

利用全球探空站背景场资料分析不同掩星数据偏差特性*

张秋昭^{1,2}, 王耀兴^{1,2}, 沈震^{1,2}

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为验证不同掩星数据反演湿温廓线的精度,需量化分析其误差特性。采用分段线性插值法,以时间窗1 h、水平距离100 km为匹配准则,对0.2~30 km各插值高度层温度的平均偏差和标准差进行统计分析,旨在探究不同掩星数据偏差特性。通过采用2018—2019年期间的全球探空站背景场资料完整数据,评估中国区域不同掩星数据偏差。结果表明:与全球探空站背景场资料相比,各类掩星数据绝对负偏差小于0.4 K,整体均值偏差在-0.5~0.5 K间变化,故二者探测精度相当。通过显著性检验分析发现,折射率相对偏差很小,结合统计量 $F=0.9857>0.05$ 可知,不同掩星计划探测精度无显著性差异。

关键词:掩星;IGRA探空;湿温廓线;显著性检验

中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)05-093-06

Deviation characteristics analysis of different occultation data using IGRA Sounding data

ZHANG Qiuzhao^{1,2}, WANG Yaoxing^{1,2}, SHEN Zhen^{1,2}

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to verify the accuracy of different occultation data inversion of the wet temperature profile, it is necessary to quantify the error characteristics. The piecewise linear interpolation method, with time window 1 h and horizontal distance 100 km as the matching criterion was adopted. The average deviation and standard deviation of each interpolated height layer temperature of 0.2~30 km were statistically analyzed to explore the deviation characteristics of different occultation data. By using the complete IGRA (integrated global radiosonde archive) sounding data during 2018-2019, the deviation of different occultation data in China was evaluated. The results show that, for the above kind of occultation data, the temperature deviation is negative, and the overall average deviation is from -0.5 to 0.5 K. The absolute value of occultation data is less than 0.4 K compared with the IGRA data, and the accuracy of occultation data is equivalent to IGRA sounding station data. Through the significant detection analysis, it was found that the relative deviation of refractivity is small, combined with the statistical $F=0.9857>0.05$, which shows that the detection accuracy of different masking plans has no obvious difference.

Keywords: occultation; IGRA sounding; wet temperature profile; significance test

20世纪90年代, GPS掩星技术首次应用于地球大气探测。该技术将无线电信号由GPS卫星向低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星传送过程中由于受地球大气干扰,其传播路径呈现弯曲状态。掩星剖面切点高度垂直覆盖范围是由地面至LEO高度,故GPS掩星技术作为一种探测覆盖面广且均匀的新兴大气探测技术,可提供全球规模高垂直分辨率和高精度的大气廓线,其探测数据已广泛用于数值天气预报和空间气候监测多领域研究^[1-8]。

为验证掩星技术的可行性,20世纪90年代初,美国率先发射了首颗搭载掩星接收机平台的Microlab-1卫星,成功开展掩星探测实验^[9]。经解算发现, GPS/气象(METEorology, MET)掩星技术探测温度偏差低于0.5 K,均方根偏差小于1.5 K,掩星探测技术实用价值得到了初步验证,具有重大科学意义。继此后,陆续有诸多掩星计划得以开展,包括丹麦Orsted、南非Sunsat、德国CHAMP、阿根廷SAC-C、德美联合GRACE、澳大利亚FedSat、巴西EQUARS、欧洲MetOp与ACE+、我

* 收稿日期:2019-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41874040, 41774026);江苏省资源环境信息工程重点实验室开放基金资助项目(2019JSKL-03)

作者简介:张秋昭(1985—),男,河南新乡人,副教授,博士,硕士生导师, E-mail:qiuzhaocumt@163.com

国台湾地区和美国联合发射的气象、电离层和气候星座探测系统 (Constellation Observing System for the Meteorology, Ionosphere, and Climate, COSMIC) 以及我国 Feng-Yun3C 掩星计划。由于众多掩星计划可在全球范围内提供充足的数据文件,从而有效支撑了掩星技术可行性验证研究^[10]。

国外诸多学者利用不同掩星数据,基于全球探空站背景场资料 (Integrated Global Radiosonde Archive, IGRA) 展开了大量的研究工作。Ware 等对 GPS/MET 实验资料开展评估分析,结果表明,从地面到 40 km 高度层探测温度平均偏差约为 1 K^[11]。Fu 等以整年 35 个分布在澳大利亚和南极的探空站资料为参考基准,对 COSMIC 掩星数据进行了不同地理环境的质量评估,分析发现,掩星数据反演结果跟背景场资料高度拟合,无线电掩星技术可靠性得以验证^[12]。Sun 等比较分析了 IGRA 和 COSMIC 大气剖面资料的偏差特性,量化分析得到两种资料在赤道和南半球高纬度带地区湿温廓线质量相对不稳定,存在离散点大偏差,但在北半球高纬度带和中纬度带地区拟合性较好^[13]。He 等以多类型无线电探空仪数据为背景场资料,评估分析了 COSMIC 掩星数据在对流层上部和平流层下部的探测偏差,分析表明 COSMIC 掩星数据与 Vaisala-RS92、上海无线电探空仪温度测量结果一致,均值差异趋向于零^[14]。

Kishore 将 COSMIC/FORMOSAT-3 掩星资料与 IGRA 作比对,发现掩星湿温廓线资料与探空探测值偏差可基本忽略^[15]。

文献[16-19]均对无线电探空仪资料与掩星数据探测值的良好拟合性进行了验证。然而,当前研究中仅对代表性掩星数据作了评估工作,而对不同掩星数据之间的偏差特性研究尚且较少。因此,以 IGRA 作为参考值,对不同掩星计划的湿温廓线产品数据的精度进行评价,经显著性检验分析,探究不同掩星数据偏差特性,为掩星大气产品多领域科学的应用研究提供理论支撑。

1 数据来源

本研究参考值资料下载自 IGRA 网站 (<https://www1.ncdc.noaa.gov/>),共收集了中国区域分布的 97 个无线电探空站资料。

论文评估了 2018—2019 年的中国区域掩星数据。各类掩星 wetPrf 资料分别为 MetOp-B、TerraSar-X、KOMPSAT5、COSMIC、PAZ 和 MetOp-A,数据均下载自 CDAAC 归档中心 (<http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac/>),该资料记录了不同垂直高度层的大气参数,分别包含海拔高度、湿度、温度和折射率等,垂直探测范围为 0~40 km,垂直分辨率为 100 m。表 1 注明了不同掩星计划的数据概况。

表 1 不同掩星计划规格参数概况

Tab. 1 Overview of specifications and parameters of different occultation plans

掩星计划	项目机构	发射时间	运行轨道	轨道周期/m	轨道倾角/(°)
METOPB	ESA	2012-09-17	太阳同步轨道	101.30	98.7
TSX	DLR	2007-06-15	太阳同步轨道	94.85	97.4
KOMPSAT5	KARI	2013-08-22	太阳同步轨道	98.00	98.1
COSMIC	NOAA	2006-04-14	倾斜不同步轨道	100.00	72.0
PAZ	Hidesat	2018-02-22	太阳同步轨道	94.85	97.4
METOPA	ESA	2006-10-19	太阳同步轨道	107.10	98.8

由于掩星探测不受空间、天气等因素影响,可实现全球全天候实时监测。传统无线电探空仪分布站点局限于内陆板块,掩星的探测范围可延拓至大陆及海岸线、广大海域等范围。

2 比较方案

2.1 时空匹配

采用高标准时空匹配准则,将两种资料水平距离限制为 100 km,时间窗口设为 1 h^[20]。基于

IGRA,经有效配准后,比对统计同时期在选定经纬度和时间范围内的不同掩星廓线资料,旨在探究不同掩星数据的偏差特性。

2.2 统计评估

由于 IGRA 传统无线电探空仪大气参数探测值以位势高度为基准记录,而 GPS 掩星探测技术基于海拔高度记录观测值。为统一参考基准,需对探空资料进行高度换算,即通过式(1)、式(2)将探空位势高度转换为对应站点海拔高度。

$$R_e(\varphi) = \sqrt{1 / \left(\frac{\cos^2 \varphi}{6\,738.137^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{6\,356.752^2} \right)} \quad (1)$$

$$H_{\text{geometric}} = \frac{h_{\text{geopotential}} \cdot R_e(\varphi)}{9.806\,16 \times [1 - 0.002\,637 \cos(2\varphi) + 0.000\,005\,9 \cos^2(2\varphi)] R_e(\varphi) - h_{\text{geopotential}}} \quad (2)$$

式中: $h_{\text{geopotential}}$ 是位势高度, $H_{\text{geometric}}$ 是海拔高度,单位均为 km。鉴于 GPS 掩星技术垂直分辨率高,而 IGRA 传统探空数据分辨率较低,经式(3)可将掩星数据和 IGRA 均进行分段线性插值,内插至以 0.2 km 为间隔的 0.2 ~ 30 km 垂直高度处,统计各插值高度层对应温度的平均偏差 ΔT ,解算函数为式(4)。

$$y = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} f(x_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(x_2) \quad (3)$$

$$\Delta T(v, m) = T_{\text{wetPrf}}(v, m) - T_{\text{radiosonde}}(v, m) \quad (4)$$

式(4)中: $\Delta T(v, m)$ 是温度平均偏差; $T_{\text{wetPrf}}(v, m)$ 和 $T_{\text{radiosonde}}(v, m)$ 为 IGRA 和众多掩星计划数据在各插值高度层的温度探测值; v 是插值高度层; m 是探测数据组匹配样本数。统计解算公式为:

$$\overline{\Delta T(v)} = \frac{1}{M(v)} \sum_{m=1}^{M(v)} \Delta T(v, m) \quad (5)$$

$$\sigma_{\Delta T(v)} = \left\{ \frac{1}{M(v) - 1} \sum_{m=1}^{M(v)} [\Delta T(v, m) - \overline{\Delta T(v)}]^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

其中: $M(v)$ 为各插值高度层 v 的时空配对样本数; $\overline{\Delta T(v)}$ 和 $\sigma_{\Delta T(v)}$ 分别是各插值高度层 v 对应的均值偏差和标准差。基于此,总体温度平均偏差 $\overline{\Delta T}$ 和偏差标准差 $\sigma_{\Delta T}$ 的计算方法定义为:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\sum_{v=1}^{v=v_{\max}} |\overline{\Delta T(v)}|}{v_{\max}} \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{\sum_{v=1}^{v=v_{\max}} \sigma_{\Delta T(v)}}{v_{\max}} \quad (8)$$

其中: $\overline{\Delta T}$ 和 $\sigma_{\Delta T}$ 分别是总温度平均偏差和偏差标准差; v_{\max} 是最大探测高度层值。

2.3 质量控制

由于掩星探测受多路径效应、无线电信号中断、数据插值计算误差等因素影响,实际时空配对样本存在少许粗差探测值,故而配对样本不能直接用于掩星湿温廓线探测精度评估研究,需对离散粗差探测值点进行质量控制,即剔除大偏差的离群资料^[21-22]。

质量控制采用双权重法,通过检测时空配对样本,比较被测数据的平均值和标准差,将对应插值层温度平均偏差大于标准差 4 倍的离散粗差数据集选择剔除。

式中: φ 是探空站点对应纬度; $R_e(\varphi)$ 是探空站点对应纬度地区的地球半径,单位为 km。

双权重法^[23]首先通过样本中位数 M 和偏差中位数 MAD 解算出每个插值高度层温度 T_i 相应的权重函数 ω_i ,计算方法如下:

$$\omega_i = \frac{T_i - M}{c \times MAD} \quad (9)$$

式中: c 为常数 7.5;当 $|\omega_i| \geq 1$ 时,对该插值高度层进行数据归并,取定值 $\omega_i = 1$ 。

将双权重指标定义为:

$$\bar{T}_{\text{bw}} = M + \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - M)^2 (1 - \omega_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - \omega_i^2)^2} \quad (10)$$

$$BSD = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n (T_i - M)^2 (1 - \omega_i^2)^4 \right]^{1/2}}{\left| n \sum_{i=1}^n (1 - \omega_i^2) (1 - 5\omega_i^2) \right|} \quad (11)$$

$$Z_i = \frac{T_i - \bar{T}_{\text{bw}}}{BSD} \quad (12)$$

其中: \bar{T}_{bw} 和 BSD 分别为双权重平均值和标准差; Z_i 表征质量控制的评判阈值,当 $Z_i \geq 4$ 时,将其视为异常值剔除,可避免配对样本中异常值对总平均值和偏差标准差量化检核的影响。

3 结果分析

为探究我国不同掩星湿温廓线数据探测精度差异,将掩星数据与 IGRA 进行比对,统计结果见表 2。

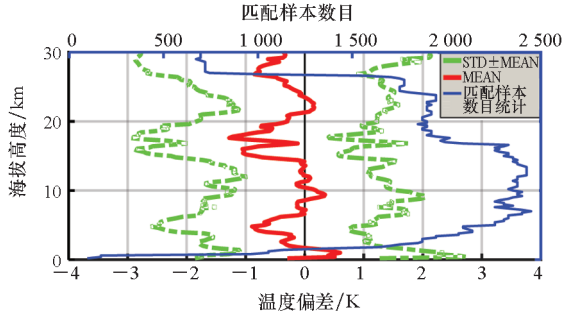
表 2 不同掩星计划温度总体偏差

Tab.2 Total temperature deviation of different occultation plans

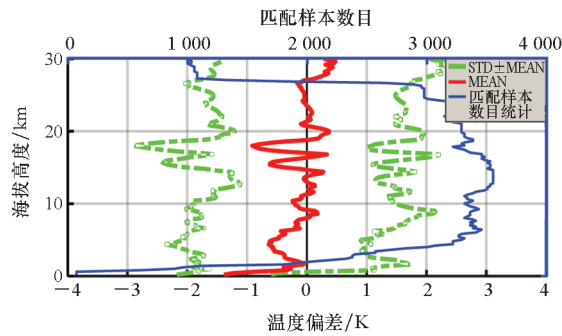
掩星计划	配对数	平均偏差/K	标准差/K
METOPB	12 889	-0.179 3	1.594 8
TSX	2 971	-0.278 9	1.643 6
KOMPATS5	3 552	-0.117 7	1.641 9
COSMIC	2 448	-0.296 6	1.637 7
PAZ	2 928	-0.441 5	1.641 9
METOPA	14 063	-0.173 8	1.611 1

为更直观表征不同掩星探测计划在各插值高度层上的温度偏差特征。图 1 展示了时空匹配后

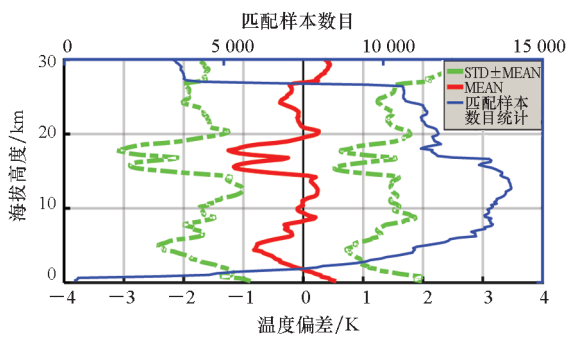
COSMIC、KOMPAST5、METOPA、METOPB、PAZ 和 TSX 掩星数据温度偏差随海拔高变化趋势分布情况。为便于直观读取各高层信息,将双轴数据展示于同一幅图中。其中,黑色坐标轴对应曲线表征各高层温度偏差变化趋势,蓝色坐标轴对应曲线表征各高层匹配样本数目。红色实线表征温度平均偏差分布曲线,而两侧绿色虚线表征均值偏差加减标准差后对应的分布曲线。



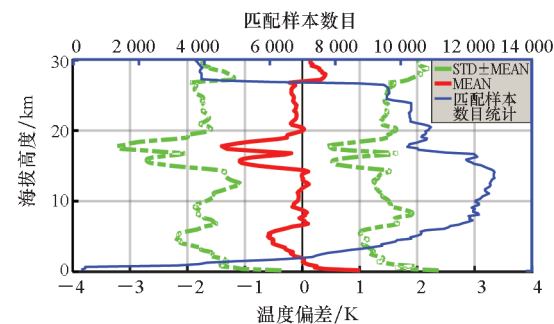
(a) COSMIC



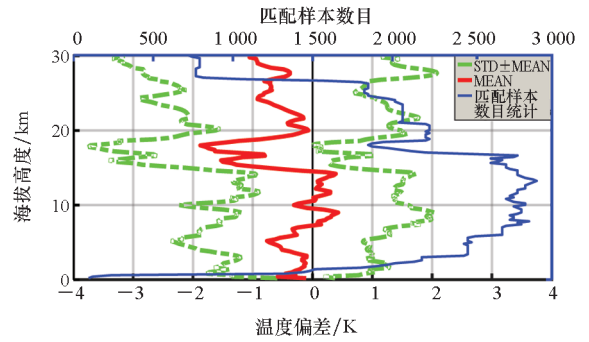
(b) KOMPAST5



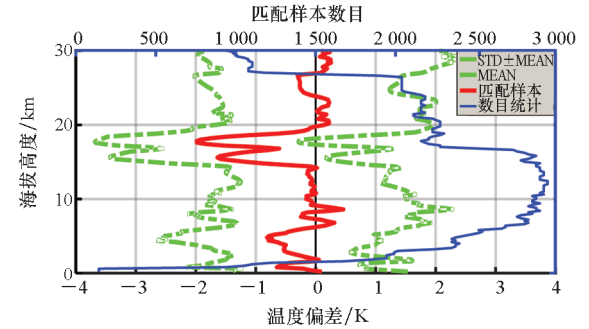
(c) METOPA



(d) METOPB



(e) PAZ



(f) TSX

图 1 2018—2019 年掩星温度偏差变化趋势

Fig. 1 Temperature deviation Curve of occultation data in 2018—2019

由图 1 不难看出,COSMIC 掩星温度偏差集中分布在 $-1 \sim 0.5$ K 间;相较于其他掩星探测计划,METOPA 和 METOPB 配对样本数明显较多,8~15 km 高度范围内温度偏差绝对值低于 0.5 K;PAZ 和 TSX 掩星存在较大偏差,15~20 km 高度范围内温度偏差峰值逼近于 2 K;从变化趋势看,KOMPSTA5 掩星温度偏差在 0 K 左右扰动,稳定性最好。再结合表 2 可知,总体上,相较于 IGRA 中国区域探空站数据,无论是哪类无线电掩星计划,掩星资料探测温度相对于探空参考值存在小于 1.65 K 的标准差偏差,总平均偏差在 $-0.5 \sim 0.5$ K 间变化,故二者探测精度相当。

由于掩星数据和探空站资料精度拟合性良好,而不同掩星数据偏差变化特征尚不可知,需对其展开统计分析。图 2 为 2018—2019 年期间各掩星湿温廓线资料折射率相对偏差随海拔高度变化的偏差曲线图。其中,曲线图实线部分是均值偏差分布特征;左右两条虚线部分反映了平均偏差 \pm 标准差分布特征。可以看出,近地表折射率相对偏差平均值随高度上升呈现减小趋势;8~20 km 高度处偏差扰动幅度较小,20~25 km 高度处存在明显峰值偏差。

整体上,不同掩星数据折射率相对偏差分布

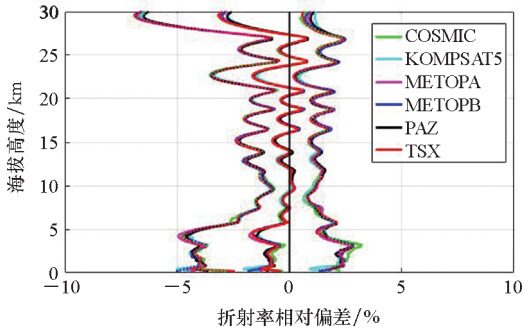


图2 2018—2019年不同掩星资料折射率相对偏差对比

Fig. 2 Comparison of relative deviation of refractivity of different occultation data in 2018—2019

特征变化趋势基本相同。但量化统计结果尚不可知,针对不同掩星计划探测精度差异进行显著性分析,检验算法采用单因素一元方差分析 F 统计量。图3给出了2018—2019年期间不同掩星折射率廓线偏差显著性检验结果。其中,黑色实线表征样本上下界,蓝色上下边界分别表征上1/4分位线和下1/4分位线,红色横线表征均值偏差分布特征,红色加号表征离散点异常值。从变化趋势上可知,红色线条近似同处一条直线,故折射率相对偏差结果相近。2018—2019年不同掩星资料折射率相对偏差 F 的统计量结果见表3。将

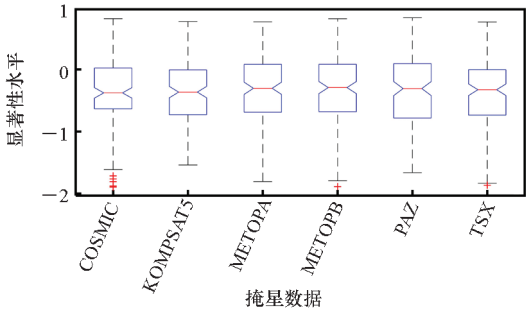


图3 2018—2019年不同掩星数据显著性检验结果
Fig. 3 Significance test results of different occultation data in 2018—2019

表3 2018—2019年不同掩星资料折射率相对偏差 F 统计量结果

Tab. 3 Results of F -statistics of relative deviation of refractive index of different occultation data in 2018—2019

方差来源	平方和	自由度	均方	F 比	F
组间	0.226	5	0.045 16	0.13	0.985 7
组内	311.847	894	0.348 82		
总和	312.072	899			

不同掩星计划探测精度结合表3可知,该因素的统计量 $F = 0.985 7 > 0.05$,可接受原假设,即无显著性差异。

4 结论

本文以1 h和100 km为匹配准则,利用我国2018—2019年期间的IGRA探空数据,将其与CDAAC提供的不同掩星数据时空匹配,统计评估各插值高度层温度偏差,旨在验证不同掩星数据探测精度。结果表明,掩星资料探测温度相对于探空背景场参考值,湿温廓线数据温度偏差均呈现负值,存在小于1.65 K的标准差偏差,总平均偏差在-0.5~0.5 K间变化,故掩星数据和探空站资料精度相当。此外,经折射率廓线偏差显著性检验发现 $F = 0.985 7 > 0.05$,故不同掩星数据探测精度无显著性差异。

参考文献 (References)

- [1] SMITH E K, WEINTRAUB S. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies [J]. Proceedings of the IRE, 1953, 41(8): 1035 - 1037.
- [2] HAJJ G A, IBANEZMEIER R, KURSINSKI A E R. Ionospheric imaging from a low earth orbiter tracking GPS [C]// Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 1993: 1315 - 1322.
- [3] KURSINSKI E R, HAJJ G A, HARDY K R, et al. Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the Global Positioning System [J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(17): 2365 - 2368.
- [4] 程凯琪, 郭启云, 马旭林, 等. GNSS掩星观测反演温度质量控制方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 32(7): 177 - 186.
CHENG Kaiqi, GUO Qiyun, MA Xulin, et al. Research of quality control method of GNSS occultation observation inversion temperature [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 32(7): 177 - 186. (in Chinese)
- [5] BUSINGER S, CHISWELL S R, BEVIS M, et al. The promise of GPS in atmospheric monitoring [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(1): 5 - 18.
- [6] CHIEN F C, KUO Y H. Impact of FORMOSAT-3/COSMIC GPS radio occultation and dropwindsonde data on regional model predictions during the 2007 Mei-yu season [J]. GPS Solutions, 2010, 14(1): 51 - 63.
- [7] FONSECA Y B, ALEXANDER P, DE L, et al. Comparison between GNSS ground-based and GPS radio occultation precipitable water observations over ocean-dominated regions [J]. Atmospheric Research, 2018, 209(1): 115 - 122.
- [8] YU B, SCOTT C J, XUE X, et al. Using GNSS radio occultation data to derive critical frequencies of the ionospheric sporadic E-layer in real time [J]. GPS Solutions, 2021, 25(1): 1 - 11.
- [9] ROCKEN C, ANTHES R, EXNER M, et al. Analysis and

- validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 1022 (D25): 29849–29866.
- [10] HO S P, HUNT D, STEINER A K, et al. Reproducibility of GPS radio occultation data for climate monitoring: profile-to-profile inter-comparison of CHAMP climate records 2002 to 2008 from six data centers [J]. *Journal of Geophysical Research; Atmospheres*, 2012, 117(D18): D18111.
- [11] WARE R, EXNER M, FENG D, et al. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit; preliminary results [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(1): 19–40.
- [12] FU E J, ZHANG K F, MARION K Y, et al. Assessing COSMIC GPS radio occultation derived atmospheric parameters using Australian radiosonde network data [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 1054–1059.
- [13] SUN B M, 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 Atmospheres*, 2010, 115 (D23): 1–16.
- [14] HE W Y, HO S P, CHEN H B, et al. Assessment of radiosonde temperature measurements in the upper troposphere and lower stratosphere using COSMIC radio occultation data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): L17807.
- [15] KISHORE P, NAMBOOTHIRI S P, JIANG J H, et al. Global temperature estimates in the troposphere and stratosphere: a validation study of COSMIC/FORMOSAT-3 measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2008, 8(3): 897–908.
- [16] 徐晓华, 汪海洪. 不同季节 GPS 掩星廓线精度的比较研究 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2010, 35(6): 639–643.
XU Xiaohua, WANG Haihong. Comparison of precision of GPS radio occultation profiles in different seasons [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 639–643. (in Chinese)
- [17] 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.
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. (in Chinese)
- [18] 王伯睿, 刘晓阳, 王久珂. COSMIC 掩星反演数据质量分析 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2013, 49(2): 241–251.
WANG Borui, LIU Xiaoyang, WANG Jiuke. Assessment of COSMIC radio occultation retrieval product [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(2): 241–251. (in Chinese)
- [19] 廖蜜, 张鹏, 毕研盟, 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): 1131–1140.
LIAO Mi, ZHANG Peng, BI Yanmeng, et al. A preliminary estimation of the radio occultation products accuracy from Fengyun-3C meteorological satellite [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(6): 1131–1140. (in Chinese)
- [20] 徐晓华, ZHANG Kefei, 罗佳, 等. GPS 掩星与探空观测统计比较中配对标准的比较研究 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2009, 34(11): 1332–1335.
XU Xiaohua, ZHANG Kefei, LUO Jia, et al. Research on the collocation criteria in the statistical comparisons of GPS radio occultation and radiosonde observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1332–1335.
- [21] ZOU X, ZENG Z. A quality control procedure for GPS radio occultation data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(D2): D02112.
- [22] SODEN B J, LANZANTE J R. An assessment of satellite and radiosonde climatologies of upper-tropospheric water vapor [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(6): 1235–1250.
- [23] 刘兆祎. FY-3A 微波湿度计观测资料的质量控制及云检测 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
LIU Zhaoyi. The quality control and cloud detection of FY-3A microwave humidity sounder data [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014. (in Chinese)