电离层 TEC 起伏的指数, 该指数为全球电离层扰动变化提供了简单直观的度量, 并利用偏相关分析研究该指数与太阳活动、地磁活动之间的关系. Deng 等 [9] 通过使用中国地区 6 个 GPS 双频观测站得到的电离层 TEC 数据, 引入电离层扰动指数来判定电离层暴事件, 统计分析电离层暴事件的时空分布特征. Zhao[10] 研究了电离层 TEC 暴的统计特性, 分析了电离层暴在不同纬度、季节、地方时的特性, 并且依据这些特性建立了暴时电离层模型. 另外, 地震、磁暴和台风等灾害事件对电离层产生的影响及电离层扰动的规律性也已经有若干研究 [11−15].

利用 IGS 发布的 1999−2016 年电离层 TEC 格网产品, 将全球区域按照地磁纬度划分为四个区域对电离层扰动进行分析. 首先利用电离层 TEC 数据及相对应的背景值计算电离层扰动指数, 然后通过分析电离层扰动指数确定电离层扰动事件, 最后分析电离层扰动事件的时空分布特性以及电离层扰动指数与地磁活动之间的相关性.

1 全球电离层 TEC 格网产品及分析方法

为建立完善的电离层模型, 提供可靠的全球电离层格网产品 GIMs (Global Ionospheric Maps), 1998 年 IGS 电离层工作组成立. 该工作组目前已有七家科研机构发布各自的电离层产品, 分别为 CODE[16] (Center for Orbit Determination in Europe), ESA (European Space Agency), JPL[17] (Jet Propulsion Laboratory), UPC[18] (Polytechnical University of Catalonia), CAS[19,20] (Chinese Academy of Sciences)、EMRG (Canadian Geodetic Survey of Natural Resources Canada) 及 WHU[21] (University of Wuhan). 各个电离层分析中心使用不同的数据源和函数模型独立计算, 并将计算结果发给 IGS 中心, IGS 发布最终的 GIMs. 该 GIMs 的时空分辨率为 2 h×5°×2.5°, 需要事后 11 天才能够获得, 精度相对较高, 可为研究电离层活动提供可靠的数据源 [22].

这里在 IGRF12th 全球地磁模型 [23,24] 的基础上, 首先将地理经纬度的 TEC 格网产品转换成基于地磁经纬度的格网产品, 其次按照地磁纬

度分成高磁纬地区 (60° 至 75°, −75° 至 −60°)、中磁纬地区 (40° 至 60°, −60° 至 −40°)、中低磁纬地区 (20° 至 40°, −40° 至 −20°) 和低磁纬地区 (−20° 至 20°), 计算不同区域的电离层扰动指数 δ_z, 其表达式为

$$\delta_z = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j}^{M}\frac{\sum_{i}^{N} R^2\cos\varphi_i}{\sum_{i}^{N}\cos\varphi_i}},$$

$$R = (T_{i,j}^{\mathrm{obs}} - T_{\mathrm{m}i,j}^{\mathrm{med}})/T_{\mathrm{m}i,j}^{\mathrm{med}}. \tag{1}$$

其中, M 和 N 分别为沿地磁经度和纬度方向的格网点个数, $T_{i,j}^{\mathrm{obs}}$ 为格网点的观测值, $T_{\mathrm{m}i,j}^{\mathrm{med}}$ 为对应时刻观测日前后各 13 天的滑动中值, φ_i 为地磁纬度, $\cos\varphi_i$ 为网格点的面积加权因子. 使用 27 天滑动中值能够体现均值为 27 天的太阳自转周期对电离层活动水平的影响, 并可消除不同月份之间的电离层背景值可能出现的跳变.

2 电离层扰动事件

2.1 电离层扰动事件定义

根据上述计算得到的区域性电离层扰动指数 δ_z, 将所有电离层扰动指数划分为 51 个间隔, 具体划分方式如下:

$$\begin{cases} 0.02(k-1) < \delta_z \leqslant 0.02k, \quad 1 \leqslant k \leqslant 50; \\ \delta_z > 1.0. \end{cases} \tag{2}$$

由式 (2) 可得总体扰动数据分布概率密度曲线, 如图 1 所示. 由图 1 可知, 电离层扰动指数主要集中在 0.23 以内, 占数据总量的 90%. 分析以往电离层

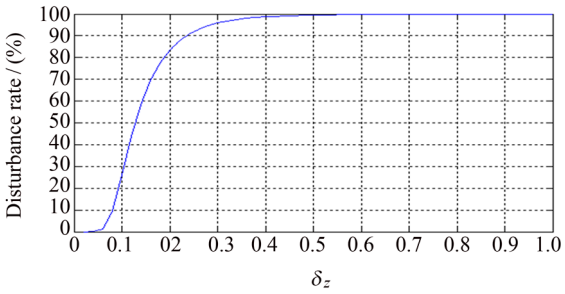


图 1 电离层扰动指数概率分布

Fig. 1 Rate of ionospheric disturbance index

扰动方面的研究结论, 认为电离层活动大约 10% 的时间处在扰动状态 [9], 即 $\delta_z > 0.23$ 为电离层扰动事件判定标准.

2.2 电离层扰动的时空变化特征

地磁活动是电离层扰动的一个重要来源, 为了直观描述不同区域电离层扰动与地磁活动的关系, 这里研究分析了 1999−2016 年地磁指数 Kp 与低磁纬、中低磁纬、中磁纬、高磁纬区域电离层扰动的相关关系, 结果如图 2 所示.

图 2 中 Kp 指数和电离层扰动是同一时刻得到的该月平均值. 由图 2 可以看出, 地磁 Kp 指数在 2003 年 5 月与 11 月有最大值, 1999−2005 年和 2015−2016 年地磁活动都有较大的变化. 地磁活动变化大的情况下, 四个不同区域的电离层扰动变化都随之增加, 四个区域电离层扰动较大值出现在 2003 年, 且 11 月份出现的电离层扰动变化大于 5 月份出现的扰动变化. 与地磁活动变化不同的是, 高磁纬地区扰动最大, 中磁纬与中低磁纬扰动相当, 低磁纬区域电离层扰动最小. 2006−2011 年地磁活动水平较低时, 四个区域的电离层扰动幅度也较小.

按照设定的电离层扰动事件标准, 分析电离层扰动事件在不同区域和太阳活动状态出现的概率. 表 1 给出了 1999−2016 年不同区域电离层扰动事件占总扰动事件的概率, 图 3 给出了电离层扰动事件与太阳活动水平的对应关系.

由表 1 可知, 1999−2016 年电离层扰动事件出现概率均在高磁纬最高, 中磁纬次之, 中低磁纬与低磁纬扰动概率最低且二者相当. 高磁纬电离层扰动事件占总扰动事件的 2.77%, 中磁纬电离层扰动事件占 1.34%, 中低磁纬电离层扰动事件占 0.73%, 低磁纬电离层扰动事件占 0.71%. 电离层扰动概率出现较大的时间与图 2 一致. 在整个电离层扰动过程中, 高磁纬扰动概率较大, 这可能是因为高纬度区域电离层扰动受多种因素的影响, 电离层变化较剧烈, 并且高纬度电离层背景值较小, 发生变化时起伏抖动较大.

将表 1 中的低磁纬、中低磁纬、中磁纬及高磁纬扰动和 $F_{10.7}$ 指数由图 3 给出. 由图 3 可知, 高纬度电离层扰动事件概率最大, 其他区域扰动事件概率略低; 四个区域扰动变化趋势与太阳活动水平变化趋势类似, 尤其在 2005−2008 年与 2008−2011 年太阳活动水平先降低后又增高的过程中, 电离层扰动事件概率与其变化趋势一致. 2009−2010 年为太阳活动低

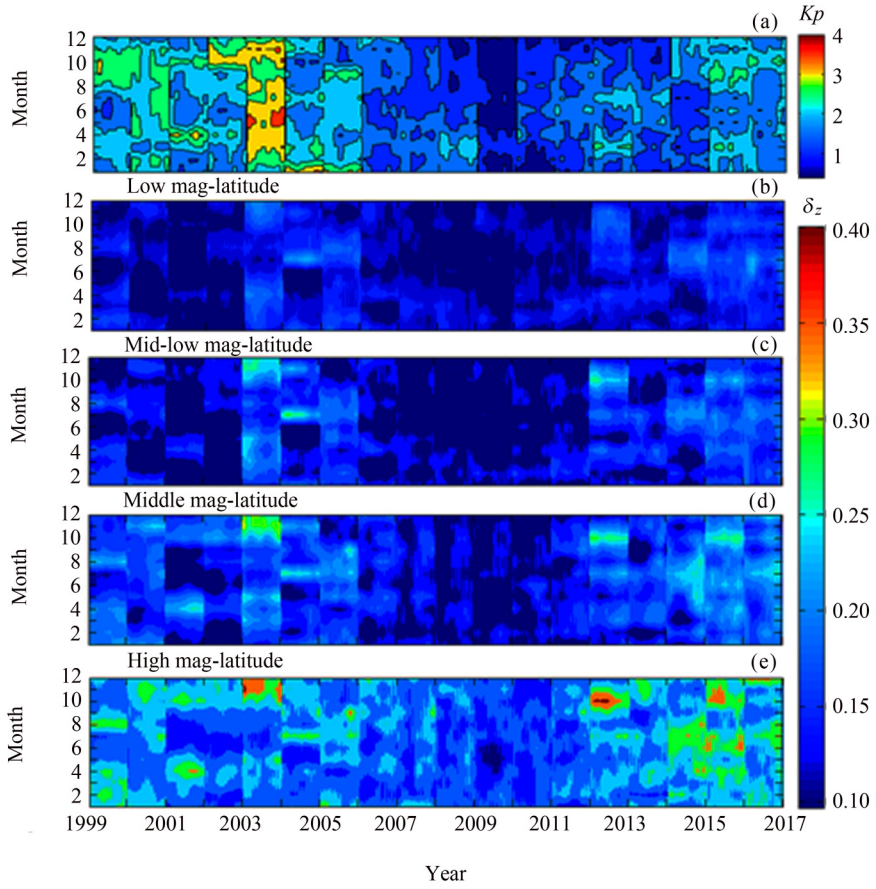


图 2 1999—2016 年地磁 *Kp* 指数及其对应时空区域的电离层扰动对比. (a) 为 *Kp* 指数的时域分布, (b)~(e) 分别为低地磁纬度、中低地磁纬度、中地磁纬度和高地磁纬度区域的电离层扰动概率时间分布

Fig. 2 Disturbance of ionosphere in different area and *Kp* index from 1999 to 2016, (a) shows the *Kp* index and (b)~(e) show the corresponding ionosphere disturbance rate at low, mid-low, middle and high geomagnetic latitude

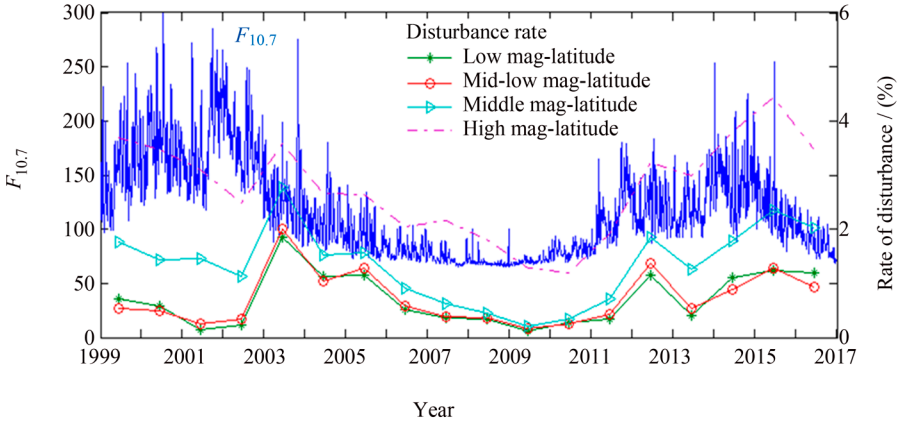


图 3 1999—2016 年太阳活动指数 $F_{10.7}$ 与电离层扰动

Fig. 3 Sun's activity index $F_{10.7}$ and ionospheric disturbance from 1999 to 2016

年, 2002 和 2014 为太阳活动高年. 在太阳活动低年, 扰动概率最小; 在太阳活动高年, 电离层扰动概率较大, 但是电离层扰动比 2003 和 2015 年的事件小. 这是因为 2003 年和 2015 年的地磁活动较大, 电离层扰

表 1　1999—2016 年不同纬度处的电离层扰动事件概率

Table 1　Rate of ionospheric disturbance from 1999 to 2016 at different latitude

年度	低磁纬/(%)	中低磁纬/(%)	中磁纬/(%)	高磁纬/(%)	总值/(%)
1999	0.71	0.53	1.76	3.68	6.68
2000	0.57	0.49	1.44	3.48	5.98
2001	0.14	0.25	1.45	3.10	4.94
2002	0.24	0.33	1.13	2.49	4.19
2003	1.84	2.01	2.76	3.57	10.18
2004	1.12	1.04	1.52	2.65	6.33
2005	1.16	1.28	1.57	2.63	6.64
2006	0.51	0.57	0.90	2.04	4.02
2007	0.36	0.39	0.62	2.16	3.53
2008	0.35	0.36	0.44	1.80	2.95
2009	0.13	0.17	0.20	1.29	1.79
2010	0.27	0.26	0.35	1.19	2.07
2011	0.33	0.42	0.71	1.91	3.37
2012	1.16	1.37	1.86	3.22	7.61
2013	0.41	0.53	1.26	3.00	5.20
2014	1.10	0.89	1.79	3.80	7.58
2015	1.23	1.28	2.35	4.44	9.30
2016	1.20	0.94	2.02	3.48	7.64
平均值	0.71	0.73	1.34	2.77	

动事件概率上升.

2.3　电离层扰动与地磁活动的相关性

为定量描述地磁活动对电离层扰动的影响, 这里给出四个地磁纬度区域的电离层扰动指数 δ_z 及其对应的全球行星性地磁指数 Ap (见图 4), 并且计算了电离层扰动与地磁指数的相关系数.

由图 4 可以看出, 不同地磁纬度电离层扰动与地磁活动都有一定的相关性. 电离层扰动变化大的情况下对应较高的地磁指数, 低磁纬地区电离层扰动与地磁活动相关系数为 0.39, 高磁纬地区电离层扰动与地磁活动相关系数为 0.44, 中磁纬和中低磁纬区域电离层扰动与地磁活动相关系数分别为 0.57 和 0.56. 中磁纬和中低磁纬区域电离层扰动与地磁活动指数的相关系数高, 表明这两个区域的电离层扰动和地磁活动有很好的相关性. 这可能是因为行星性地磁活动指数 Ap 是由 Kp 指数派生出来的, 而 Kp 指数是根据建立在地磁纬度 47° 至 63° 之间的 13 个地磁站数据得到的, 所以中磁纬和中低磁纬地区的电离层扰动与地磁活动有相对较好的对应关系. Jakowski 等 [25] 在最初定义局部电离层扰动时就提及了该现象, 并且通过计算两个不同区域的电离层扰动, 发现地磁指数对两个地区的电离层扰动有不同的影响. Jakowski 认为在计算局部电离层扰动时, 使用局部地磁指数能更好地描述电离层变化. Jakowski 等没有给出定量的局部电离层扰动与地磁指数相关系数. 这里通过定量比较, 发现全球地磁指数与局部电离层扰动之间的相关性.

3　结论

基于 IGS 提供的电离层 TEC 格网数据, 计算不同区域电离层格网数据在地磁坐标下的扰动指数,

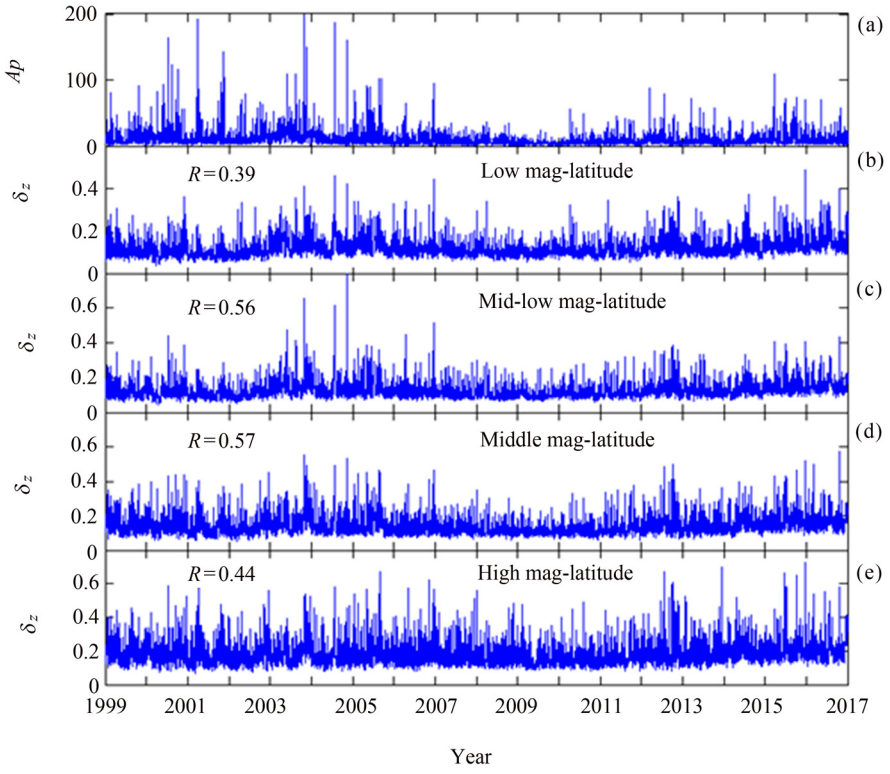


图 4 地磁活动指数与不同地磁纬度区域电离层扰动的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of geomagnetic activity index and ionospheric disturbance in different magnetic latitude

统计分析了电离层扰动的时空变化特性. 对连续 18 年数据的统计分析结果表明, 依据电离层的扰动指数 δ_z 设定电离层扰动事件的阈值, 有助于统计电离层扰动随太阳活动、地磁纬度和时间变化的特征规律, 分析不同纬度电离层扰动与地磁活动指数的相关性. 电离层扰动指数可以直观描述电离层的变化情况, 通过分析电离层扰动的来源和分布特征, 可以对电离层扰动变化进行预测, 进而为空间天气预报、灾害监测、无线电通讯以及卫星导航定位等应用提供重要的预警信息.

参考文献

[1] CANDER L R. Ionospheric research and space weather services [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2008, **70**(15): 1870-1878

[2] PULINETS S A, LIU J Y. Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity [J]. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**(9): 1926-1933

[3] WU Fengbo, WU Renpan, REN Xiaodong. Analysis of temporal-spatial variations of TEC in China with several methods [J]. *J. Geod. Geodyn.*, 2014, **34**(5): 75-81 (吴风波, 吴仁攀, 任晓东. 综合多种方法分析中国区域 TEC 时空变化特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 2014, **34**(5): 75-81)

[4] WANG Weixing, NING Baiqi, LIU Libo, *et al.* Nowcasting the ionospheric total electron content over China [J]. *Prog. Geophys.*, 2007, **22**(4): 1040-1045 (万卫星, 宁百齐, 刘立波, 等. 中国电离层 TEC 现报系统 [J]. 地球物理学进展, 2007, **22**(4): 1040-1045)

[5] ZHANG Xuemin, LIU Jing, ZHAO Biqiang, *et al.* Analysis on ionospheric perturbations Yushu earthquake [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 822-829 (张学民, 刘静, 赵必强, 等. 玉树地震前的电离层异常现象分析 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(6): 822-829)

[6] RISHBETH H. long-term changes in the ionosphere [J]. *Adv. Space Res.*, 1997, **20**(11): 2149-2155

[7] RISHBETH H, MENDILLO M. Patterns of F_2-layer variability [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2001, **63**(15): 1661-1680

[8] YU You, WANG Weixing, LIU Libo, *et al.* A global ionospheric TEC perturbation index [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(9): 2189-2194 (余优, 万卫星, 刘立波, 等. 全球电离层 TEC 起伏特性分析 [J]. 地球物理学报, 2009, **52**(9): 2189-

2194)

[9] DENG Zhongxin, LIU Ruiyuan, ZHEN Weimin, *et al.* Study on the ionospheric TEC storms over China [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(7): 2177-2184 (邓忠新, 刘瑞源, 甄卫民, 等. 中国地区电离层 TEC 暴扰动研究 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(7): 2177-2184)

[10] ZHAO Biqiang. Study on the Annual and Semiannual Anomalies and Storm Characterizes of Mid-and Low Latitude Ionosphere [D]. Wuhan: Wuhan institute of physics and mathematics, institute of geology and Geophysics, China Academy of Sciences, 2006 (赵必强. 中低纬电离层年度异常与暴时特性研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2006)

[11] YAO Yibin, ZHAI Changzhi, KONG Jian, *et al.* The Pre-earthquake ionosphere anomaly of the 2015 Nepal earthquake [J]. *Acta Geod. Cart. Sin.*, 2016, **45**(4): 385-395 (姚宜斌, 翟长治, 孔建, 等. 2015 年尼泊尔地震的震前电离层异常探测 [J]. 测绘学报, 2016, **45**(4): 385-395)

[12] YU Tao, MAO Tian, WANG Yungang, *et al.* Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, **54**(6): 1080-1086 (余涛, 毛田, 王云冈, 等. 汶川特大地震前电离层主要参量变化 [J]. 科学通报. 2009, **54**(6): 1080-1086)

[13] MUNAWAR SHAH, JIN Shuanggen. Statistical characteristics of seismo-ionospheric GPS TEC disturbances prior to global $M_{\rm w} \geqslant 5.0$ earthquakes (1998—2014) [J]. *J. Geodyn.*, 2015, **92**: 42-49

[14] DANILOV A D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances [J]. *Adv. Space Res.*, 2013, **52**(3): 343-366

[15] XIAO Saiguan, HAO Yongqiang, ZHANG Donghe, *et al.* A case study on whole response processes of the ionosphere to typhoons [J]. *Chin. J. Geophys.,* 2006, **49**(3): 623-628 (肖赛冠, 郝永强, 张东和, 等. 电离层对台风响应的全过程的特例研究 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 623-628)

[16] SCHAER S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [D]. Bernese: University of Bernese, 1999.

[17] MANNUCCI A J, WILSON B D, YUAN D N, *et al.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(3): 565-582

[18] HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1999, **61**(16): 1237-1247

[19] WANG Cheng, SHI Chuang, DUAN Bingbing, *et al.* Ionosphere total electron content active broadcasting platform using location and cloud computing [J]. *Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ.*, 2016, **41**(3): 304-309 (王成, 施闯, 段兵兵, 等. 利用位置与云计算建立电离层 TEC 主动式播发平台 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2016, **41**(3): 304-309)

[20] LI Zishen, YUAN Yunbin, WANG Ningbo, *et al.* SHPTS: towards a new method for generating precise global ionospheric TEC map based on spherical harmonic and generalized trigonometric series functions [J]. *J. Geod.*, 2015, **89**(4): 331-345

[21] ZHANG Hongping, HAN Wenhui, HUANG Ling, *et al.* Modeling global ionospheric delay with IGS Ground-based GNSS observations [J]. *Geomat. Inf. Sci. Wuhan Univ.*, 2012, **37**(10): 1186-1189 (章红平, 韩文慧, 黄玲, 等. 地基 GNSS 全球电离层延迟建模 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, **37**(10): 1186-1189)

[22] FELTENS J, SCHAER S. IGS Products for the Ionosphere [J]. *Proc. LGS Ac Workshop*, 1998: 225-232

[23] LESUR V, ROTHER M, WARDINSKI I, *et al.* Parent magnetic field models for the IGRF-12 GRZ-candidates [J]. *Earth, Planets Space*, 2015, **67**: 87

[24] MATTEO N A, MORTON Y T. Ionosphere geomagnetic field: Comparison of IGRF model prediction and satellite measurements 1991—2010 [J]. *Radio Sci.*, 2011, **46**(4) 1-10

[25] JAKOWSKI N, STANKOV S M, SCHLUETER S, *et al.* On developing a new ionospheric perturbation index for space weather operations [J]. *Adv. Space Res.*, 2006, **38**(11): 2596-2600