

2014—2016年FY-3C与COSMIC掩星电离层特征参数的比较*

罗佳^{1,2},王涵¹,徐晓华^{1,3}

1. 武汉大学测绘学院,湖北武汉 430079;
2. 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北武汉 430079;
3. 地球空间信息技术协同创新中心,湖北武汉 430079)

摘要:利用由FY-3C和COSMIC两个全球导航卫星系统无线电掩星任务提供的2014—2016共3年的电离层电子密度廓线,基于时间间隔7.5 min、经纬度间隔2.5°的时空匹配窗口,对两个掩星任务的电离层峰值密度(NmF2)和峰值高度(hmF2)进行了比较。结果表明:由两个任务得到的特征参数相关性良好,各年之间相关性水平基本稳定,其中各年NmF2和hmF2相关系数的平均值分别为0.87和0.75;FY-3C的特征参数相对于COSMIC的偏差很小,各年NmF2的绝对偏差均值和相对偏差均值分别不超过 $\pm 0.25 \times 10^5 \text{ e/cm}^3$ 和 $\pm 15.0\%$,hmF2的绝对偏差均值和相对偏差均值分别不超过 $\pm 7.00 \text{ km}$ 和 $\pm 1.80\%$ 。此外,由两个任务得到的特征参数在空间上均表现出赤道及低纬地区数值较高且呈“条带状”分布的特点,且两个任务都监测到了2016年相对于2014年和2015年NmF2和hmF2均存在显著下降的现象。

关键词:风云3C;COSMIC;电离层特征参数;相关系数;偏差

中图分类号:P413 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2018)04-181-06

Comparison of ionospheric characteristic parameters retrieved from FY-3C and COSMIC radio occultation during 2014 to 2016

LUO Jia^{1,2}, WANG Han¹, XU Xiaohua^{1,3}

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China;
3. Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China)

Abstract: The ionospheric EDPs (electron density profiles) obtained during 2014 to 2016 from two GNSS (global navigation satellite system) RO (radio occultation) missions, the FY-3C mission and the COSMIC mission, were used to compare the ionospheric peak density NmF2 and the ionospheric peak height hmF2 of two missions under the collocation criterion with the time window of 7.5 min and the space window of 2.5°. The results show that the peak parameters derived from the two RO missions are highly correlated, with the yearly average correlation coefficient of NmF2 and hmF2 being 0.87 and 0.75, respectively. The biases of the peak parameters derived from the two RO missions are very small, with the absolute and the relative bias of NmF2 and hmF2 being less than $\pm 0.25 \times 10^5 \text{ e/cm}^3$ and $\pm 15.0\%$, and $\pm 7.00 \text{ km}$ and $\pm 1.80\%$, respectively. In addition, the strip-shaped spatial distributions of the two ionospheric characteristic parameters from both of the two RO missions show that the values of NmF2 and hmF2 are larger in the areas of the equator and low latitudes than in other regions, and that the values of NmF2 and hmF2 decline significantly in 2016 compared with 2014 and 2015.

Key words: FY-3C; COSMIC; ionospheric characteristic parameters; correlation coefficient; bias

风云3C(FY-3C)是中国风云三号系列卫星的5颗气象卫星之一,其上搭载了全球导航卫星系统掩星探测器(Global Navigation satellite system Occultation Sounder, GNOS)。该卫星于2013年9月23日世界时间3时7分在中国山西太原卫星基地成功发射,进入高度836 km、倾角98.75°的轨道。除全球定位系统(Global Positioning

System, GPS)外,FY-3C/GNOS还能追踪北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite System, BDS)的掩星信号^[1]。GNOS由中国科学院空间科学与应用研究中心研制,14个GPS接收机通道中6个用于掩星探测,其余用于定位;8个BDS接收机通道中4个用于掩星探测,其余用于定位^[2]。中国气象局国家卫星中心(National Satellite

* 收稿日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41774032,41774033)

作者简介:罗佳(1975—),男,贵州贵定人,副教授,博士,博士生导师,E-mail:jluo@sgg.whu.edu.cn

Meteorological Centre, NSMC) 负责 FY-3C 探测数据的处理和归档, 提供事后的电离层电子密度廓线 (Electron Density Profiles, EDPs)。

自 FY-3C 开始提供电离层产品以来, 国内外一些学者对其进行了相关应用研究。杨晶晶等^[3]利用 2014 年 6 月、8 月、12 月及 2015 年 1 月的 FY-3C 掩星资料进行电离层突发 E 层的研究, 并与 COSMIC 的监测结果进行了比较, 发现二者结果一致。Mao 等^[1]选用 2013 年第 274 日—365 日共计 92 天的 FY-3C 掩星数据, 将其反演的电离层电子密度廓线与相同时间段内的 COSMIC 掩星反演结果进行了比较, 发现二者在廓线形态、扰动程度、峰值位置等方面具有较高相似性。但是, 目前鲜有文献针对更长时间跨度内 FY-3C 和 COSMIC 的电离层掩星资料进行比较研究。针对这一现状, 本文利用由两个掩星任务提供的 2014—2016 年连续 3 年的电离层资料, 对 FY-3C 与 COSMIC 掩星电离层产品的相关性和偏差水平进行了深入分析。所得结果对于 FY-3C 掩星产品的质量评估与应用具有参考价值。

1 数据来源

所使用的 FY-3C/GNOS 掩星资料由 NSMC

提供, 具体为该任务的 level2 电子密度廓线数据; COSMIC 掩星资料由 COSMIC 数据分析与管理中心 (COSMIC Data Analysis and Archive Center, CDAAC) 提供, 具体为该任务的 level2 数据 ionPrf。这两类电离层产品均采用 netcdf 二进制存储格式, 但在信息组织结构上仍有一定区别, 具体情况对比如表 1 所示。

在本文所使用的 2014—2016 年共计 3 年的掩星资料中, FY-3C 掩星资料累计含有 150 850 条廓线, COSMIC 掩星资料累计含有 710 966 条廓线。

2 数据处理方法

在对 FY-3C 与 COSMIC 的电离层产品进行对比分析之前, 首先需要基于一定的控制指标对 NSMC 和 CDAAC 分别提供的两类数据资料进行质量检核。这是因为这两个掩星数据处理中心在进行电离层廓线反演时均采用了基于 Abel 变换的反演方法, 其反演结果会受到卫星轨道为圆轨道、电子密度呈球对称等模型假设误差的影响, 最终得到的电离层资料中可能存在异常和粗差^[4]。参考已有文献, 本文采用了平均相对偏差及全局和局部电子密度梯度^[5]、噪声因子^[6]、峰值密度

表 1 FY-3C 与 COSMIC 掩星电离层产品文档格式对比

Tab. 1 Comparison of the file formats of ionospheric products from FY-3C and COSMIC radio occultation

内容	COSMIC	FY-3C
文档名称	前缀为 ionPrf, 文件名包含时间信息	前缀为 FY3C, 文件名包含时间信息
维度信息	存储于 Dimension, 包含: MSL_alt: 对应经纬度、电子密度、海平面高序列	存储于 Dimension, 包含: dim_lev1b: 对应总电子含量、相位延迟序列等 dim_lev2a: 对应电子密度、海平面高序列等
时间信息	存储于 Global attribute, 包含: year: 年, int 类型 month: 月, int 类型 day: 日, int 类型 hour: 时, int 类型 minute: 分, int 类型 second: 秒, double 类型	存储于 Global attribute, 包含: Year: 年, string 类型 Month: 月, string 类型 Day: 日, string 类型 Hour: 时, string 类型 Minute: 分, string 类型 Second: 秒, string 类型 Doy: 年积日, string 类型
空间信息	存储于 Data, 包含: Geo_Lat: 纬度序列 Geo_Lon: 经度序列	存储于 Global attribute, 包含: Lat: 经度, string 类型 Lon: 纬度, string 类型
参数信息	存储于 Data, 包含: MSL_alt: 海平面高度序列 ELEC_dens: 电子密度序列	存储于 Data, 包含: MSL_alt: 海平面高度序列 elec_Dens: 电子密度序列

和峰值高度^[7]等几个质量控制指标,相关控制指标的定义和阈值设置参考相应文献。最终通过质量检核的FY-3C和COSMIC电子密度廓线分别为94 716条和558 266条。

在完成质量检核的基础上,再进行两个掩星任务数据产品的比较。由于不同掩星任务所观测到的掩星事件的时空分布与导航卫星和该任务低轨卫星的轨道相关,在比较时首先需要确定一定的时空匹配准则,在该准则下得到两个掩星任务的电离层廓线对。在本文数据处理中,该时空匹配准则被量化为以FY-3C掩星事件位置为中心的空间窗口的大小和以该掩星事件发生时刻为中心的时间窗口的大小。落入该空间和时间窗口的COSMIC掩星事件与该FY-3C掩星事件即构成了参与对比分析的廓线对。参考已有文献中对不同来源的电离层廓线进行对比时所使用的时空窗口,本文采用时间间隔限值7.5 min、经纬度间隔限值2.5°作为匹配窗口^[8]。以该窗口为时空匹配准则,提取出FY-3C和COSMIC的掩星电离层电子密度廓线对后,即可对两个掩星任务的电离层产品进行对比。本文的对比对象为由两个任务的电离层廓线分别提取的电离层峰值密度(NmF2)与峰值高度(hmF2),主要研究了由两个掩星任务分别提供的这两类电离层特征参数之间的相关性和偏差。其中相关性以式(1)所示的相关系数描述,偏差参数则由式(2)、式(3)计算^[9]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^C \cdot P_i^F) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^C \sum_{i=1}^n P_i^F}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (P_i^C)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n P_i^C \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (P_i^F)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n P_i^F \right)^2 \right]}} \quad (1)$$

$$\overline{\Delta P_{ab}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i^F - P_i^C) \quad (2)$$

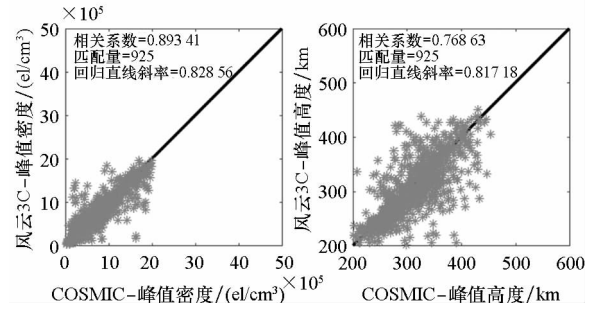
$$\overline{\Delta P_{re}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i^F - P_i^C}{P_i^C} \right) \quad (3)$$

其中: n 为在指定时空窗口下匹配到的廓线对数量; $P_i^C (i=1,2,\dots,n)$ 和 $P_i^F (i=1,2,\dots,n)$ 分别为由匹配到的廓线对数据集提取的COSMIC和FY-3C掩星电离层峰值密度或者峰值高度的数据序列; R 为由两个掩星任务提取的该电离层特征参数序列的相关系数; $\overline{\Delta P_{ab}}$ 和 $\overline{\Delta P_{re}}$ 分别为FY-3C相对于COSMIC的绝对偏差均值和相对偏差均值。

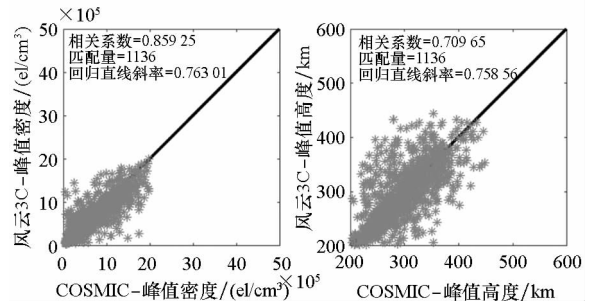
3 结果与分析

图1给出了由两个掩星任务得到的电离层特征参数的相关性分析结果。图1(a)为2014年掩

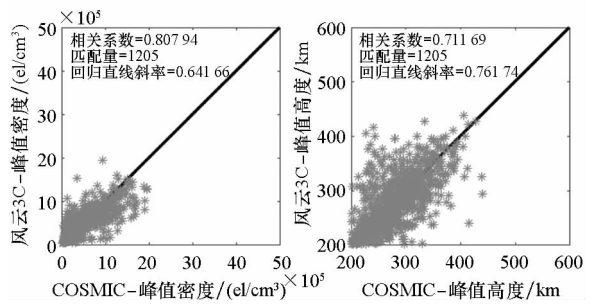
星资料的相关性分析,共匹配到925组数据,峰值密度相关系数约为0.89,峰值高度相关系数约为0.77。图1(b)为2015年掩星资料的相关性分析,共匹配到1136组数据,峰值密度相关系数约



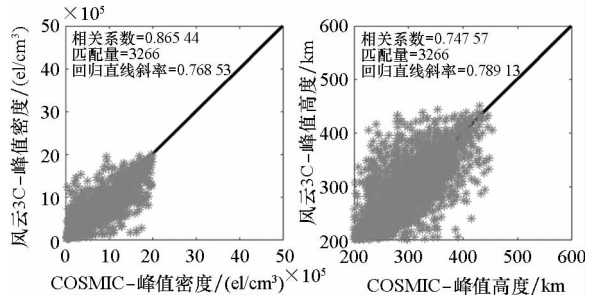
(a) 2014年
(a) The year of 2014



(b) 2015年
(b) The year of 2015



(c) 2016年
(c) The year of 2016



(d) 2014—2016年
(d) The year of 2014—2016

图1 FY-3C掩星与COSMIC掩星峰值密度和峰值高度相关性分析结果

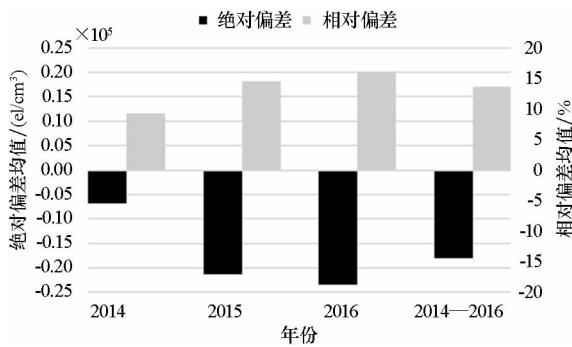
Fig. 1 Correlation analysis between the NmF2 and hmF2 derived from FY-3C and COSMIC radio occultation

为 0.86, 峰值高度相关系数约为 0.71, 稍低于 2014 年的计算结果, 但仍呈现出显著的相关性。图 1(c) 为 2016 年掩星资料的相关性分析结果, 共匹配到 1205 组数据, 峰值密度相关系数约为 0.81, 峰值高度相关系数约为 0.71, 与 2015 年计算结果基本持平。图 1(d) 将 2014—2016 年 3 年掩星资料进行汇总, 对所有匹配数据对整体进行相关性分析, 共匹配到 3266 组数据, 峰值密度相关系数约为 0.87, 峰值高度相关系数约为 0.75, 反映了这 3 年 FY-3C 掩星资料与 COSMIC 掩星资料相关性的平均水平。综合图 1(a)~(d), 在时空匹配窗口(7.5 min, 2.5°, 2.5°)下, 由 COSMIC 和 FY-3C 掩星得到的电离层特征参数的回归直线斜率接近于 1, 表明由两个任务得到的电离层特征参数数值水平基本相同。由 FY-3C 掩星资料得到的电离层特征参数与由 COSMIC 掩星资料得到的相应参数在各年和 3 年总体的相关系数大小表明二者之间具有很强的相关性。

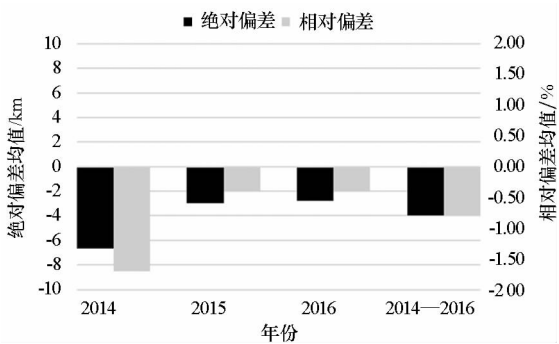
图 2 给出了 2014—2016 年 FY-3C 相对于 COSMIC 电离层特征参数的绝对偏差均值和相对偏差均值。由该图可知, 各年 FY-3C 掩星反演的电离层特征参数与 COSMIC 掩星反演结果之间

的偏差均值很小, 表明二者之间具有很好的一致性。汇总 3 年数据进行平均, 峰值密度的绝对偏差均值为 $-0.18 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$, 相对偏差均值为 +13.6%; 峰值高度的绝对偏差均值为 -3.96 km , 相对偏差均值为 -0.80% 。在 2014—2016 年间, 各年峰值密度绝对偏差均值不超过 $\pm 0.25 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$, 相对偏差均值不超过 $\pm 15.0\%$; 峰值高度绝对偏差均值不超过 $\pm 7.00 \text{ km}$, 相对偏差均值不超过 $\pm 1.80\%$ 。两类掩星资料的反演结果非常接近。

图 3 对由 FY-3C 与 COSMIC 掩星分别得到的电离层峰值密度在各年的全球分布进行了对比。由该图可见, 由 FY-3C 与 COSMIC 所获取的掩星资料均表现出以下特征: 峰值密度在赤道及低纬度地区数值较大, 尤其是赤道地区, 且呈现明显的“条带状”分布, 即沿磁赤道两侧对称分布, 形成狭长带状区域。与 2016 年相比, 由 FY-3C 得到的 2014 年和 2015 年的峰值密度整体数值水平偏高, 而 COSMIC 的掩星资料也同样呈现这一特

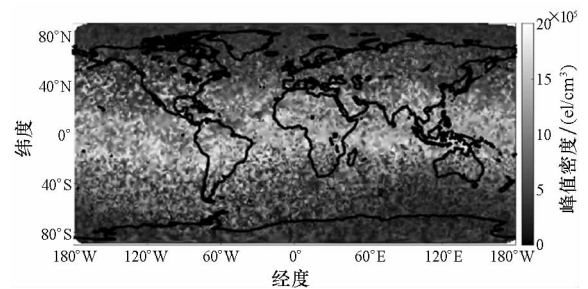


(a) 峰值密度偏差均值
(a) Mean bias of NmF2

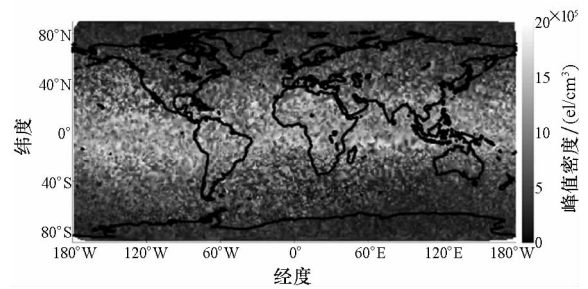


(b) 峰值高度偏差均值
(b) Mean bias of hmf2

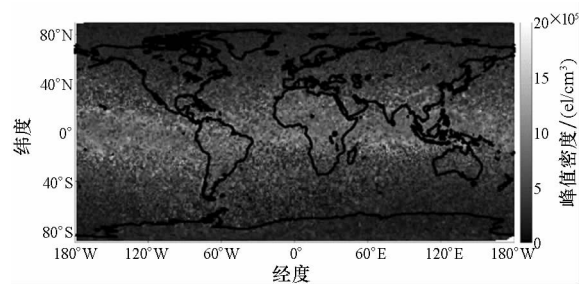
图 2 FY-3C 掩星相对于 COSMIC 掩星的偏差均值
Fig. 2 Means of the bias derived from FY-3C radio occultation relative to COSMIC radio occultation



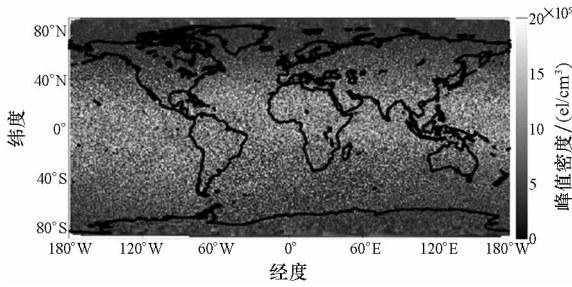
(a) 2014 年风云 3C 峰值密度
(a) NmF2 derived from FY-3C during 2014



(b) 2015 年风云 3C 峰值密度
(b) NmF2 derived from FY-3C during 2015

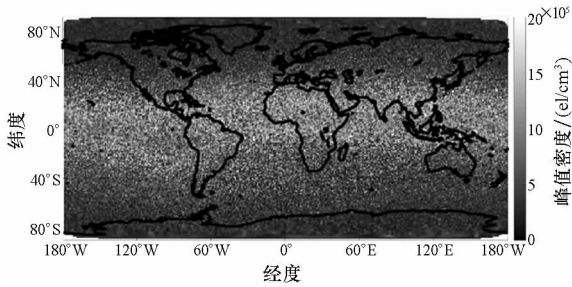


(c) 2016 年风云 3C 峰值密度
(c) NmF2 derived from FY-3C during 2016



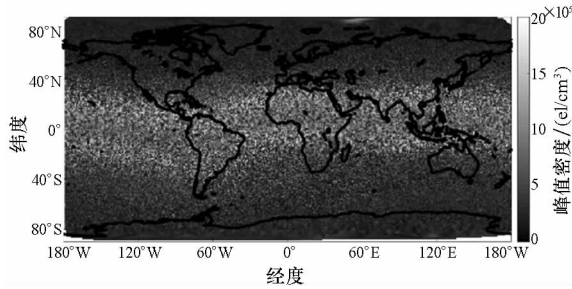
(d) 2014年COSMIC峰值密度

(d) NmF2 derived from COSMIC during 2014



(e) 2015年COSMIC峰值密度

(e) NmF2 derived from COSMIC during 2015



(f) 2016年COSMIC峰值密度

(f) NmF2 derived from COSMIC during 2016

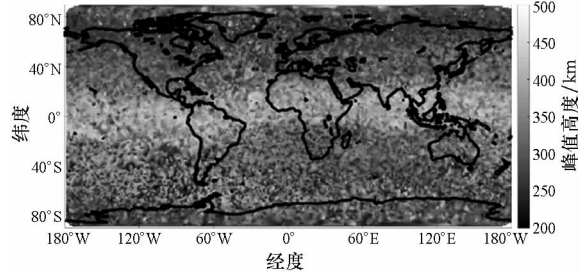
图3 FY-3C掩星与COSMIC掩星峰值密度在全球的分布情况

Fig. 3 Global distributions of NmF2 derived from FY-3C and COSMIC radio occultation

点,即在2016年峰值密度的数值水平整体出现了较为明显的下降。综上所述,由FY-3C掩星资料得到的电离层峰值密度与由COSMIC掩星得到的相应参数之间具有相似的空间分布形态,且二者刻画了相同的年际变化特征。

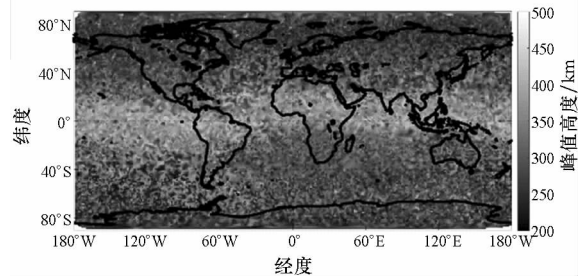
图4对由FY-3C掩星和COSMIC掩星得到的峰值高度在各年的全球分布进行了对比。图4呈现的空间分布特征与图3中所得结论基本一致,即FY-3C反演的峰值高度与COSMIC反演结果具有相似的全局空间分布,且二者均捕捉到了峰值高度在2016年明显的下降趋势。对图3与图4进行比较可以发现,与峰值密度分布相比,由两个掩星任务得到的峰值高度在赤道及低纬地区的“条带状”特征更为显著。另外,在磁赤道附近地区,FY-3C获取的特征参数比由COSMIC得

到的相应参数高。这可能是由于赤道电离层异常对掩星电离层反演结果有一定影响,而NSMC对



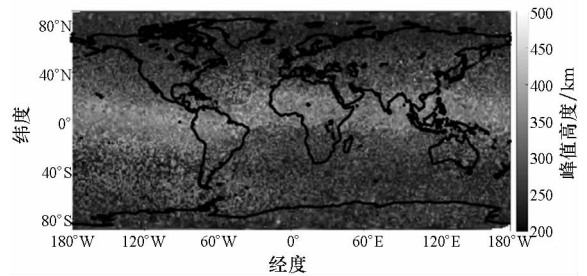
(a) 2014年风云3C峰值高度

(a) hmF2 derived from FY-3C during 2014



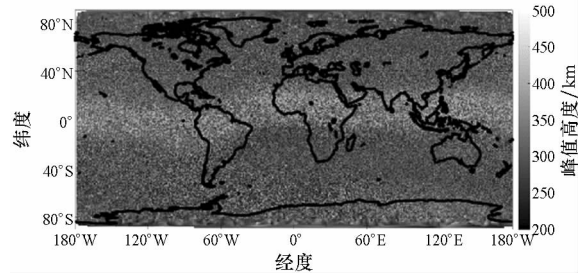
(b) 2015年风云3C峰值高度

(b) hmF2 derived from FY-3C during 2015



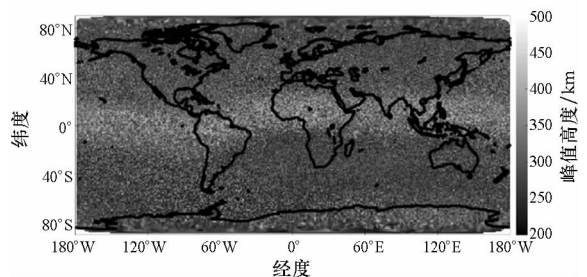
(c) 2016年风云3C峰值高度

(c) hmF2 derived from FY-3C during 2016



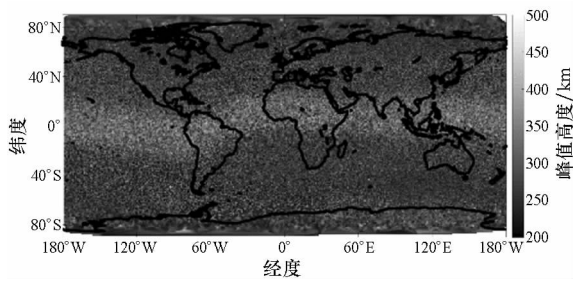
(d) 2014年COSMIC峰值高度

(d) hmF2 derived from COSMIC during 2014



(e) 2015年COSMIC峰值高度

(e) hmF2 derived from COSMIC during 2015



(f) 2016 年 COSMIC 峰值高度

(f) hmF2 derived from COSMIC during 2016

图 4 FY-3C 掩星与 COSMIC 掩星峰值高度在全球的分布情况

Fig. 4 Global distributions of hmF2 derived from FY-3C and COSMIC radio occultation

FY-3C 数据和 CDAAC 对 COSMIC 数据的反演算法在具体处理策略上有一定差异,具体原因有待进一步深入研究。

4 结论

采用 2014—2016 共计 3 年的 FY-3C 和 COSMIC 掩星的电离层电子密度廓线,对由两个掩星任务得到的峰值密度和峰值高度两类电离层特征参数进行了比较,研究了由两个任务得到的相同参数之间的相关性和偏差水平,并对由两个任务分别得到的电离层特征参数的全球分布进行了对比分析,得出了以下结论:

1) 由两个掩星任务分别得到的相同电离层特征参数之间具有显著相关性,各年 NmF2 相关系数的均值为 0.87, hmF2 相关系数的均值为 0.75。

2) 由两个掩星任务得到的相同电离层特征参数的偏差很小:对于 NmF2, FY-3C 相对于 COSMIC 的各年绝对偏差均值不超过 $\pm 0.25 \times 10^5 \text{ eL/cm}^3$, 相对偏差均值不超过 $\pm 15.0\%$; 对于 hmF2, FY-3C 相对于 COSMIC 的各年绝对偏差均值不超过 $\pm 7.00 \text{ km}$, 相对偏差均值不超过 $\pm 1.80\%$ 。

3) 由两个掩星任务得到的相同电离层特征

参数具有相似的空间分布特征:在赤道及低纬地区, NmF2 和 hmF2 均较高且呈“条带状”分布;两个任务都监测到了 2016 年相对于 2014 年和 2015 年 NmF2 和 hmF2 均存在显著下降的现象。

参考文献 (References)

- [1] Mao T, Sun L F, Yang G L, et al. First ionospheric radio-occultation measurements from GNSS occultation sounder on the Chinese Feng-Yun 3C satellite [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(9): 5044-5053.
- [2] 曾添, 隋立芬, 贾小林, 等. 风云 3C 增强北斗定轨试验结果与分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(7): 824-833. ZENG Tian, SUI Lifen, JIA Xiaolin, et al. Results and analysis of BDS precise orbit determination with the enhancement of Fengyun-3C [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(7): 824-833. (in Chinese)
- [3] 杨晶晶, 黄江, 徐杰, 等. 基于 FY-3C 掩星数据偶发 E 层的研究[J]. 空间科学学报, 2016, 36(3): 305-311. YANG Jingjing, HUANG Jiang, XU Jie, et al. Study of sporadic E layers based on occultation data observed by FY-3C satellite [J]. Chinese Journal of Space Science, 2016, 36(3): 305-311. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Guo P, Xu X, Zhang G X. Analysis of the ionospheric equivalent slab thickness based on ground-based GPS-TEC and GPS/COSMIC RO measurement [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, 73(7/8): 839-846.
- [7] 王栖溪, 方涵先, 牛俊. 基于 COSMIC 资料分析电离层 F 层不规则体结构 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(2): 419-425. WANG Xixi, FANG Hanxian, NIU Jun. Analysis of ionospheric irregularities in F layer based on COSMIC data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(2): 419-425. (in Chinese).
- [8] Ely C V, Batista I S, Abdu M A. Radio occultation electron density profiles from the FORMOSAT-3/COSMIC satellites over the Brazilian region: a comparison with Digisonde data [J]. Advances in Space Research, 2012, 49(11): 1553-1562.
- [9] Sun B, Reale A, Seidel D J, et al. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 115(D23): D23104.