

## COSMIC 掩星电子密度廓线的质量检核\*

徐晓华<sup>1,2</sup>, 李娟<sup>1</sup>, 罗佳<sup>1,3</sup>, 孙方方<sup>1</sup>

(1. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北武汉 430079;

3. 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北武汉 430079)

**摘要:**利用 COSMIC 掩星任务自 2010 年至 2014 年的电离层电子密度廓线, 使用只考虑廓线自身特性的 4 种参数进行质量检核, 并对廓线质量的时空分布进行分析。发现在廓线质量的空间分布上, 廓线不合格率在高纬地区最高, 其次是低纬地区, 在中纬地区最低, 这可能与电子密度分布在磁赤道附近存在赤道异常、两极地区的磁场强度最大有关。廓线质量的季节变化较明显, 在南、北半球, 冬、春两季的廓线不合格率均显著高于夏、秋两季。另外, 廓线质量具有一定昼夜分布特性, 不合格率白天明显较夜晚低, 且在晨昏分界线上变化较大。合格廓线的电子密度峰值和峰值高度分布在磁赤道附近明显高于其他区域, 呈现“双驼峰”现象。

**关键词:** COSMIC 掩星; 电子密度廓线; 质量检核; 时空分布

**中图分类号:** P413 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)05-054-06

## Quality check of the ionospheric density profiles from COSMIC radio occultation observations

XU Xiaohua<sup>1,2</sup>, LI Juan<sup>1</sup>, LUO Jia<sup>1,3</sup>, SUN Fangfang<sup>1</sup>

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China;

3. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** With the ionospheric electron density profiles derived from the COSMIC radio occultation mission during 2010 to 2014, the qualities of these profiles were checked comprehensively using four quality control parameters which consider only the profile's own characteristics. The spatial and temporal distributions of the qualities of the profiles were analyzed accordingly. It is found that the qualities of the profiles are the highest over the high-latitude regions, followed by the low-latitude regions and the lowest over the mid-latitude regions. This may be due to the existence of the equatorial anomaly of the electron density distribution near the magnetic equator. The seasonal variation of the qualities of the profiles is distinct, which shows a significantly higher rejection ratio in winter and spring than in summer and autumn over both of the two hemispheres. In addition, the rejection ratio of the profiles is significantly lower in daytime than in nighttime, and it has great changes occurring at twilight demarcations. The peak electron densities and the corresponding peak heights derived from the qualified profiles are significantly higher over magnetic equator than over other regions, which shows a “double hump” phenomenon.

**Key words:** COSMIC radio occultation; ionospheric electron density profile; quality check; spatial and temporal distribution

近年来, 各全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 无线电掩星任务的实施使得掩星资料在大气研究领域受到越来越多的关注。掩星技术利用低轨卫星上的接收机对 GNSS 卫星进行临边探测的资料, 获取中性大气层和电离层的物理参数廓线。对于电离层, 利用掩星信号的相位延迟和振幅, 结合卫星轨道信息, 得到沿信号传播路径的电子总量, 经 Abel 变换进而得到电子密度廓线<sup>[1-4]</sup>。反演算法是基于

电子密度球对称、信号传播路径为直线、卫星运行轨道近圆几个假设条件<sup>[4]</sup>, 实际情况与假设条件的不一致导致反演结果可能存在误差。由于太阳活动、电离层不规则体、地磁场变化<sup>[5]</sup>等因素影响, 掩星反演的部分电离层廓线可能出现剧烈扰动或者在 F2 层没有明显峰值的现象<sup>[6-7]</sup>, 不能正确地反映电离层的电子密度分布情况。

由美国和中国台湾联合实施的气象、电离层与气候星座观测系统 (Constellation Observing

\* 收稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41774033, 41774032)

作者简介: 徐晓华 (1976—), 女, 湖北利川人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: xhxu@sgg.whu.edu.cn;

罗佳 (通信作者), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, E-mail: jl原因@sgg.whu.edu.cn

System for Meteorology Ionosphere and Climate, COSMIC) 掩星任务于 2006 年正式运行。Guo 等<sup>[8]</sup>在对电离层等离子体厚度的研究中,首先对所使用的 COSMIC 电子密度廓线进行了质量检核,目的在于剔除噪声较大的廓线。Yang 等<sup>[7]</sup>和 Uma 等<sup>[9]</sup>在使用 COSMIC 掩星电离层产品分析电离层特征参数的变化之前,也对电子密度廓线进行了质量检核。马新欣等<sup>[6]</sup>对电离层分布特征和影响电子密度分布的主要因素进行了分析,为廓线质量检核方法提供了参考。黄智等<sup>[10]</sup>在对地磁赤道区的 COSMIC 掩星反演与国际参考电离层模型输出结果进行比较分析时,为了消除地磁活动和电离层中不规则体引起的电子密度廓线剧烈扰动,对掩星电子密度廓线也进行了质量检核。上述各项工作均侧重于掩星电离层廓线的应用,虽然进行了掩星廓线的质量检验,但采用的检验方法各有不同,且对廓线质量的时空分布特性并未进行深入讨论。

对掩星电离层廓线进行质量检核在方法上可利用其他独立观测数据(如垂测仪资料)或电离层模型为参照,也可纯粹利用掩星廓线自身特性进行,后者实用性更强。

## 1 数据来源

COSMIC 数据分析与管理中心(COSMIC Data Analysis and Archive Center, CDAAC)对 COSMIC 的观测数据进行处理,向全球用户免费提供不同等级的数据产品<sup>[11-13]</sup>。本文研究采用了 CDAAC 提供的 2010 年 1 月至 2014 年 12 月的 COSMIC 掩星电离层产品。

## 2 质量检验参数

由于各种因素的影响,典型意义上质量合格的掩星电子密度廓线在垂直方向上的分布具备如下特点:①自由电子的产生随高度的变化通常是均匀缓和的,所以电子密度随高度变化的廓线一般应是比较光滑的,但实际上由于观测仪器噪声以及 GPS 射线路径上电子密度不规则体<sup>[14]</sup>等的影响,掩星反演的电子密度廓线可能在垂直方向上存在较大波动甚至有明显失真的尖峰<sup>[7]</sup>;②根据电子产生的原因和机制,电子密度应该满足在特定峰值高度以下随着高度的增加,电子密度逐渐增大,在该峰值高度以上则随着高度的增加电子密度逐渐减小的变化规律<sup>[15]</sup>,但在数据分析中发现部分 COSMIC 掩星电子密度廓线产品可能违反此规律;③电子密度廓线的电子密度峰值高度

( $hmF2$ )也应具有一定的统计特性<sup>[6]</sup>。结合已有文献所采用的方法<sup>[7,9]</sup>,本文对 COSMIC 电离层掩星廓线的质量检验综合采用了电子密度峰值高度、电子密度廓线波动的平均偏差和噪声水平以及顶层电子密度梯度 4 种检验参数。

马新欣<sup>[16]</sup>对 2008—2011 年低纬地区的 COSMIC 掩星电子密度峰值高度数据进行分析,发现峰值高度变化范围为 200 ~ 400 km。考虑到所使用的电子密度廓线分布全球,本文将合格峰值高度区间设置为 200 ~ 450 km,将峰值高度在该范围之外的廓线标记为问题廓线。

针对电离层等离子体不均匀性、观测噪声所导致的电子密度廓线在垂直方向上存在较大波动甚至有明显失真的尖峰<sup>[7]</sup>等情况, Yang 等<sup>[7]</sup>和 Guo 等<sup>[8]</sup>分别定义了进行廓线质量检核的两个参数:平均偏差(Mean Deviation, MD)与噪声水平因子  $\Delta$ , 计算公式分别如式(1)和式(2)所示:

$$MD = \sum_i \frac{|n_e(i) - \bar{n}_e(i)|}{N\bar{n}_e(i)} \quad (1)$$

式中,  $N$  为一条廓线中电子密度采样的总数,  $n_e(i)$  和  $\bar{n}_e(i)$  分别是第  $i$  个采样点电子密度的反演值和由反演值经 9 点滑动平均滤波法得到的背景值:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [n_e(i) - \bar{n}_e(i)]^2}{k(NmF2)^2}} \quad (2)$$

式中,  $k$  为高度 300 km 以上的电子密度采样总数,  $n_e(i)$  是 300 km 以上第  $i$  个采样点的电子密度反演值,  $\bar{n}_e(i)$  是对应的 9 点平滑电子密度,  $NmF2$  是廓线的电子密度峰值。由式(1)、式(2)可知,廓线在垂直方向上波动越大,对应  $MD$  和  $\Delta$  的值也越大。本研究采用了与 Yang 等<sup>[7]</sup>和 Guo 等<sup>[8]</sup>相同的质量检核准则,同时考虑到部分廓线在电离层低层电子密度及其背景值出现负值而导致  $MD$  为负的情况,将  $MD$  值小于 0 或大于 1.5, 或  $\Delta$  大于 0.01 的电子密度廓线标记为问题廓线。

除了利用电子密度廓线波动状况的质量检核参数外,针对部分问题廓线违背了在峰值高度之上电子密度应当随着高度的增加而逐渐减小的规律,反而呈现出一种稳定或者正梯度变化<sup>[7,9]</sup>的情况, Yang 等<sup>[7]</sup>提出将 420 ~ 490 km 高度区间的顶层电子密度梯度作为对掩星电子密度廓线进行质量检核的控制参数。式(3)为顶层电子密度梯度的计算公式:

$$Gradient = \frac{dN}{dH} = \frac{n_e(i_1) - n_e(i_2)}{70 \text{ km}} \quad (3)$$

其中,  $n_e(i_1)$ 、 $n_e(i_2)$  分别是 490 km、420 km 高度

处的电子密度值。由式(3)得到的梯度值理论上应该是不大于0的值,可将0作为限值。但是考虑到垂向近似均匀分布的情况,应当取一个比0稍小的值作为限值,如 Yang 等<sup>[7]</sup>取  $-0.2 \times 10^5 \text{ m}^{-2}$ 。而本文考虑到计算的严谨性,将顶层电子密度梯度值大于  $-0.1 \times 10^5 \text{ m}^{-2}$  的廓线视为问题廓线。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不合格廓线个例及比例统计

利用上述4种质量检核参数,将峰值高度、平均偏差、噪声水平或顶层电子密度梯度不合理的廓线都认定为“不合格廓线”。图1(a)~(d)分别给出了利用这4种检核参数发现的问题廓线个例。各子图上横轴给出了该廓线对应的掩星事件ID号。其中图1(a)廓线峰值高度低于200 km;图1(b)廓线的电子密度在电离层低层出现了负

值,同时廓线在垂直方向上波动较大,平均偏差均值  $MD$  为  $-2.315$ ;图1(c)廓线在垂直方向上波动较大、存在大量噪声导致噪声水平参数  $\Delta$  大于0.01,达到0.03;图1(d)廓线在420~490 km高度区间的梯度大于  $-0.1 \times 10^5 \text{ m}^{-2}$ 。

进一步利用上述4种参数对2010—2014年所有COSMIC掩星电子密度廓线进行质量检核,得到每月利用各检核参数发现的不合格廓线数量以及合格廓线数量的分布情况,如图2所示。可以看到,由4种参数计算得到的不合格廓线数量有所差别,具体表现为利用噪声水平参数得到的不合格廓线数量明显高于其他参数,在一定程度上表明该参数对廓线质量的要求更严格;对于同一个参数,不同年份的不合格廓线数量较稳定,说明参数以及参数限值可靠。后续分析采用综合了4种参数进行质量检核的结果。

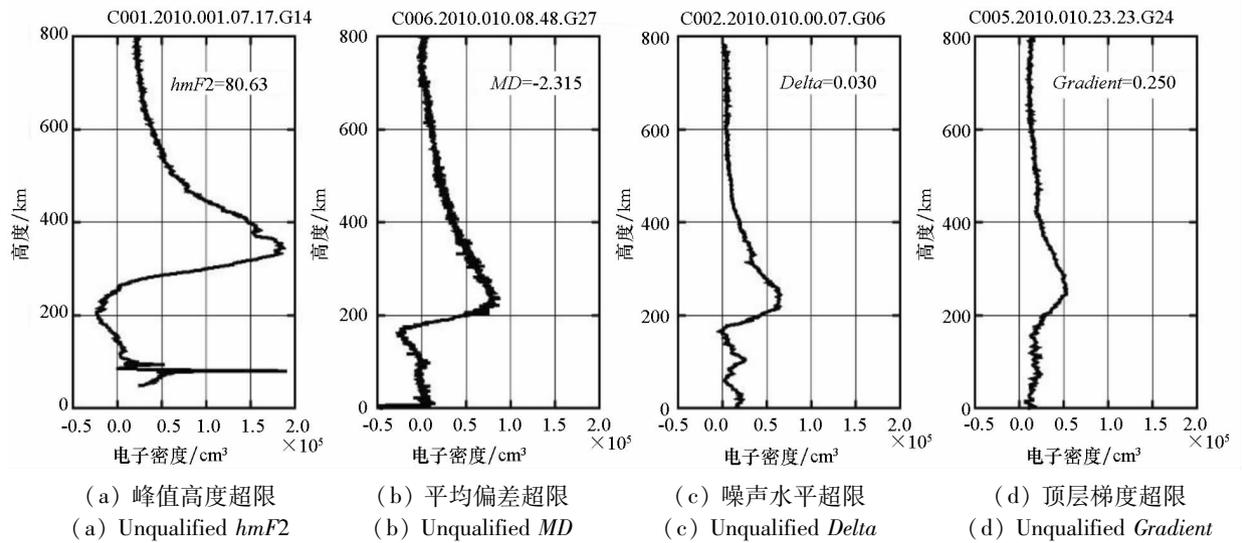


图1 不合格廓线个例

Fig. 1 Examples of questionable electron density profiles

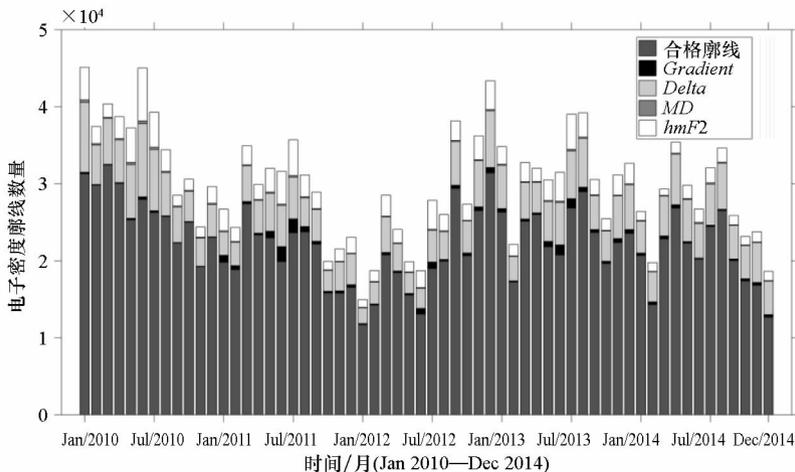
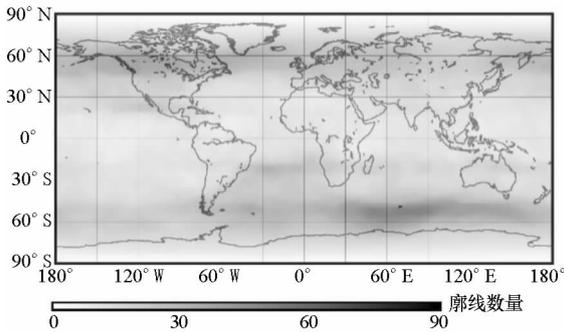


图2 2010—2014年各月COSMIC电子密度廓线质量检核结果

Fig. 2 Quality check results of the COSMIC electron density profiles in each month during 2010 to 2014

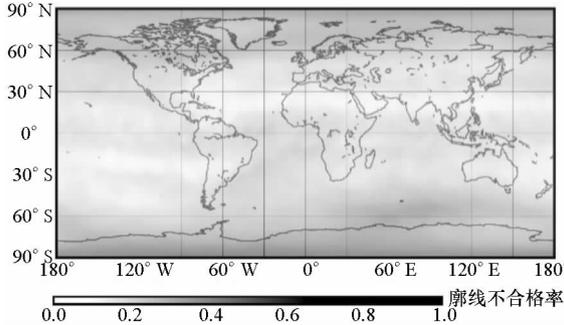
### 3.2 廓线质量的空间分布

图3(a)~(b)分别给出了2010—2014年COSMIC电子密度廓线数量以及不合格率的全球分布情况。由图3(a)可见,在南(北)纬 $80^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ 的高纬地区,廓线数量为全球最少,中纬地区最多,而低纬地区介于两者之间。图3(b)给出了2010—2014年COSMIC掩星电子密度廓线在同时使用密度峰值高度 $hmF2$ 、平均偏差 $MD$ 、噪声水平 $\Delta$ 以及顶层电子密度梯度 $Gradient$ 4种质量检核参数的情况下,得到的廓线不合格率在全球的分布情况。



(a) 廓线数量分布

(a) Distribution of the number of profiles



(b) 廓线不合格率分布

(b) Distribution of the total reject ratio of the profiles

图3 2010—2014年COSMIC电子密度廓线数量  
和不合格率的全球分布

Fig.3 Global distribution of COSMIC electron density  
profile number and the total reject ratio based on the  
four deletion criteria during the period from 2010 to 2014

由图3(b)可以看到,廓线不合格率的全球分布主要体现在纬向上的变化。不合格率在低纬和中纬的大部分地区都低于25%,靠近地磁赤道的区域甚至低于10%,这说明在这些区域掩星电子密度廓线的质量较好;而在高纬地区,不合格率在25%~50%之间变化,在极地部分区域达到60%甚至更高,这表明廓线质量在高纬地区总体相对较差。廓线质量随纬度升高而下降,廓线不合格率在随着纬度由中纬到高纬增加的变化过程中,

存在很明显的分界线,并且分界线的形状与地磁赤道形状接近。

高纬地区掩星电子密度廓线不合格率最大的可能原因是:一方面,COSMIC卫星的轨道特性决定了其所观测到的电离层掩星廓线在两极地区较少;另一方面,两极地区的地磁场最强,对无线电波信号的幅度、相位、强度等造成影响<sup>[15]</sup>,从而降低电离层电子密度廓线的反演精度。图3(b)显示低纬地区的廓线质量较好,因此可以基本认为造成电子密度峰值在地磁赤道附近呈现“双驼峰”现象<sup>[14]</sup>的因素没有影响到掩星反演的电子密度廓线质量。

### 3.3 廓线质量的季节分布

图4(a)~(d)给出了廓线不合格率在北半球春、夏、秋、冬(南半球秋、冬、春、夏)4个不同季节的全球分布。由图4(a)、图4(c)可见,在北(南)半球的春(秋)季和秋(春)季,廓线的不合格率在全球的大部分地区都低于25%,只有南、北两极的极小部分区域为50%左右,全球廓线的质量都比较好;图4(b)中南半球、图4(d)中北半球的高纬大部分区域廓线不合格率都高于50%,部分区域甚至达到80%,这表明在半球冬季高纬地区的廓线质量较差;图4(b)中北半球、图4(d)中南半球的低纬、中纬地区的不合格率分别低于图4(d)北半球、图4(b)中南半球的对应区域,表明在半球冬季低纬和中纬地区的廓线质量也比其他季节相应区域的廓线质量更差。南、北半球廓线质量的季节变化虽然存在轻微差异,但仍然具有较强的相似性。无论哪个半球,廓线质量的季节变化具体表现为:冬季最差并且全球分布变化最大,春季次之,夏季和秋季最好且全球分布变化较小、较均匀。

### 3.4 廓线质量的昼夜变化

太阳辐射强度大小影响电子密度大小及其垂直分布。白天,在太阳辐射作用下,电离层产生大量自由电子,其中有一部分被运输到质子层;夜间,质子层中的自由电子又重新被运输到电离层<sup>[15]</sup>。

图5是2010—2014年COSMIC掩星电子密度廓线不合格率的昼夜分布情况。可以看到,不合格率在当地时间7:00—17:00之间为10%左右,下午19:00至第二天凌晨5:00之间为35%左右,白天的廓线质量优于夜晚。这种昼夜差异可能来源于电离层中电子密度不规则体对无线电波信号的影响,通常称为电离层闪烁<sup>[15]</sup>,并且电离

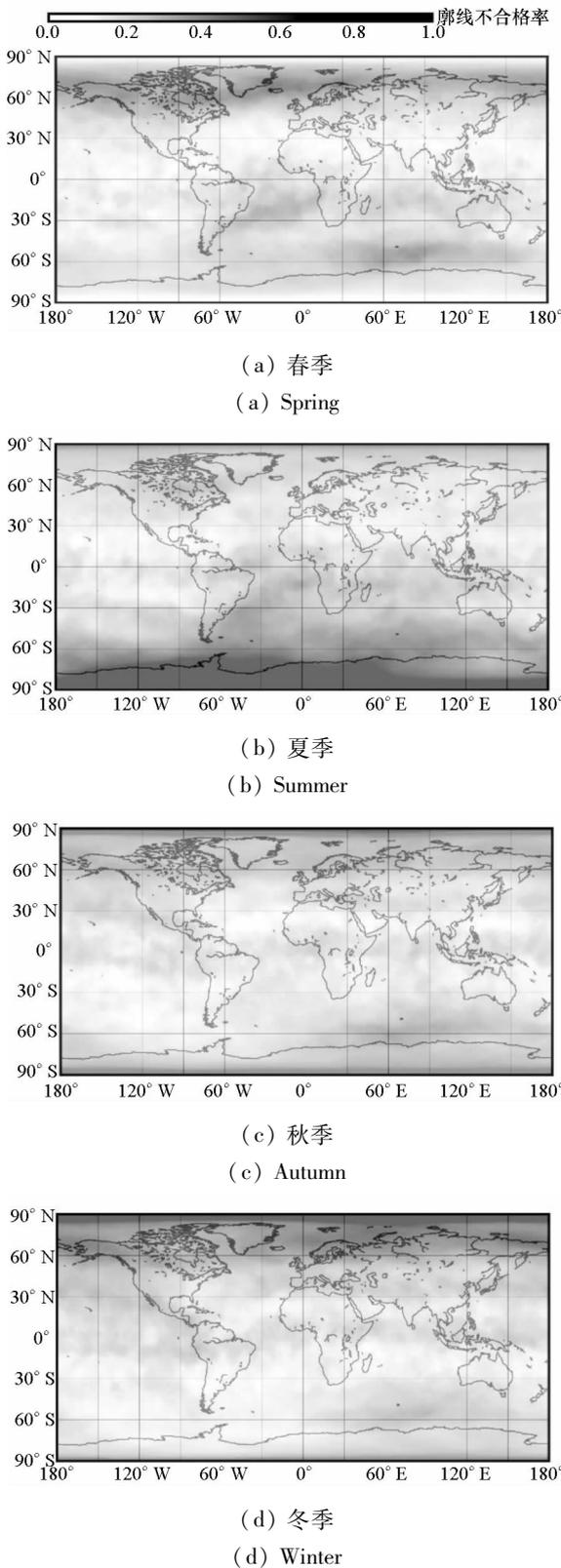


图 4 2010—2014 年 COSMIC 电子密度廓线在北半球春季、夏季、秋季、冬季的不合格率全球分布图

Fig. 4 Global distribution of the reject ratio of COSMIC electronic density profiles in north hemisphere spring, summer, autumn and winter during the period from 2010 to 2014

层闪烁事件主要发生在夜间至凌晨时段。不合格率的数值在白天、夜晚的主要时段都比较稳定,而在太阳升起和降落的 5:00—7:00、17:00—19:00 时间段内变化较大,这可能与电离层自由电子产生的方式有关,太阳升起时段自由电子产生方式由质子层输送转变为太阳辐射,太阳降落时段由太阳辐射转变为质子层输送<sup>[15]</sup>。

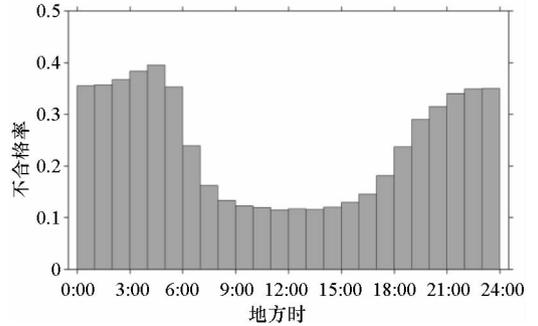


图 5 2010—2014 年 COSMIC 掩星电子密度廓线不合格率的地方时分布  
Fig. 5 Local time distribution of the reject ratio of COSMIC electronic density profiles during the period from 2010 to 2014

### 3.5 合格廓线的电离层特征参数分布特征

基于前述 4 种检核参数对 COSMIC 掩星电子密度廓线进行质量检核,剔除了不合格电子密度廓线后,利用通过了质量检核的合格廓线得到 2010—2014 电离层峰值高度与峰值密度的平均空间分布见图 6 所示。由该图可见,地磁赤道附近的电子密度峰值在  $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3} \sim 15 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$  范围内,而中高纬地区一般低于  $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 。电子密度峰值高度在地磁赤道附近高于 350 km,全球其他区域则在 200 ~ 350 km 的范围内。电子密度峰值以及对应的峰值高度都在地磁赤道附近呈现“双驼峰”现象<sup>[1]</sup>,地磁赤道附近的电子密度峰值以及峰值高度都明显高于其他区域。

## 4 结论

- 1) 廓线不合格率的空间分布情况表明,廓线在中低纬地区质量较好,随纬度增高廓线质量逐渐变差,高纬地区的质量最差。影响廓线不合格率纬向变化的可能因素包括高纬地区掩星事件数比中低纬地区少、地球磁场的变化等。
- 2) 廓线不合格率在不同季节的全球分布情况反映了无论在北半球还是南半球,廓线质量在冬季最差,春季次之,夏秋季最好。
- 3) 廓线质量的昼夜分布情况显示白天的廓

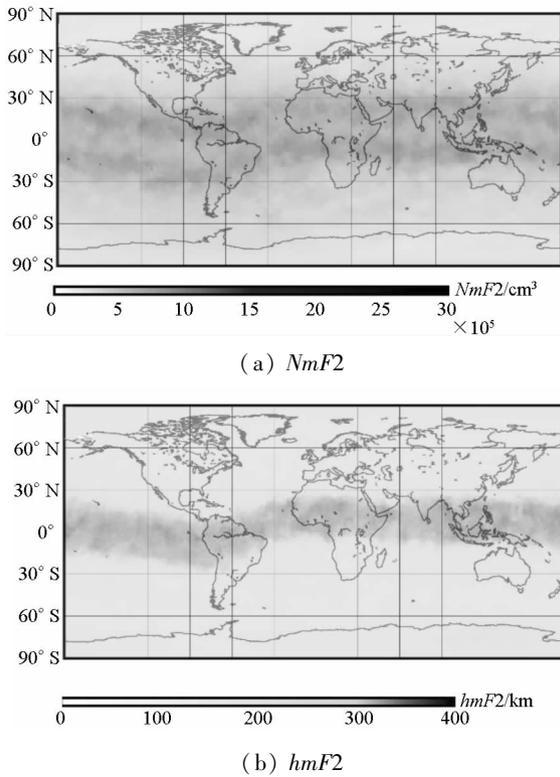


图6 2010—2014年合格COSMIC掩星电子密度廓线的峰值参数全球分布

Fig. 6 Global distributions of peak parameters from COSMIC electron density profiles during 2010 to 2014

线质量比晚上好,廓线不合格率的变化主要发生在凌晨和黄昏时段,这可能是由电离层中自由电子来源不同造成的。

4) 利用合格廓线得到各年电离层特征参数的全球分布,显示峰值密度与峰值高度在磁赤道附近明显高于其他区域,呈现“双驼峰”现象。

## 参考文献 (References)

- Lei J H, Syndergaard S, Burns A G, et al. [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(A7): 601 - 623.
- Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C, et al. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere[J]. *Radio Science*, 1999, 34(4): 949 - 966.
- 林剑, 吴云. Abel 电离层掩星反演方法及误差分析[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1070 - 1076.  
LIN Jian, WU Yun. Abel ionospheric inversion technique and its error analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1070 - 1076. (in Chinese)
- 王虎, 刘志强, 白贵霞, 等. 利用 COSMIC 掩星数据监测电离层的异常变化[J]. *空间科学学报*, 2014, 34(1): 46 - 52.  
WANG Hu, LIU Zhiqiang, BAI Guixia, et al. Monitoring of ionospheric anomaly using COSMIC occultation measurements[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(1): 46 - 52. (in Chinese)
- 孙伟. 基于地基 GPS 和掩星技术的区域电离层特征研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.  
SUN Wei. Study on regional ionospheric characteristics based on technique of ground-based GPS and radio occultation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese)
- 马新欣, 金红林, 李大虎. 基于 COSMIC 掩星数据分析中低纬度地区电子密度分布变化[J]. *地震地磁观测与研究*, 2013, 34(z3): 104 - 109.  
MA Xinxin, JIN Honglin, LI Dahu. Analysis of the distribution variation of electron density at mid and low latitude based on COSMIC occultation data[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2013, 34(z3): 104 - 109. (in Chinese)
- Yang K F, Chu Y H, Su C L, et al. An examination of FORMOSAT - 3/COSMIC ionospheric electron density profile; data quality criteria and comparisons with the IRI model[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2009, 20(1): 193 - 206.
- Alexander P, de la Torre A, Hierro R, et al. Assessment of precision in ionospheric electron density profiles retrieved by GPS radio occultations [J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(11): 2249 - 2258.
- Schreiner W, Rocken C, Sokolovskiy S, et al. Estimates of the precision of GPS radio occultations from the COSMIC/FORMOSAT - 3 mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L04808.
- Yue X A, Schreiner W S, Kuo Y H. A feasibility study of the radio occultation electron density retrieval aided by a global ionospheric data assimilation model[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2012, 117(A8): A08301.
- Guo P, Xu X, Zhang G X. Analysis of the ionospheric equivalent slab thickness based on ground-based GPS/TEC and GPS/COSMIC RO measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, 73(7/8): 839 - 846.
- Uma G, Brahmanandam P S, Chu Y H. A long-term study on the deletion criterion of questionable electron density profiles caused by ionospheric irregularities-COSMIC radio occultation technique[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(12): 2452 - 2463.
- 黄智, 袁洪. 磁赤道地区 2007—2013 年 COSMIC 掩星反演和国际参考电离层模型输出结果分析[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(7): 2333 - 2343.  
HUANG Zhi, YUAN Hong. An analysis of ionospheric characteristic parameters retrieved from COSMIC and IRI at Jicamarca during the period of 2007—2013 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(7): 2333 - 2343. (in Chinese)
- 李柳元, 杨俊英, 曹晋滨, 等. 顶部电离层电子密度和温度的统计背景及其地磁活动变化[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(10): 2437 - 2444.  
LI Liuyuan, YANG Junying, CAO Jinbin, et al. Statistical backgrounds of topside-ionospheric electron density and temperature and their variations during geomagnetic activity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(10): 2437 - 2444. (in Chinese)
- 周彩霞. 中低纬电离层不规则体及闪烁特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.  
ZHOU Caixia. Characteristics of mid-and low-latitude ionospheric irregularity and scintillation[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- 马新欣. 基于 COSMIC 掩星数据的电离层分布特征及地震响应研究[J]. *国际地震动态*, 2015(3): 47 - 48.  
MA Xinxin. Study on the distribution characteristics and seismic response of ionosphere using COSMIC occultation data[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2015(3): 47 - 48. (in Chinese)