

doi:10.3799/dqkx.2017.038

基于 COSMIC 数据电离层电子密度空间分布变化

马新欣¹, 林 湛^{2*}, 陈化然¹, 金红林², 刘晓灿¹, 焦立果¹

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要: 地基 GPS 探测可以提供分布全球、高精度、高垂直分辨率的电离层观测资料, 弥补地基 GPS 探测受地域限制、垂直分辨率低的问题。利用 COSMIC 掩星 2008—2011 年数据, 网格化统计分析了太阳活动处于不同水平下的电子密度空间分布变化, 以为分析电离层电子密度的空间扰动变化提供参考背景。研究表明, 电子密度存在明显赤道异常和威德尔海异常现象, 并发现随太阳活动性增强, 在 250~350 km 高度范围电子密度赤道异常现象扩展到中纬地区, 在 300~500 km 高度范围威德尔海异常现象不仅发生在南半球夏季, 春秋季节电子密度夜间值比白天也显著增强; 在 250~500 km 高度范围, 电子密度存在明显的威德尔海异常现象, 并随着太阳活动性增强, 异常区域地理范围扩宽。

关键词: 地球物理; 电离层; 电子密度; 赤道异常; 威德尔海异常。

中图分类号: P351

文章编号: 1000-2383(2017)03-0479-06

收稿日期: 2016-07-02

Spatial Distribution Variations of Ionospheric Electron Density Based on COSMIC Data

Ma Xinxin¹, Lin Zhan^{2*}, Chen Huaran¹, Jin Honglin², Liu Xiaocan¹, Jiao Liguol¹

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: Space-based GPS detection can provide the global distribution, high accuracy, high vertical resolution of the ionosphere observation data, compensate for the problem of regional restriction and low vertical resolution in ground-based GPS detection. To enrich the relevant research, this study analyses the spatial distribution variation of electron density based on COSMIC occultation data from 2008—2011 by statistical method. Results show that electron density is dominated by the EIA and WSA. With the solar activity enhancement, EIA extends into the middle latitudes from 250 km to 350 km height range, and WSA occurs not only in summer of the southern hemisphere, but also in spring and autumn there while electron density values during night time are greater than those during daytime from 300 km to 500 km height range; The electron density has obvious WSA phenomenon from 250 km to 500 km height range. And with the solar activity enhancement, the geographic range of abnormal regional expands.

Key words: geophysics; ionosphere; electron density; EAI; WSA.

0 引言

高层大气中的中性成分在太阳极紫外(EUV)和 X 射线辐射的作用下发生电离, 形成了电离层。电离层具有特殊的分布和变化特征, 目前, 研究人员已经对电离层主要参量的变化规律有了一定的认识, 主

要包括时间尺度上以年为周期的异常变化, 包括冬季异常: 周年变化的最大值出现在冬季(余涛等, 2006); 半年异常: 半年变化的最大值出现在春秋分附近(余涛等, 2006); 年异常: 12 月的值高于 6 月(Rishbeth, 1998); 以及在一些特殊区域的异常变化, 包括赤道异常(Equatorial Ionization Anomaly,

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41174056); 中央公益性科研院所基本科研业务经费(No.DQJB16B08); 省级地震行业专项(No.201108004)。

作者简介: 马新欣(1983—), 女, 助理研究员, 主要从事电离层数据分析工作。ORCID:0000-0003-2217-8734。E-mail: maxinxin0923@163.com

* **通讯作者:** 林湛, ORCID:0000-0002-0359-2051。E-mail: linzhan1982@yeah.net

引用格式: 马新欣, 林湛, 陈化然, 等, 2017. 基于 COSMIC 数据电离层电子密度空间分布变化. 地球科学, 42(3): 479—484.

EIA):沿纬度方向的峰值分布在磁赤道 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的范围(Tulasi *et al.*, 2009); 威尔德海异常(Weddell Sea Anomaly, WSA):在威德尔海区域夜晚的值高于白天(Burns *et al.*, 2008).

GPS 探测技术为电离层观测提供了丰富的资料,地基 GPS 探测技术具有时间连续性好的优点,但同时存在受地域限制、垂直分辨率低的问题.1995 年, GPS/MET 掩星探测计划成功后,天基 GPS 探测被广泛应用于地球大气层和电离层探测,该技术可以提供全球分布、高精度、高垂直分辨率的电离层观测资料.最近几年,很多学者开展了使用 COSMIC 掩星数据分析电离层主要参量时空分布特征的研究工作(Tulasi *et al.*, 2009; Lin *et al.*, 2009, 2010; Liu *et al.*, 2009; Burns *et al.*, 2011, 2012; 马新欣等, 2014; 马新欣, 2015).Tulasi *et al.* (2009) 使用 2006 年 11 月至 2007 年 10 月 COSMIC 数据,得出太阳活动处于低水平条件下 EIA 与地方时变化的依存关系; Lin *et al.* (2010) 使用 COSMIC 2007 年电子密度数据,通过 WSA 三维分布结果,发现 WSA 在 300 km 高度范围最明显; Burns *et al.* (2012) 使用 COSMIC 2008—2010 年数据研究发现 NmF2 存在的半年异常和年异常现象从低纬地区向中纬地区扩展,扩展程度与太阳活动水平相关,高纬地区 NmF2 存在年变化.

目前,基于掩星数据的电子密度空间分布规律的相关研究不足,电子密度是表现电离层变化特征的重要参量,可以反映不同高度上电离层的分布规律,鉴于此,笔者利用 COSMIC 2008—2011 年电子密度剖面数据,得到地磁平静时期($K_p \leq 3$)电子密度在不同太阳活动条件下(低年和高年)全球分布情况以及在不同地磁季节的扰动分布情况,同时,分析了电子密度 WSA 现象的变化特征.相关的分析结果可以为研究电离层电子密度的空间扰动变化提供背景参考.

1 数据和分析方法

COSMIC 卫星于 2006 年 4 月 14 日发射,由 6 颗 LEO(low earth orbiting)卫星组成,最终保持在 72° 倾角和 800 km 高度的轨道上运行,每天获得 1 000 至 2 500 个中性大气廓线和电离层电子密度剖面信息(郭鹏等, 2002). 本文使用 COSMIC 掩星的 2008 年 1 月至 2011 年 12 月的电离层电子密度剖面数据.

首先,为了消除地磁活动的影响,笔者将 2008—2011 年期间满足地磁平静条件($K_p \leq 3$)的

电子密度数据筛选出来;然后,再按时间白天(LT12-15)和夜间(LT00-03),高度范围 200~500 km 筛选数据,再将 2008—2009 年定义为太阳活动低年,2010—2011 年定义为太阳活动高年,将数据分为两部分,分别考察电子密度在不同太阳活动条件下的变化特征,图 1 给出了太阳指数 F107 的的月均值变化,这里定义的太阳活动高低年只是相对变化,在长时间尺度,2010 年和 2011 年的太阳活动仍属于低水平;最后,按高度范围 50 km 间隔分层,采用网格划分(地理纬度 $5^{\circ} \times$ 地理经度 5°),网格内数据取均值进行统计分析.

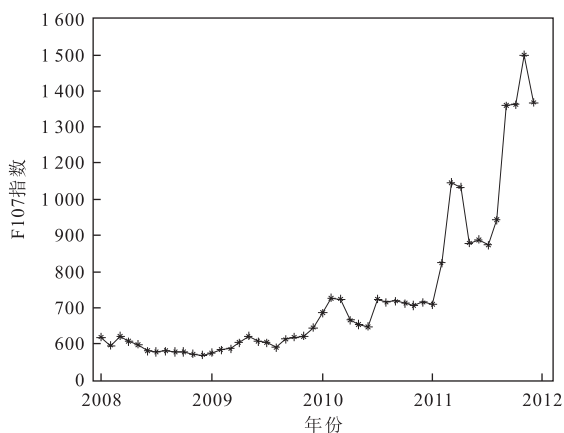


图 1 2008—2011 年期间 F107 指数

Fig.1 The variation of F107 during the period 2008—2011

2 结果分析

2.1 年平均变化

计算在不同太阳活动条件下(低年和高年)200~500 km 高度范围白天(LT12-15)和夜间(LT00-03)电子密度年均值的全球分布变化,每个网格内的平均值可以看作是消除了季节变化后的背景值,因为篇幅所限,仅显示 300~350 km 高度范围电子密度的分布如图 2.结果表明,不论是白天还是夜间,200~500 km 高度范围电子密度值在太阳活动高年明显大于太阳活动低年,说明太阳活动显著改变了电子密度的大小,最大电子密度增加约 8×10^5 el/cm³,最大值分布在 250~350 km 高度范围.

研究表明,不论是在太阳活动低年还是高年,白天最明显的特征是赤道异常现象,电子密度在磁赤道 $\pm 20^{\circ}$ 附近存在峰值分布,其最重要的分布特征双峰结构在 200~500 km 高度范围普遍存在,赤道电离层异常是电磁 $E \times B$ 漂移产生的“喷泉效应”形

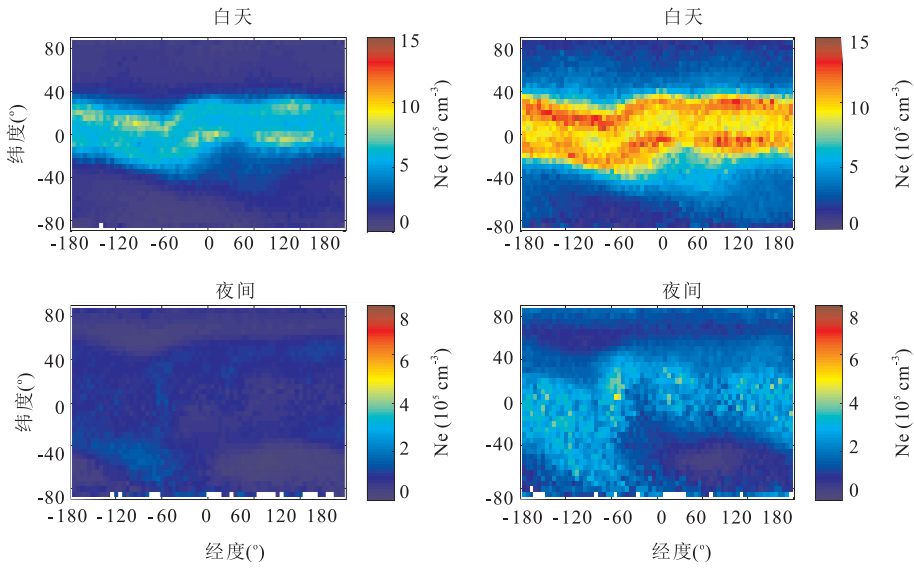


图 2 太阳活动低年和高年 300~350 km 高度范围 Ne 白天(LT12-15)和夜间(LT00-03)年变化

Fig.2 The annual variation of electron density in the daytime and nighttime during the low and high solar activity levels from 300~350 km height range

左侧为太阳活动低年,右侧为太阳活动高年

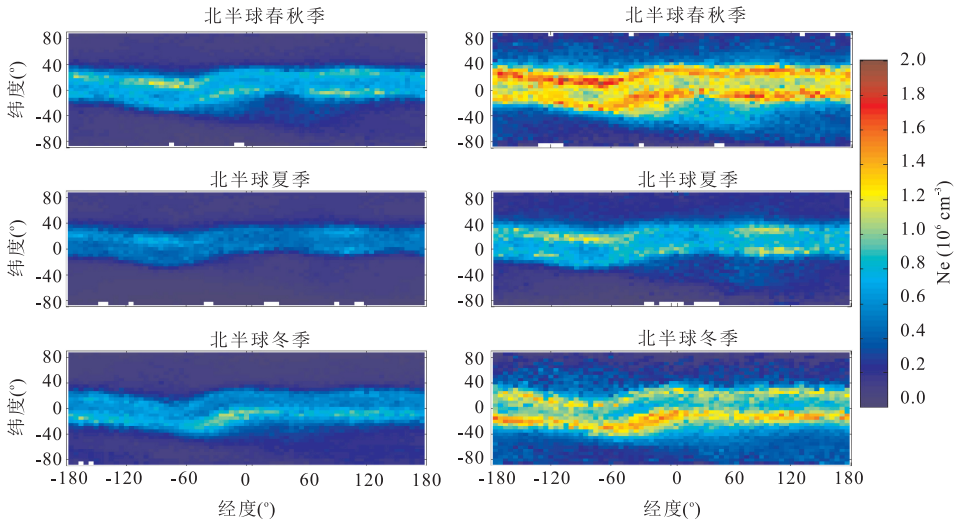


图 3 太阳活动低年和高年 300~350 km 高度范围 Ne(电子密度)白天(LT12-15)地磁季节变化

Fig.3 The seasonal variation of electron density in the daytime during low and high solar activity levels from 300~350 km height range

左侧为太阳活动低年,右侧为太阳活动高年

成,由于受到中性风影响,异常区域呈现出南北半球的不对称性.由于地磁倾角的影响,在 $50^{\circ}W \sim 50^{\circ}E$ 经度范围,电子密度的赤道峰值向北偏离(Tulasi *et al.*, 2009).此外,研究结果显示,在太阳活动高年 250~350 km 高度范围赤道异常扩展到中纬地区,夜间没有规律的赤道异常现象存在.

2.2 季节变化

计算在不同太阳活动条件下(低年和高年)

200~500 km 高度范围白天(LT12-15)和夜间(LT00-03)电子密度地磁季节的全球分布变化,由于篇幅所限,仅显示 300~350 km 高度范围白天和夜间电子密度分布变化如图 3 和图 4.

结果表明,无论太阳活动低年还是高年,电子密度在白天存在明显的季节变化,中低纬地区 250~500 km 高度范围,电子密度最大值出现在春秋季节,但是,夜间季节变化不明显.此外,研究结果显示,在太

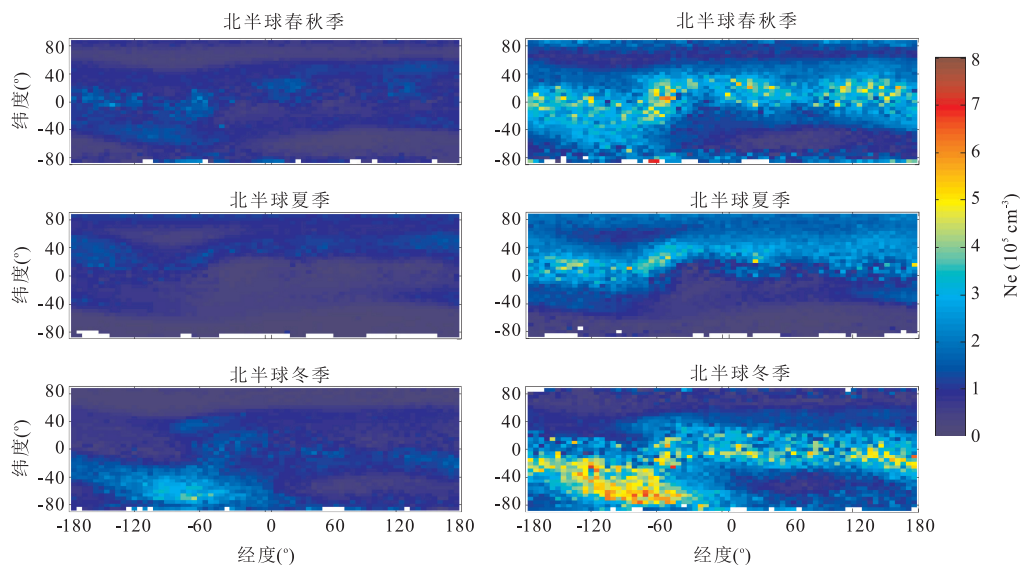


图 4 太阳活动低年和高年 300~350 km 高度范围 Ne(电子密度)夜间(LT00-03)地磁季节变化

Fig.4 The seasonal variation of electron density in the nighttime during low and high solar activity levels from 300~350 km height range

左侧为太阳活动低年,右侧为太阳活动高年

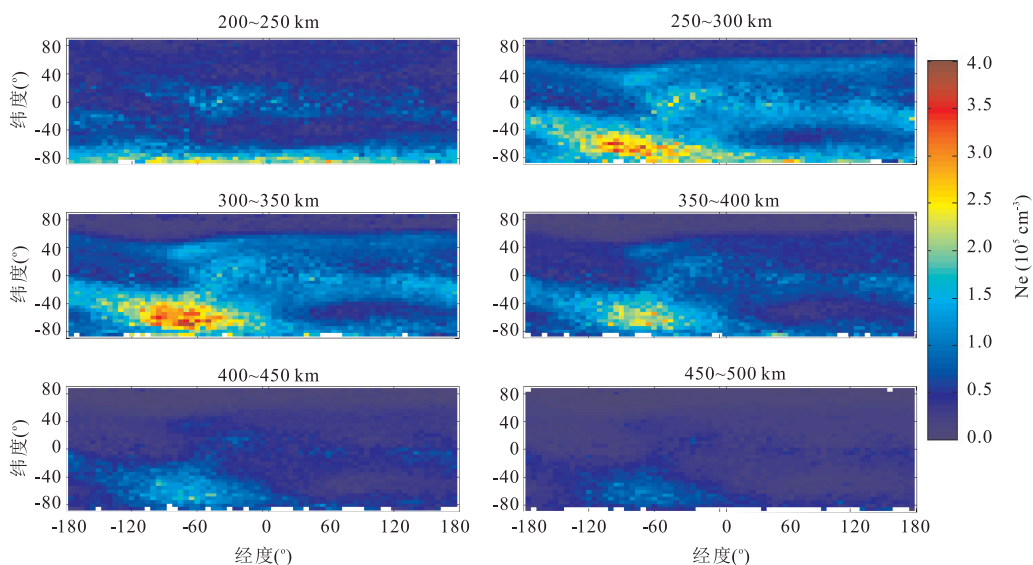


图 5 太阳活动低年 200~500 km 高度范围,50 km 间隔 Ne(电子密度)夜间(LT00-03)变化

Fig.5 The variation of electron density in the nighttime during low solar activity level from 200 km to 500 km height range

阳活动高年,300~500 km 高度范围 $30^{\circ}\text{W}\sim 110^{\circ}\text{W}$ 和 $40^{\circ}\text{S}\sim 80^{\circ}\text{S}$ 地理区域,也就是著名的威德尔海异常区域,不仅在南半球夏季,在春秋季节电子密度夜间的值比白天也显著增强,这与 Jee *et al.* (2009) 基于 TOPEX 计算 TEC 数据的研究结果是基本一致的。

2.3 WSA 变化

计算在不同太阳活动条件下(低年和高年)南半球夏季 200~500 km 高度范围 50 km 间隔电子密度夜间的分布变化,显示电子密度夜间分布变化如

图 5 和图 6.研究表明,最明显的特征是无论太阳活动低年还是高年在 250~500 km 高度范围,电子密度夜间变化都存在明显的 WSA 现象,WSA 区域电子密度最大值发生在 300~400 km 高度范围,主要发生在 $30^{\circ}\text{W}\sim 110^{\circ}\text{W}$ 和 $40^{\circ}\text{S}\sim 80^{\circ}\text{S}$ 范围,同时,研究发现随着太阳活动增强,WSA 区域比太阳活动低年地理范围扩宽。

目前的研究还没有给 WSA 区域的增强提供一个统一的解释,以前的研究表明地磁偏角对东向中性

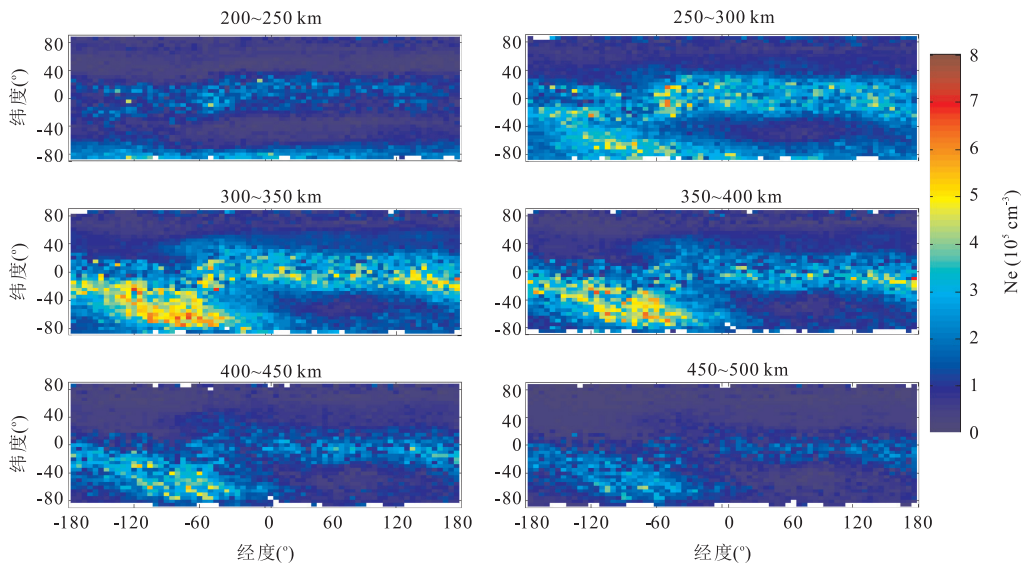


图 6 太阳活动高年 200~500 km 高度范围, 50 km 间隔 Ne(电子密度)夜间(LT00-03)变化

Fig.6 The variation of electron density in the nighttime during high solar activity level from 200~500 km height range

风引起的垂直漂移的调制可以给 WSA 区域提供一个解释,从傍晚到子夜,中性风的东向风分量,有效的东向风造成夜间磁偏角的 WSA 区域的等离子体垂直向上漂移,从而造成了该区域等离子密度的增强,在白天较小的东向中性风条件下,光电离过程和其他的动力学过程起主要作用(李柳元等,2011)。

3 结论

本文使用 COSMIC 掩星从 2008 年到 2011 年期间探测到的电子密度数据进行网格化统计分析,研究在不同太阳活动条件下(低年和高年)电子密度的空间分布变化,统计结果表明:

(1)在 200~500 km 高度范围,太阳活动显著改变了电子密度的大小,最大电子密度增加约 $8 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$,无论太阳活动低年还是高年,白天最明显的变化特征是赤道异常现象,在太阳活动高年 250~350 km 高度范围赤道异常扩展到中纬地区,夜间没有规律的赤道异常现象存在。

(2)无论太阳活动低年还是高年,在 250~500 km 高度范围,电子密度夜间变化都存在明显的 WSA 现象,WSA 区域电子密度最大值发生在 300~400 km 高度范围,并且随着太阳活动增强,WSA 区域比太阳活动低年地理范围扩宽。

(3)在太阳活动高年,300~500 km 高度范围威德尔海异常区域不仅发生在南半球夏季,在春秋季节电子密度夜间的值比白天也显著增强,电子密度在

白天存在明显的季节变化,夜间季节变化不明显。

本文的研究结果可以为分析电离层电子密度的空间扰动变化提供一种背景参考,但是,笔者仅给出了统计时间段内平静状态下电离层电子密度的分布特征,不能反映长周期的变化规律,事实上,电离层的实时变化非常复杂,包含了太阳风、磁层、电离层相互作用的很多信息,各种复合因素引起的相关物理过程还有待进一步研究探索。

References

- Burns, A.G., Solomon, S.C., Wang, W., et al., 2011. The Summer Evening Anomaly and Conjugate Effects. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116 (A1): A01311. doi:10.1029/2010JA015648
- Burns, A.G., Solomon, S.C., Wang, W., et al., 2012. Daytime Climatology of Ionospheric NmF2 and HmF2 from COSMIC Data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117 (A9): 667 - 672. doi: 10.1029/2012ja017529
- Burns, A.G., Zeng, Z., Wang, W., et al., 2008. Behavior of the F2 Peak Ionosphere over the South Pacific at Dusk during Quiet Summer Conditions from COSMIC Data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113 (A12): 2036 - 2044. doi:10.1029/2008ja013308
- Guo, P., Hong, Z. J., Zhang, D. H., 2002. COSMIC Project. *Progress in Astronomy*, 22 (4): 324 - 336 (in Chinese with English abstract).
- Jee, G., Burns, A.G., Kim, Y. H., et al., 2009. Seasonal and Solar Activity Variations of the Weddell Sea Anomaly

- Observed in the TOPEX Total Electron Content Measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A4):A04307. doi:10.1029/2008ja013801
- Li, L. Y., Yang, Y. J., Cao, J. B., et al., 2011. Statistical Backgrounds of Topside—Ionospheric Electron Density and Temperature and Variations during Geomagnetic Activity. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(10):2437—2444 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. H., Liu, C. H., Liu, J. Y., et al., 2010. Midlatitude Summer Nighttime Anomaly of the Ionospheric Electron Density Observed by FORMOSAT-3/COSMIC. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A3): 1—11. doi:10.1029/2009ja014084
- Lin, C. H., Liu, J. Y., Cheng, C. Z., et al., 2009. Three-Dimensional Ionospheric Electron Density Structure of the Weddell Sea Anomaly. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A2):A02312. doi:10.1029/2008ja013455
- Liu, L. B., Zhao, B. Q., Wan, W. X., et al., 2009. Seasonal Variations of the Ionospheric Electron Densities Retrieved from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate Mission Radio Occultation Measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A2):A02302. doi:10.1029/2008ja013819
- Ma, X. X., 2015. Study on the Distribution Characteristics and Seismic Response of Ionosphere Using COSMIC Occultation Data. *Recent Developments in World Seismology*, (4):47—48 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. X., Lin, Z., Chen, H. R., 2014. Analysis on Ionospheric Perturbation of TEC and NmF2 Based on GPS and COSMIC Data before and after the Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(8):2415—2422 (in Chinese with English abstract).
- Rishbeth, H., 1998. How the Thermospheric Circulation Affects the Ionospheric F2-Layer. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60(14):1385—1402. doi:10.1016/s1364—6826(98)00062—5
- Tulasi, R. S., Su, S. Y., Liu, C. H., 2009. FORMOSAT-3/COSMIC Observations of Seasonal and Longitudinal Variations of Equatorial Ionization Anomaly and Its Inter-hemispheric Asymmetry during the Solar Minimum Period. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A6):272—276. doi:10.1029/2008ja013880
- Yu, T., Wan, W. X., Liu, L. B., et al., 2006. Using IGS Data to Analyze the Global TEC Annual and Semiannual Variation. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(4):943—949 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭鹏, 洪振杰, 张大海, 2002. COSMIC 计划. *天文学进展*, 22(4):324—336.
- 李柳元, 杨英俊, 曹晋滨, 等, 2011. 顶部电离层电子密度和温度的统计背景及其地磁活动的变化. *地球物理学报*, 54(10):2437—2444.
- 马新欣, 2015. 基于 COSMIC 掩星数据的电离层分布特征及地震响应研究. *国际地震动态*, (4):47—48.
- 马新欣, 林湛, 陈化然, 等, 2014. 基于 GPS 和 COSMIC 数据分析汶川地震 TEC 和 NmF2 扰动. *地球物理学报*, 57(8):2415—2422.
- 余涛, 万卫星, 刘立波, 等, 2006. 利用 IGS 数据分析全球 TEC 的周年和半年变化特性. *地球物理学报*, 49(4):943—949.