



利用 IGRA2 探空数据和 COSMIC 掩星资料对 FY-3C 掩星中性大气产品进行质量分析

徐晓华^{1,2} 朱洲宗¹ 罗佳^{1,3}

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:根据 IGRA2 无线电探空数据和气象、电离层和气候卫星联合观测系统 (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate, COSMIC) 掩星资料,对 2015—2017 年包含折射率、温度和比湿廓线在内的 FY-3C 掩星中性大气产品进行质量分析。结果表明:FY-3C 掩星折射率廓线 25 km 以下整体无系统偏差,相对偏差标准差 $\leq 5\%$;温度廓线存在系统负偏差,标准差 ≥ 1.5 K;比湿廓线越趋地表质量越低,5 km 下标准差 ≤ 1.2 g/kg。总体而言,FY-3C 掩星数据质量较好,在 2015—2017 年间逐年提高,但在近地面和 25 km 以上有待进一步提高。对 2017 年产品的进一步分析表明:就季节而言,折射率廓线和温度廓线质量均在冬季最差,比湿廓线质量在夏季最差;就纬度带而言,折射率廓线在低纬度带质量最差,温度廓线质量的分纬度带比较结果在不同高度范围存在差异,比湿廓线在低纬度带质量明显低于中高纬度带;此外,FY-3C 掩星大气产品数据质量随昼夜和海陆变化也存在一定差异。

关键词: FY-3C;掩星;中性大气产品;质量分析

中图分类号: P228

文献标志码: A

19 世纪 60 年代,文献[1]提出了利用无线电掩星 (radio occultation, RO) 技术探测地球大气的思想。1995 年美国大学大气研究中心主持开展了首个 GPS 掩星任务——全球定位系统/气象学 (Global Positioning System/Meteorology, GPS/MET)。之后,挑战性小卫星有效载荷 (Challenging Minisatellite Payload, CHAMP), 科学应用卫星-C (Scientific Application Satellite-C, SAC-C), 气象、电离层和气候卫星联合观测系统 (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate, COSMIC) 和气象业务卫星 (meteorological operational satellite, MetOp) 等掩星任务相继实施。文献[2]评估了 CHAMP 和 SAC-C 的掩星产品精度,发现 5~25 km 折射率相对精度达到 0.3%~0.5%;文献[3]以探空数据为参考,对 2007—2010 年全球 COSMIC 掩星中性大气产品进行精度分析,发现 COSMIC 资料

可作为其他大气资料的检核基准^[3]。掩星资料具有高垂直分辨率、全球覆盖、高精度、全天候和无需定标等优点,可弥补常规大气探测手段的不足,对数值天气预报及气候变化研究有重要应用价值^[4]。

2013 年发射的风云 3C (FY-3C) 气象卫星是中国第二代极轨气象卫星 FY3 系列的首颗业务星。其星载全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 接收机可实现对 GPS 和北斗二代导航卫星的掩星观测,是中国首颗进行 GNSS RO 观测的气象卫星,其掩星产品质量对该系列后续卫星及中国其他掩星计划的实施有重要参考价值^[5]。

目前,国际上关于 COSMIC、CHAMP 等掩星任务的产品验证已有大量成果^[2-3],但针对 FY-3C 掩星产品进行质量分析的文献很少。文献[5]以常规无线电探空资料为参考,对 2013 年

收稿日期:2018-12-19

项目资助:国家自然科学基金(41774033, 41774032);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB733302);国家重点研发计划(2018YFC1503502)。

第一作者:徐晓华,教授,主要从事 GNSS 气象学的研究。xhxu@sgg.whu.edu.cn

通讯作者:罗佳,副教授。jluo@sgg.whu.edu.cn

10月至11月的FY-3C中性大气产品精度进行了检核,认为FY-3C掩星产品的精度基本达到预定目标;此后又以ERA-Interim再分析资料为参考,对该年11月至12月的FY-3C中性大气产品进行检核,得出FY-3C和COSMIC、GRACE等已有RO任务的数据验证结果一致的结论^[6]。在上述有限的FY-3C掩星中性大气产品的验证工作中,所使用的都是产品正式发布之前短时间段内的数据。虽对产品精度进行了检验,但并未对精度特征进行分析。本文分别以IGRA2探空资料和COSMIC掩星资料为参照,对2015—2017年3a的FY-3C掩星折射率、温度及比湿等中性大气产品的精度进行分析,并进一步对精度随季节、纬度带、昼夜和海陆分布的变化进行了讨论。

1 数据和方法

1.1 数据介绍

国家卫星气象中心发布了2014年6月以来的FY-3C掩星大气产品(<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/DataView.aspx>),其中中性大气产品包括折射率、密度、温度及低层大气比湿廓线等全球数据产品,其垂直高度可达到40~60 km,不同廓线产品垂直分辨率在150~1 000 m之间。由于大气密度和折射率成一定比例关系^[5],故本文仅对折射率进行分析。为了对各年的数据质量进行比较,本文使用了2015—2017年共3a的数据产品。

本文的分析验证采用了两类参照数据,第一类是无线电探空数据。本文采用的是美国国家气候数据中心整合的一套高质量探空数据集——全球无线电探空数据集(Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA)自2014年更新后的IGRA2版本(<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/>),其较之前的版本增加了衍生数据集IGRA2/Drived,提供了露点温度、压强、水汽压等参数推算出的折射率数据。由于探空气球放飞高度有限,IGRA2在30 km以上的观测资料很少,故以IGRA2资料为参照时,主要讨论FY-3C掩星产品在0~30 km高度区间的质量。第二类参照数据是COSMIC掩星中性大气产品。本文采用的是该产品中的wetPrf廓线,其垂直范围为0~40 km,分辨率为100 m。

由于IGRA2和COSMIC产品不直接提供比湿数据,故在对FY-3C掩星比湿廓线进行质量分析之前,将该两类参照数据提供的水汽压参数转换为比湿参数:

$$q = \frac{\epsilon e}{p - 0.378e} \quad (1)$$

式中, q 为比湿,单位为g/kg; e 为水汽压,单位为hPa; p 为大气压强,单位为hPa; ϵ 为常量,其值为622。

1.2 数据匹配

掩星事件全球全天分布,而探空站点位置固定,且只有通用协调时(universal time coordinated, UTC) 00时和12时两个时刻的观测数据。在进行对比分析之前,需将FY-3C掩星大气参数廓线分别与IGRA2探空廓线和COSMIC掩星廓线在时间和空间上进行匹配。本文采用观测时间差限值为 ± 1 h,水平距离限值为200 km的时空匹配窗口;并在垂直方向上采用气象统计分析中常用的三次样条插值将各参数插值到相同高度层^[7]。以2015年为例,将FY-3C掩星分别与IGRA2和COSMIC掩星大气折射率廓线进行匹配后,各得到2 312、3 026对匹配样本,其空间分布如图1所示。

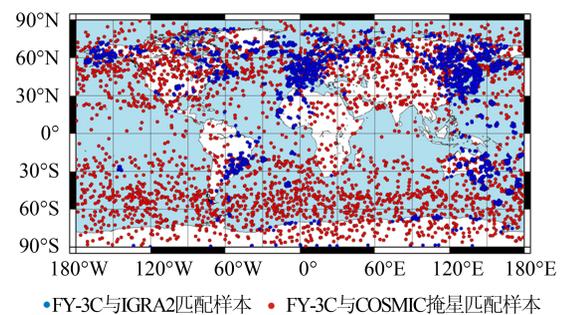


图1 2015年折射率廓线匹配样本的全球分布
Fig. 1 Global Distribution of Refractivity Profile Matching Samples During 2015

图1表明FY-3C掩星与IGRA2的匹配样本的空间分布取决于探空站点的空间分布,北半球中纬度地区样本数最多;而FY-3C掩星和COSMIC掩星的匹配样本集中在中、高纬度带,这是由FY-3C和COSMIC卫星的轨道特征决定的^[6]。

1.3 精度评定方法

获得匹配廓线对后,采用气象统计分析中常用的平均偏差、偏差标准差、平均相对偏差、相对偏差标准差等质量评定参数^[8-10]对FY-3C掩星的折射率、温度、比湿廓线分别进行质量评定。各参数定义如下。

用 X_i 表示待评估数据, X_i^0 表示评估参照数据, $i(i=1,2,\dots,n)$ 表示第 i 对匹配样本, n 表示样本总数,则 X_i 的偏差 ΔX_i 和相对偏差 $R_{\Delta X}^i$ 分别为:

$$\Delta X_i = X_i - X_i^0 \quad (2)$$

$$R_{\Delta X}^i = \frac{X_i - X_i^0}{X_i^0}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

平均偏差 $\overline{\Delta X}$ 、偏差标准差 $\sigma_{\Delta X}$ 、平均相对偏差 $\overline{R_{\Delta X}}$ 、相对偏差标准差 $\sigma_{R_{\Delta X}}$ 分别由式(4)~(7)定义:

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (4)$$

$$\sigma_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2} \quad (5)$$

$$\overline{R_{\Delta X}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\Delta X}^i \quad (6)$$

$$\sigma_{R_{\Delta X}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{\Delta X}^i - \overline{R_{\Delta X}})^2} \quad (7)$$

本文对折射率廓线质量用平均相对偏差和相对偏差标准差来评定,对温度廓线和比湿廓线质量用平均偏差和偏差标准差来评定。

1.4 质量控制

虽然 FY-3C 数据处理中心对其产品进行了质量控制,但仍存在一定粗差廓线^[5]。为避免它们对质量分析结果的影响,需从上述匹配样本中剔除这类廓线。本文参考文献[2],对于折射率廓线,如果相对误差大于10%的高度层数超过总高度层数的20%,则将该廓线对剔除;对于温度廓线,采用统计检验最常用的均值显著性分析方法确定质量合格的廓线对;对于比湿廓线,则删除平均相对误差超出一90%~900%范围的廓线对。此外,进一步对各类廓线的各高度层差异做统计分析,以 3σ 为限剔除超限高度层的数据^[6]。最终得到折射率匹配样本剔除率为6%~17%,温度匹配样本剔除率约5%,比湿匹配样本剔除率在10%左右。

2 质量评定结果

2.1 折射率廓线的质量评定

图2给出了2015—2017年各年FY-3C掩星与IGRA2和COSMIC掩星的折射率廓线 N 的对比结果。由图2(a)~2(c)可见,以IGRA2探空资料为参照,从2015年到2017年FY-3C掩星折射率的质量在不断提高,平均相对偏差越来越稳定,相对偏差标准差逐年减小。图2(d)~2(f)显示,2015—2017年FY-3C掩星相对于COSMIC掩星的折射率精度不断提高,这与FY-3C掩星和IGRA2的对比结果是一致的。由图2(f)可见,在整个0~40 km高度层FY-3C掩星相对于COS-

MIC掩星的折射率平均相对偏差绝对值 $\leq 0.2\%$,相对偏差标准差 $\leq 1.5\%$,表明FY-3C掩星的折射率廓线相对于COSMIC掩星没有系统性偏差。FY-3C掩星和COSMIC掩星折射率对比符合最好的高度区间为5~25 km,相对偏差标准差约1%,优于FY-3C掩星和IGRA2的对比结果。这与两个掩星任务的折射率参数反演机制相同有关。由于COSMIC卫星逐渐老化,近年来所提供的廓线数逐渐减少,因此FY-3C掩星和COSMIC掩星的匹配样本数比FY-3C掩星和IGRA2的少,但不存在探空资料由于探测高度有限而导致的高层匹配样本数迅速减小的情况。

2.2 温度廓线的质量评定

图3是2015—2017年各年FY-3C掩星和IGRA2及COSMIC掩星的温度廓线 T 的对比结果。由图3(a)~3(c)可见,2015和2016年FY-3C掩星相对于IGRA2的温度偏差绝对值整体上 ≤ 1 K,15~20 km高度内为微弱正偏差,其他高度范围内温度偏差皆为负,25 km以上温度负偏差更明显;2017年,FY-3C掩星相对于IGRA2温度偏差绝对值整体上 ≤ 0.5 K,各高度层均为负。故从2015到2017年,FY-3C相对于IGRA2的温度偏差不断稳定,且为负;而温度偏差标准差不断减小(2015年最大达3.0 K,2016年为2.7 K,2017年为2.5 K)。图3(c)表明,2017年FY-3C掩星相对于IGRA2的温度标准差在5~20 km约1.5 K,20 km以上增大到约2.2 K,这可能是由于热噪声、电离层残差等因素的综合影响^[11-12]。另一方面,近地层温度标准差也渐增,这和FY-3C掩星与IGRA2的折射率对比结果一致,体现了温度和折射率产品质量的相关性。图3(d)~3(f)表明,20 km以下FY-3C温度相对于COSMIC无系统偏差,温度标准差在2 K内;20 km以上,FY-3C温度相对于COSMIC存在随高度增加越来越明显的负偏差(2015年偏差最大达到-6.3 K,2016年达到-5.6 K,2017年达到-4.7 K),相应温度偏差标准差也随高度增加而逐渐增大(2015—2017年标准差最大分别为6.9 K、5.0 K、4.5 K)。FY-3C温度与COSMIC的符合程度逐年提高,这和FY-3C与IGRA2的温度对比结果一致。但与折射率对比结果不同,FY-3C掩星相对于COSMIC的温度标准差比FY-3C相对于IGRA2的更大,其原因是温度产品的质量不仅和折射率产品质量相关,还和在一维变分同化过程中采用的背景场有关,FY-3C掩星和COSMIC采用了不同背景场^[5]。

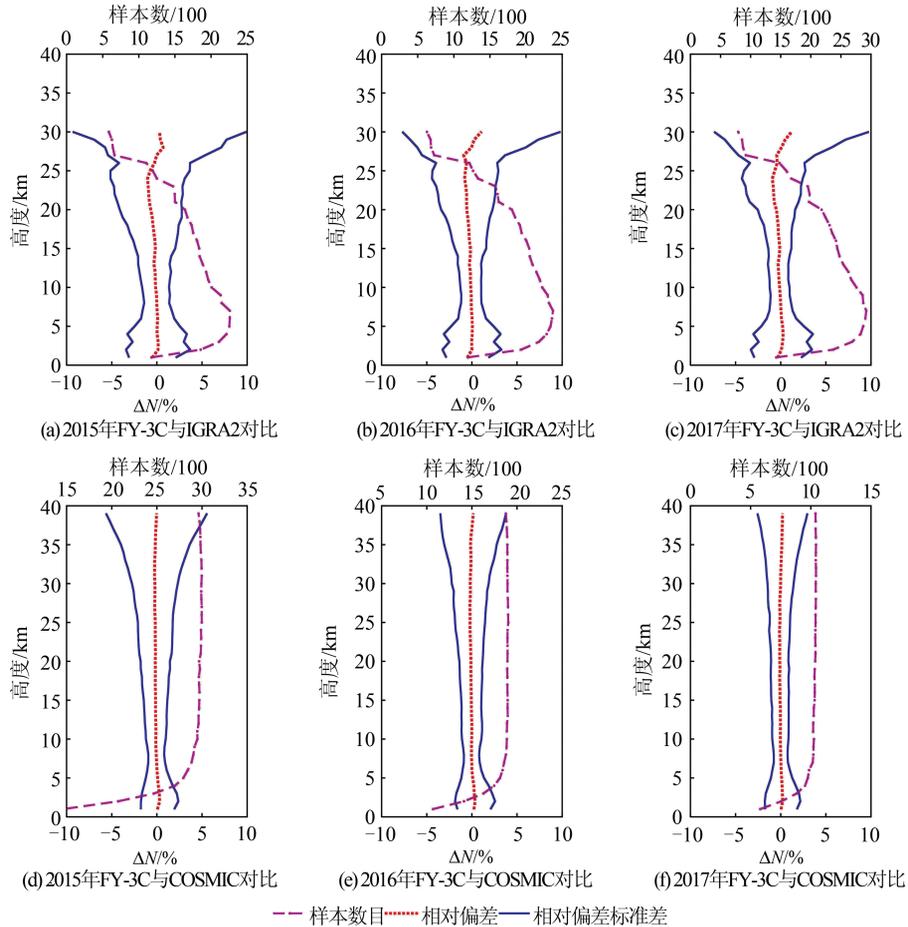


图 2 2015—2017 年折射率廓线对比结果

Fig. 2 Comparison of Refractivity Profiles During 2015—2017

2.3 比湿廓线的质量评定

图 4 是 2015—2017 年各年 FY-3C 掩星与 IGRA2 和 COSMIC 掩星的比湿廓线 q 的对比结果。由于水汽主要集中在 10 km 以下^[5],故图 4 仅给出 0~10 km 的对比结果。

图 4(a)~4(c),显示从 2015—2017 年 FY-3C 相对于 IGRA2 的比湿偏差和标准差几乎没有变化,且越趋地面, FY-3C 掩星相对于 IGRA2 的比湿偏差和标准差越大。6 km 以下, FY-3C 掩星存在负的比湿偏差,近地面达到 -0.4 g/kg,比湿标准差为 $0.5\sim 1.2$ g/kg,这和文献 [13] 给出的 METOP 掩星的比湿廓线在 5 km 以下达 $0.25\sim 1.0$ g/kg 的精度相当;而 6 km 以上, FY-3C 掩星相对于 IGRA2 比湿偏差接近 0,标准差 ≤ 0.5 g/kg。由图 4(d)~4(f)可见, FY-3C 掩星和 IGRA2 的比湿廓线对比结果一致, FY-3C 掩星相对于 COSMIC 的比湿偏差和标准差在这 3 a 也无明显变化,在近地表取得最大值。6 km 以下, FY-3C 相对于 COSMIC 掩星的比湿存在 $0.05\sim 0.25$ g/kg 的正偏差,比湿标准差为 $0.2\sim 1.0$ g/kg;而 6 km

以上,二者比湿偏差 ≤ 0.05 g/kg,标准差 ≤ 0.15 g/kg。故 FY-3C 掩星比湿廓线精度在 2015—2017 年无明显变化,越接近地表,比湿质量越低。FY-3C 掩星与 COSMIC 掩星的比湿符合程度比其与 IGRA2 探空资料的更好。

3 质量特征分析

由 §2 分析可见,2017 年 FY-3C 掩星大气产品精度最好,故本节对 2017 年 FY-3C 掩星大气产品的质量随季节、纬度带、昼夜及海陆变化的特征进行讨论。

3.1 不同季节的对比

按照北半球的 3 月—5 月,6 月—8 月,9 月—11 月和 12、1、2 月和南半球的 9 月—11 月,12、1、2 月,3 月—5 月和 6 月—8 月分别定义春、夏、秋、冬四季,将 2017 年 FY-3C 掩星分别与 IGRA2 及 COSMIC 掩星资料匹配得到的折射率 N 、温度 T 和比湿 q 的廓线按季节进行分组比较,结果如图 5 所示。各分图中实线和虚线分别代表平均相对偏差和相对偏差标准差。

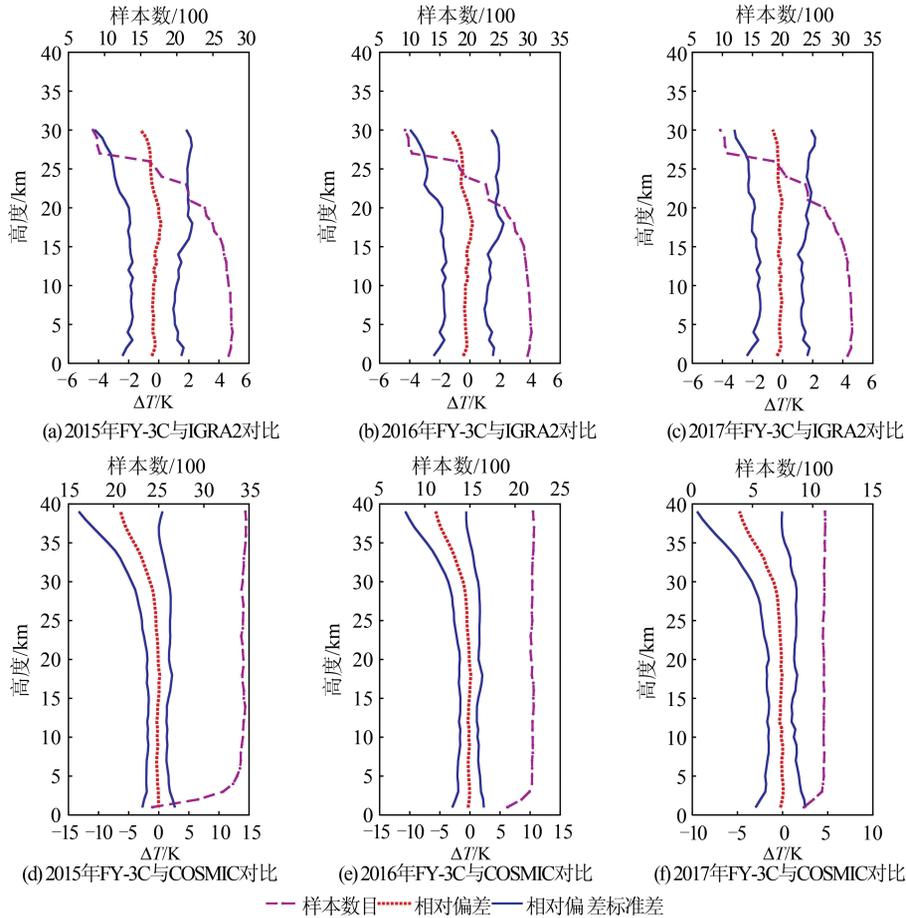


图3 2015—2017年温度廓线对比结果

Fig. 3 Comparison of Temperature Profiles During 2015—2017

从图5(a)可见,在5~20 km区间,FY-3C掩星相对于IGRA2的折射率平均相对偏差和相对偏差标准差随季节变化不明显,在25 km以上,FY-3C掩星折射率在秋季有明显正偏差(2.8%),夏季有明显负偏差(-3.0%),春季有较小正偏差(1.0%),冬季无明显系统性偏差;夏季相对标准差最小,冬季最高。5 km以下,夏、秋折射率有较小正偏差,春秋两季折射率相对标准差介于冬夏之间。故FY-3C掩星与IGRA2在冬季的折射率一致性最好,但相对标准差比其他三季稍大。而图5(d)表明,10 km以上,FY-3C掩星折射率相对于COSMIC掩星在夏季有明显负偏差;25 km以上,冬季折射率相对标准差最大。图5(b)表明,在5~20 km,FY-3C掩星相对于IGRA2的温度平均偏差在不同季节相差不到0.5 K,标准差在冬季最大。在20 km以上,除了夏季温度偏差接近于0,其他三季均为负,其中秋季最大,约1.2 K。图5(e)则表明,在10~25 km区间,FY-3C掩星相对于COSMIC掩星的温度偏差在四季无显著差异,25 km以上,温度负偏差在秋季最大;15 km以

上,FY-3C掩星相对于COSMIC掩星的温度标准差在冬季最大。由图5(c)、5(f)可以看出,6 km以下,FY-3C掩星四季的比湿相对于IGRA2都有越趋近地面越明显的负偏差,夏季负偏差最大(-0.75 g/kg),其他三季则和年平均偏差相当;在近地面到10 km,夏季比湿标准差远大于其他三季,达到1.7 g/kg;FY-3C掩星比湿相对于COSMIC掩星,比湿偏差在秋季最大,春季最小,整体上比湿标准差依次按冬、春、秋、夏递增。

3.2 不同纬度带的对比

为进一步分析FY-3C掩星大气产品在不同纬度带的质量特征,定义低、中、高3个不同纬度带为:低纬度带(30°N~30°S)、中纬度带(30°N~60°N,30°S~60°S)以及高纬度带(60°N~90°N,60°S~90°S)。如图1所示,由于FY-3C掩星和IGRA2探空资料的匹配样本主要分布在北半球,为避免因此导致的统计误差,本节只给出FY-3C掩星和COSMIC掩星的对比结果,如图6所示。各图中实线和虚线分别代表平均相对偏差和相对偏差标准差。

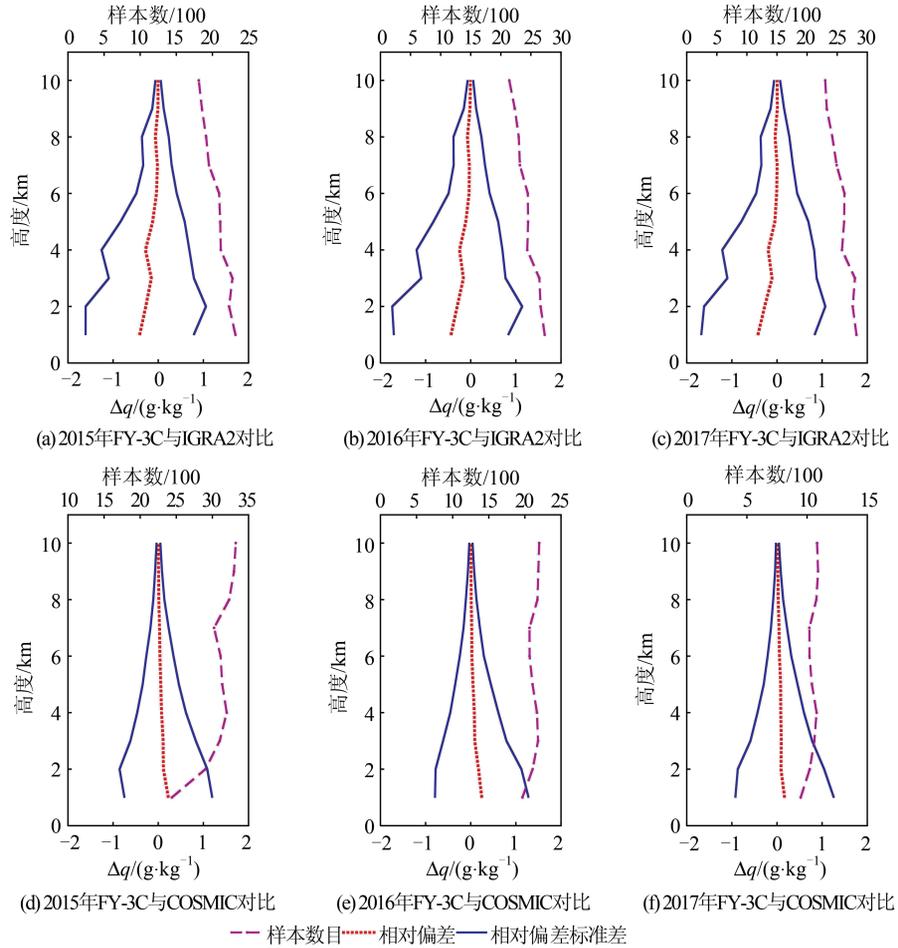


图 4 2015—2017 年比湿廓线对比结果

Fig. 4 Comparison of Specific Humidity Profiles During 2015—2017

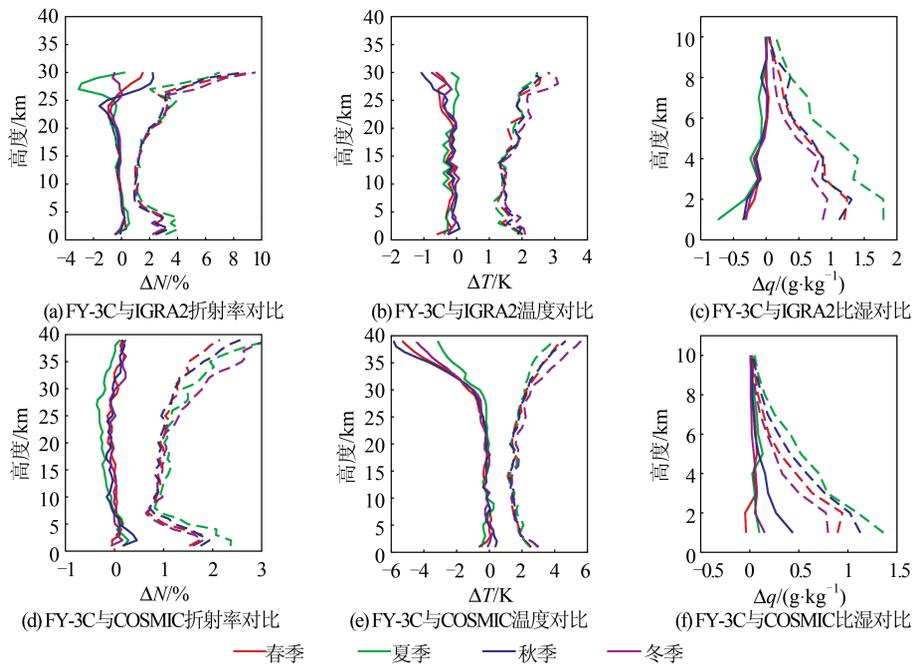


图 5 2017 年 FY-3C 掩星相对于 IGRA2 和 COSMIC 掩星大气产品的分季节比较

Fig. 5 Statistical Comparisons of Atmospheric Products Between FY-3C RO and IGRA2 and Between FY-3C RO and COSMIC RO During 4 Seasons of the Year 2017

由图6(a)可见, FY-3C相对于COSMIC掩星的折射率平均相对偏差随高度的变化在中、高纬度带要比低纬度带变化幅度小, 且折射率相对偏差在低纬度带最显著, 尤其是在10 km以下, 折射率正偏差最大达到1.2%。在10 km以上, 低、中纬度带折射率相对偏差的标准差比高纬度高; 在10 km以下, 低纬度带折射率标准差增大到4%。由图6(b)可见, 在10~25 km区间, 温度偏差在不同纬度带无明显差异; 25 km以上, 不同纬度带温度都表现出越往高层越明显的负偏差, 且高纬度带温度负偏差最大; 10 km以下, 高纬度带温度有较

小的正偏差, 低、中纬度带温度为负偏差。15 km以下, 低纬度温度标准差最小(0.9~2.1 K), 中、高纬度带温度标准差相近; 15~35 km内, 不同纬度带温度标准差略有不同; 35 km以上, 温度标准差从低纬到高纬依次增大。由图6(c)可见, 7 km以下, 低纬度带比湿有明显正偏差, 比湿偏差达到0.8 g/kg; 中纬度比湿偏差接近于0; 4 km以下, 高纬带比湿有较小正偏差。10 km至近地层, 比湿标准差在中纬度带最小(≤ 0.5 g/kg), 低纬度带最大(≤ -1.8 g/kg), 高纬度带居中(≤ 1.0 g/kg), 这与10 km以下折射率的比较结果一致。

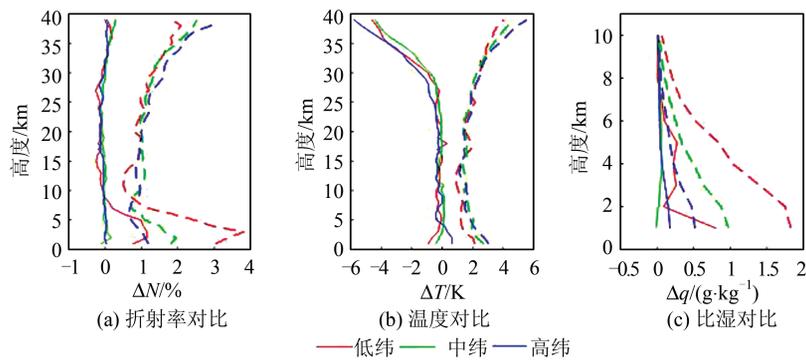


图6 2017年FY-3C相对于COSMIC掩星大气产品分纬度带的比较

Fig. 6 Comparisons of Atmospheric Products Between FY-3C RO and COSMIC RO at Different Latitude Bands During 2017

3.3 昼夜对比

FY-3C掩星的折射率 N 、温度 T 、比湿 q 相对于IGRA2和COSMIC掩星资料在白天和夜间(昼夜通过太阳高度角区分)的对比情况如图7所示。各分图中实线和虚线分别代表平均相对偏差和相对偏差标准差。从图7(a)、7(d)可见, 无论是与COSMIC掩星还是与IGRA2对比, 在5~25 km高度区间, FY-3C掩星白天的折射率偏差绝对值比晚上更小, 而在5 km以下和25 km以上则相反; FY-3C掩星折射率标准差在白天和晚上则无明显差异。图7(b)、7(e)表明, 相对于IGRA2, FY-3C掩星温度廓线在白天存在约 -0.5 K的负偏差, 夜间温度偏差接近0; 而FY-3C掩星相对于COSMIC掩星的温度廓线偏差在白天和夜间无明显区别。整体而言, FY-3C掩星的温度廓线标准差在白天比夜间整体上偏小。图7(c)、7(f)表明, 相对于IGRA2, FY-3C掩星比湿在夜间存在明显负偏差, 在白天5 km以上偏差接近0, 5 km以下有显著负偏差; 而相对于COSMIC掩星, FY-3C掩星的比湿在夜间和白天均呈现正偏差。FY-3C掩星比湿标准差的昼夜差异不大, 都在

0~1.5 g/kg范围内。

3.4 海陆对比

图8给出了FY-3C掩星的折射率 N 、温度 T 、比湿 q 分别与IGRA2和COSMIC掩星资料在海洋和陆地的对比。各分图中实线和虚线分别代表平均相对偏差和相对偏差标准差。如图8(a)~8(c)所示, 相对于IGRA2探空资料, 除了5 km以下和15 km以上, 陆地地区折射率相对偏差绝对值更小, FY-3C掩星折射率相对偏差和相对标准差在陆地和海洋区域整体无明显差异; 温度比较结果在海陆地区差异较明显, 陆地温度偏差在0 K附近波动, 而海洋地区FY-3C温度有约 -0.5 K的负偏差, 温度标准差廓线却表明海洋温度标准差比陆地小; FY-3C比湿廓线质量在陆地比海洋区域更好。由图8(d)~8(f)可见, 相较于COSMIC, FY-3C掩星折射率在陆地存在较小负偏差, 在海洋存在较小正偏差; FY-3C温度偏差和标准差无明显海陆差异; 3 km以下, FY-3C掩星比湿偏差在海域小于陆地, 而比湿标准差总体上无明显海陆差异。

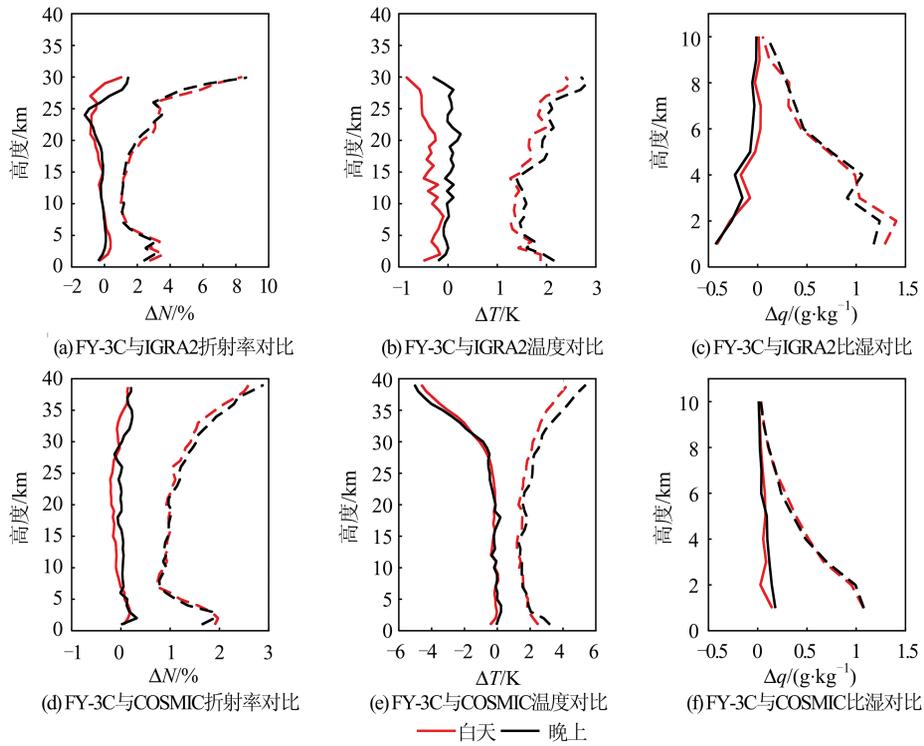


图 7 2017 年 FY-3C 掩星相对于 IGRA2 和 COSMIC 掩星大气产品的昼夜比较

Fig. 7 Statistical Comparisons of Atmospheric Products Between FY-3C RO and IGRA2 and Between FY-3C RO and COSMIC RO During Days and Nights in 2017

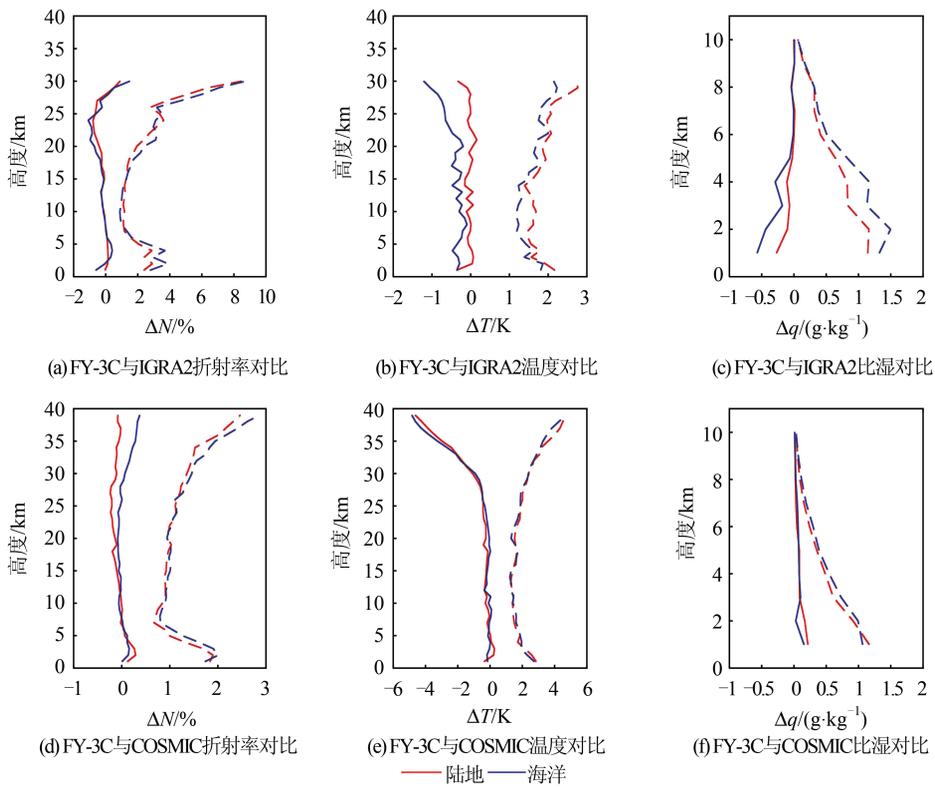


图 8 2017 年 FY-3C 掩星相对于 IGRA2 和 COSMIC 掩星大气产品的海陆比较

Fig. 8 Statistical Comparisons of Atmospheric Products Between FY-3C RO and IGRA2 and Between FY-3C RO and COSMIC RO over Land and Sea Surfaces During 2017

4 结语

本文以 IGRA2 探空资料和 COSMIC 掩星大气产品为参照,对 2015—2017 年 FY-3C 掩星大气产品的折射率、温度和比湿廓线进行质量评估,并对 2017 年 FY-3C 掩星大气产品数据质量特征随季节、纬度带、昼夜和海陆变化的情况进行分析,得到如下结论:

1)2015—2017 年除比湿廓线质量无明显差异外,FY-3C 掩星折射率和温度廓线的质量均在逐年提高。

2)FY-3C 掩星温度与 IGRA2 探空资料的符合程度比与 COSMIC 掩星资料的符合程度好,而折射率和比湿廓线则相反。

3)FY-3C 折射率廓线 25 km 以下整体无系统偏差,相对偏差标准差 $\leq 5\%$;温度廓线存在系统负偏差(30 km 以上尤为显著),标准差 ≥ 1.5 K;比湿廓线越趋地表质量越低,5 km 以下有一定偏差,标准差 ≤ 1.2 g/kg。

4)FY-3C 掩星折射率、温度和比湿廓线质量有一定季节性差异,在低纬度带折射率、比湿廓线质量最差,不同高度区间的低、中、高纬度带温度廓线质量存在差异;昼夜、海陆环境的差异也对其产品有一定影响。

随着风云系列卫星掩星资料的进一步积累和 COSMIC2 掩星任务的实施,今后可使用更丰富的数据资料进行相关数据产品的对比验证,为中国自主开展的掩星任务数据产品的气象与气候应用提供参考。

致谢:感谢国家卫星气象中心廖蜜对本文数据处理提出建议;感谢国家卫星气象中心提供 FY-3C 掩星大气产品数据,CDAAC 提供 COSMIC 掩星大气产品数据,NCAR 提供全球实时探空数据集 IGRA2。

参 考 文 献

- [1] Fishbach F F. A Satellite Method for Temperature and Pressure Below 24 km[J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1965,46(11):528-532
- [2] Kuo Y H, Wee T K, Sokolovskiy S, et al. Inversion and Error Estimation of GPS Radio Occultation Data[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(1):507-531
- [3] Wang B R, Liu X Y, Wang J K. Assessment of COSMIC Radio Occultation Retrieval Product Using Global Radiosonde Data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2012,5(6):1 073-1 083
- [4] Xu Xiaohua, Liu Shulun, Luo Jia. Analysis on the Variation of Global ABL Top Structure Using COSMIC Radio Occultation Refractivity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018,43(1):94-100(徐晓华,刘树纶,罗佳.利用 COSMIC 掩星折射指数分析全球大气边界层顶结构变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2018,43(1):94-100)
- [5] Liao Mi, Zhang Peng, Yang Guanglin, et al. Preliminary Validation of the Accuracy of Atmospheric Products from FY-3C[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 73(6):1 131-1 140(廖蜜,张鹏,杨光林,等.风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验[J]. 气象学报,2015,73(6):1 131-1 140)
- [6] Liao Mi, Zhang Peng, Yang Guanglin, et al. Preliminary Validation of the Refractivity from the New Radio Occultation Sounder GNOS/FY-3C[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(2):781-792
- [7] Ma Xulin, Jiang Sheng, Yu Yueming, et al. Analyzing the Quality of Data for Temperature and Humidity Using COSMIC Radio Occultation Observations[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2017, 40(6):841-849(马旭林,姜胜,于月明,等. COSMIC 掩星反演大气温湿资料的质量特征分析[J]. 大气科学学报,2017,40(6):841-849)
- [8] Du M. Evaluation for Retrieving Precision and Some Merits of COSMIC Data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5):586-593
- [9] Sokolovskiy S. Effect of Superrefraction on Inversions of Radio Occultation Signals in the Lower Troposphere[J]. *Radio Science*, 2003, 38(3), DOI:10.1029/2002RS002728
- [10] Ao C O, Mannucci A J, Kursinski E R. Improving GPS Radio Occultation Stratospheric Refractivity Retrievals for Climate Benchmarking[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12):229-240
- [11] Staten P W, Thomas R. Apparent Precision of GPS Radio Occultation Temperatures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(24):392-395
- [12] Liu Congliang, Zhang Kefei, Tan Zhixiang, et al. The Effects of Ionospheric Disturbances on the Accuracy of GPS Radio Occultation Bending Angle and Temperature[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11):1 334-1 339(柳聪亮, Zhang Kefei, 谭志祥,等.电离层干扰对 GPS 掩星弯曲角和温度精度的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2014,39(11):1 334-1 339)
- [13] Bi Yanmeng, Liao Mi, Zhang Peng, et al. 1DVAR

Retrieval Method for GPS Radio Occultation Measurements of Atmospheric Temperature and Humidity Profiles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013 (15) :

568-574(毕研盟, 廖蜜, 张鹏, 等. 应用一维变分法反演 GPS 掩星大气温湿廓线[J]. 物理学报, 2013 (15):568-574

Quality Analysis of the Neutral Atmospheric Products from FY-3C Radio Occultation Based on IGRA2 Radiosonde Data and COSMIC Radio Occultation Products

XU Xiaohua^{1,2} ZHU Zhouzong¹ LUO Jia^{1,3}

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

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

Abstract: Based on the IGRA2 radiosonde data and the COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate) radio occultation (RO) products, the quality analysis of the neutral atmospheric products from FY-3C RO observations, including the refractivity, the temperature and the specific humidity profiles, during 2015 to 2017 is carried out. The results show that below 25 km, there are no systematic negative deviations in FY-3C RO temperature profiles and the standard deviation of the relative deviation is smaller than 5.0%. Systematic negative deviations in temperature profiles exist, and the standard deviation is more than 1.5 K. The quality of specific humidity profiles is poorer when the height approaches the ground more closely, and the standard deviation is smaller than 1.2 g/kg. Although the FY-3C RO data is generally of high quality and the quality is higher and higher from 2015 to 2017, it needs to be further improved near the ground and above 25 km. The further analysis based on the products during 2017 shows that the qualities of the FY-3C RO refractivity profiles and temperature profiles are the worst in winter, while the qualities of the FY-3C RO specific humidity profiles are the worst in summer. The qualities of the FY-3C RO refractivity profiles are the worst in the low latitudes, while the altitudinal dependencies of the qualities of FY-3C RO temperature profiles are not the same at different altitude ranges, and the FY-3C specific humidity profiles are significantly worse in the low latitudes than in the middle latitudes. In addition, day and night differences and land and sea differences also exist in the qualities of FY-3C RO products.

Key words: FY-3C; occultation; neutral atmospheric products; quality analysis

First author: XU Xiaohua, professor, specializes in GNSS meteorology. E-mail: xhxu@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: LUO Jia, associate professor. E-mail: jluo@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41774033, 41774032); the National Key Basic Research and Development Program of China(2013CB733302); the National Key Research and Development Program of China(2018YFC1503502).

引文格式: XU Xiaohua, ZHU Zhouzong, LUO Jia. Quality Analysis of the Neutral Atmospheric Products from FY-3C Radio Occultation Based on IGRA2 Radiosonde Data and COSMIC Radio Occultation Products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3):384-393. DOI:10.13203/j.whugis20180490(徐晓华, 朱洲宗, 罗佳. 利用 IGRA2 探空数据和 COSMIC 掩星资料对 FY-3C 掩星中性大气产品进行质量分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(3):384-393. DOI:10.13203/j.whugis20180490)