



# COSMIC掩星反演湿温廓线质量的时空分析

王耀兴<sup>1,2</sup> 张秋昭<sup>1,2</sup> 沈震<sup>2</sup>

1 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

2 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

**摘要:**为研究COSMIC(constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate)掩星反演湿温廓线的质量,需对数据误差特性进行量化研究。首先采用线性插值的方法,以时间窗3 h、水平距离300 km为匹配准则,对0.2~30 km各高度层温度的平均偏差和标准差进行统计分析,研究随海拔高、季节和纬度带变化的温度平均偏差特性。然后采用2016年的全球探空数据集分析全球区域的COSMIC湿温廓线质量,以及北温带COSMIC湿温廓线质量随季节变化的特点,探究不同纬度带地区COSMIC掩星湿温廓线质量随纬度变化的特点。结果表明,全球范围内温度平均偏差为-0.16 K,掩星数据和探空站资料精度相当;季节变化的统计量 $F=0.999\ 6 > 0.05$ ,该因素对COSMIC湿温廓线质量影响不显著;纬度带变化的统计量 $F=0.024\ 4 < 0.05$ ,该因素对COSMIC湿温廓线质量有显著影响,尤其是热带地区受水汽影响较大,温度平均偏差处于峰值,偏差高于0.25 K,南温带地区次之。

**关键词:**COSMIC掩星;探空数据;湿温廓线;显著性检验

中图分类号:P228.42

文献标志码:A

20世纪90年代, GPS掩星技术(radio occultation, RO)首次被提出<sup>[1]</sup>,其原理是通过部署在低轨卫星上的接收机接收来自GPS卫星的无线电信号,由于传播介质是密度分布不均匀的地球大气,信号传播路径会呈现弯曲状态,基于弯曲参数可反演得到相应的大气参数<sup>[2]</sup>。1995年, GPS掩星技术首次被美国GPS/MET(Meteorology)实验成功验证<sup>[3-4]</sup>。此后,大量GPS掩星项目相继兴起,如丹麦Orsted卫星、德美CHAMP(challenging minisatellite payload)卫星、阿根廷SAC-C(satellite de aplicaciones científicas-C)卫星、欧洲GRACE(gravity recovery and climate experiment)卫星和韩国KOMPSAT-5(Korea multi-purpose satellite 5)卫星以及中国自主发射的风云3号C(Fengyun 3C, FY-3C)卫星等。其中,美国和中国台湾联合发起的COSMIC(constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate)卫星计划,在传统单颗低轨卫星探测的基础上加入多卫星探测计划,由6颗低轨卫星组建多维探测星座,构建多任务卫星掩星探测系统,可用于气象学、电离层和气候领域的研究<sup>[5-6]</sup>。由于掩星资

料具有长期稳定、垂直分辨率高、全球覆盖和高质量的特性,因此GPS掩星技术的业务化应用对空气天气监测、气候变化等研究领域有重要意义<sup>[7]</sup>。

为研究GPS掩星资料的质量和准确度,必须基于背景场资料对掩星数据进行误差统计评估。文献[8-9]采用CHAMP、SAC-C掩星数据,以时间窗0.5 h、水平距离差小于200 km为匹配准则估计两种数据的温度偏差,比对结果表明,温度平均偏差低于0.1 K,标准差小于0.5 K,两种数据保持了良好的一致性,验证了不同类型掩星资料同化研究的合理性。文献[10]以无线电探空仪数据为背景场资料,以时间窗3 h、水平距离差小于300 km为匹配准则将其与GPS/MET掩星资料作比对,在2~28 km高度范围匹配了280个样本,发现掩星资料温度平均偏差小于0.5 K。文献[11]采用2001-05—2004-09的CHAMP/SAC-C掩星资料,基于无线电探空资料展开比对统计,以2 h、200 km为匹配准则,在20~200 hPa高度层匹配了10 000多对样本,发现CHAMP/SAC-C掩星资料温度廓线平均偏差小于0.5 K。此外,相关文

收稿日期:2019-12-27

项目资助:国家自然科学基金(41874040,41774026);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者:王耀兴,硕士,主要从事GNSS气象学的研究。wangyaoxing@cumt.edu.cn

通讯作者:张秋昭,博士,副教授。qiuzhaocumt@163.com

献对COSMIC掩星数据也开展了质量分析工作。文献[12]基于常规探空资料分析了2008-05—2018-11 6个月的COSMIC掩星数据,结果表明,在10 km高度以下,湿温廓线温度平均偏差小于0.5 K,均方根误差小于1.5 K。文献[13]将2007—2010年的中国地区探空资料与COSMIC后处理产品进行比对,在1 h、300 km匹配准则条件下分析了10~925 hPa高度的温度剖面图,发现COSMIC掩星数据与探空资料相比,温度平均偏差为-0.08 K,均方根误差为1.67 K<sup>[13]</sup>。文献[14]以位于澳大利亚和南极的35个探空站资料为参考基准,分内陆、沿海和海洋3个纬度带地区对COSMIC掩星数据进行质量评估,验证了无线电掩星技术的可靠性。文献[15]在2 h、200 km匹配准则下,基于多类型无线电探空仪比对分析2008-04—2009-10的COSMIC数据,结果表明温度平均偏差小于0.5 K,COSMIC掩星数据和探空资料在北半球高纬度带和中纬度带地区拟合性较好,在赤道和南半球高纬度带地区湿温廓线质量相对不稳定,存在大偏差离散点。文献[16]将探空资料与COSMIC/福卫3号(Formosat-3)掩星资料作比对,结果表明掩星湿温廓线资料与探空数据温度平均偏差基本可忽略。文献[17]利用多种型号无线电探空仪数据分析对流层上部和平流层下部的偏差特性,结果表明Vaisala-RS92探空仪探测温度与COSMIC掩星数据吻合较好,MRZ和VIZ-B2探空仪温度出现较大的偏差。文献[18]采用4个月的COSMIC掩星数据与全球探空数据作比对,发现两种数据在不同地区、不同高度层的温度平均偏差可忽略不计。尽管现有文献对掩星资料的质量已经做了大量评估工作,但分纬度带变化、季节性差异评估COSMIC掩星反演湿温廓线数据质量的相关研究仍较少。

本文以全球探空数据集(integrated global radiosonde archive, IGRA)为背景场,采用2016年COSMIC掩星Level2后处理产品wetPrf资料,对北半球温带地区掩星资料展开季节性变化分析,对全年范围掩星资料展开纬度带变化分析,探究COSMIC掩星湿温廓线数据质量是否受季节和纬度带差异的影响。

$$H = \frac{9.80616 [1 - 0.002637 \cos(2\varphi) + 0.0000059 \cos^2(2\varphi)]}{9.80665} \frac{h \cdot R_e(\varphi)}{R_e(\varphi) - h} \quad (2)$$

式中,  $\varphi$  为探空站点对应纬度;  $R_e(\varphi)$  为探空站点对应纬度地区的地球半径;  $H$  表示海拔高;  $h$  表示

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

本文收集的探空数据下载自IGRA网站(<https://www1.ncdc.noaa.gov/>),选用1 006个全球分布的探空站点资料,整理协调世界时(universal time coordinated, UTC)00:00、06:00、12:00和18:00的探空数据。

wetPrf资料下载自CDAAC(COSMIC Data Analysis and Archive Center)分析场(<http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac/>),包含海拔高、湿温廓线和折射率等大气参数廓线。

### 1.2 湿温廓线统计比较

本文把全球区域划分为北寒带、北温带、热带、南温带和南寒带5个纬度带,一共组成了6个数据统计区域,具体情况见表1。

表1 COSMIC资料统计区域分布

Tab.1 Statistical Distribution of COSMIC Data

区域	纬度范围	经度范围
全球	90°S~90°N	180°W~180°E
北寒带	66.5°N~90°N	180°W~180°E
北温带	23.5°N~66.5°N	180°W~180°E
热带	23.5°S~23.5°N	180°W~180°E
南温带	23.5°S~66.5°S	180°W~180°E
南寒带	66.5°S~90°S	180°W~180°E

本文匹配标准采用3 h时间窗、300 km水平距离。在全球范围内,将2016年的COSMIC掩星数据与探空站资料匹配,使之符合阈值条件,分析湿温廓线的平均偏差和标准差<sup>[19]</sup>。

### 1.3 湿温廓线质量评估方法

探空站数据是大气探测方法中业务化最久的资料,其数据常被用作背景场资料。本文将IGRA探空资料视为真值,分析COSMIC掩星资料的误差分布。

由于无线电探空仪的温度、压强等大气参数探测数据是基于位势高度记录的,没有直接的海拔高观测值,因此需将位势高转换为对应的海拔高,计算如下:

$$R_e(\varphi) = \sqrt{1 / \left( \frac{\cos^2 \varphi}{6378.137^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{6356.752^2} \right)} \quad (1)$$

式中,  $\varphi$  为探空站点对应纬度;  $R_e(\varphi)$  为探空站点对应纬度地区的地球半径;  $H$  表示海拔高;  $h$  表示位势高。

由于探空资料垂直分辨率较低,而COSMIC

湿温廓线资料垂直探测高度范围为 0~40 km, 垂直分辨率可达 100 m, 因此本文将探空资料和 COSMIC 湿温廓线资料均进行分段线性插值, 内插到 0.2~30 km、间隔 0.2 km 的对应高度处, 然后计算各个高度层对应的温度平均偏差  $\Delta T$ 。定义如下:

$$\Delta T(v, m) = T_w(v, m) - T_r(v, m) \quad (3)$$

式中,  $\Delta T(v, m)$  表示温度平均偏差;  $T_w(v, m)$  和  $T_r(v, m)$  分别为 COSMIC 湿温廓线、探空站数据对应的高度温度值;  $v$  为垂直高度层;  $m$  为时空配对样本的探测数据组号。对各高度层不同时空配对的样本进行统计分析, 定义如下:

$$\Delta T_{\text{mean}}(v) = \frac{1}{M(v)} \sum_{m=1}^{M(v)} \Delta T(v, m) \quad (4)$$

$$\sigma_{\Delta T(v)} = \left\{ \frac{1}{M(v)-1} \sum_{m=1}^{M(v)} [\Delta T(v, m) - \Delta T_{\text{mean}}(v)]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

式中,  $\Delta T_{\text{mean}}(v)$  和  $\sigma_{\Delta T(v)}$  分别是高度层  $v$  对应的温度平均偏差和温度偏差标准差;  $M(v)$  是高度层  $v$  对应的时空配对样本数。总体温度平均偏差  $\Delta T_{\text{mean}}$  和总体温度偏差标准差  $\sigma_{\Delta T}$  的计算如下:

$$\Delta T_{\text{mean}} = \frac{\sum_{v=1}^{v_{\text{max}}} |\Delta T_{\text{mean}}(v)|}{v_{\text{max}}} \quad (6)$$

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

式中,  $v_{\text{max}}$  是最大探测高度层。

此外, 由于实际时空配对样本存在个别粗差探测值, 粗差主要是由 COSMIC 掩星探测信号中断、多路径效应和数据插值计算引起的, 离散点不能直接用于评估湿温廓线的质量, 需进行质量控制, 即剔除大偏差的离散点。本文选择剔除 8~25 km 高度处、温度平均偏差大于 10 K 的离散粗差数据集<sup>[20-21]</sup>。

为研究季节差异和纬度带变化对 COSMIC 湿温廓线数据质量的影响, 本文进行了显著性检验实验。采用单因素一元方差分析的  $F$  统计量判定是否有显著性影响, 显著性水平取值为 0.05, 若  $F > 0.05$ , 则表明检测因素与温度平均偏差无显著性差异, 即 COSMIC 湿温廓线数据质量受该因素变化的影响不显著, 反之亦然。定义如下:

$$F = \frac{n-k}{k-1} \cdot \frac{\sum_i n_i (\bar{x} \cdot i - \bar{\bar{X}})^2}{\sum_i \sum_j (X_{ij} - \bar{\bar{x}}_i)^2} \quad (8)$$

式中,  $n$  为全部观察值个数;  $k$  为因素水平个数;  $\bar{x}$  为单因素平均值;  $\bar{\bar{X}}$  为总平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 全球匹配

全球范围内共有 45 318 对匹配的样本数据, 因此本文的比对具有统计学意义。为研究 COSMIC 湿温廓线数据的质量和准确度, 将掩星资料和全球探空站数据作比对, 分析湿温廓线的温度平均偏差和标准差。表 2 为基于全球范围探空站资料各个纬度带 COSMIC 掩星资料时空匹配样本数。

表 2 全球范围探空站资料各个纬度带 COSMIC 掩星资料时空匹配样本对数

Tab.2 Number of Space-Time Matching Samples Based on COSMIC Occultation Data at Different Latitudes of Global Sounding Station Data

时期	全球区域	北寒带	北温带	热带	南温带	南寒带
3月—5月	13 110	984	10 206	1 221	513	186
6月—8月	11 628	732	8 712	1 437	582	165
9月—11月	9 093	627	6 828	1 002	528	108
12月、1月—2月	11 433	603	8 814	1 290	549	177
全年	45 264	2 946	34 560	4 950	2 172	636

由表 2 可知, 2016 年全年, 寒带和热带地区 COSMIC 掩星资料时空匹配样本数分别为 3 582 对和 4 950 对。而温带地区四季分明, 北半球春(3月—5月)、夏(6月—8月)、秋(9月—11月)、冬(12月、1月—2月)季节 COSMIC 掩星资料时空匹配样本数分别为 10 206 对、8 712 对、6 828 对和 8 814 对, 南半球春(9月—11月)、夏(12月、1月—2月)、秋(3月—5月)、冬(6月—8月)季节 COSMIC 掩星资料时空匹配样本数分别为 528 对、549 对、513 对和 582 对。北温带地区时空匹配样本数最多, 故选用南温带区域的匹配资料研究季节变化对数据质量的影响。

表 3 统计了不同月份、不同地区温度平均偏差  $\Delta T_{\text{mean}}$  和标准差  $\sigma_{\Delta T}$ 。由表 3 可知, 全球区域 0.2~30 km 高度的温度平均偏差为  $-0.1628$  K, 标准差为  $1.7572$  K; 北温带 COSMIC 掩星资料温度平均偏差为  $-0.1575$  K, 标准差为  $1.7781$  K, 故保证样本数据量充足的前提下, 相较于其他纬度带, 北温带数据质量明显较好。

表3 不同月份、不同地区温度偏差统计/K

Tab.3 Statistics of Temperature Deviation of Different Regions in Different Months/K

时期	统计参数	全球区域	北寒带	北温带	热带	南温带	南寒带
3月—5月	平均偏差	-0.168 6	-0.074 3	-0.161 4	-0.311 8	-0.258 6	0.048 7
	标准差	1.689 1	1.591 8	1.695 1	1.614 9	1.756 1	1.429 6
6月—8月	平均偏差	-0.223 4	-0.069 2	-0.235 3	-0.297 2	-0.290 5	0.202 2
	标准差	1.684 4	1.601 6	1.682 8	1.602 5	1.891 3	1.901 9
9月—11月	平均偏差	-0.123 3	-0.121 2	-0.112 9	-0.317 9	-0.181 5	-0.354 4
	标准差	1.740 0	1.562 5	1.760 4	1.516 0	1.832 6	1.957 4
12月、1月—2月	平均偏差	-0.121 1	-0.005 6	-0.102 6	-0.219 7	-0.326 9	-0.162 3
	标准差	1.918 7	1.932 5	1.968 3	1.627 7	1.711 2	1.445 1
全年	平均偏差	-0.162 8	-0.023 5	-0.157 5	-0.285 0	-0.264 2	-0.051 6
	标准差	1.757 2	1.628 4	1.778 1	1.599 4	1.805 2	1.673 9

## 2.2 季节变化分析

考虑到北温带数据样本量大且四季分明,本文基于该地区样本研究季节变化对COSMIC掩星反演湿温廓线质量的影响<sup>[22]</sup>。

图1为北温带各季节湿温廓线与探空站资料

的温度偏差随高度层变化曲线图。其中,红色实线代表各垂直高度层上COSMIC掩星数据与探空资料的 $\Delta T_{\text{mean}}$ 变化曲线,黑色虚线表示 $\Delta T_{\text{mean}} - \sigma_{\Delta T}$ 的变化曲线,绿色虚线表示 $\Delta T_{\text{mean}} + \sigma_{\Delta T}$ 的变化曲线。

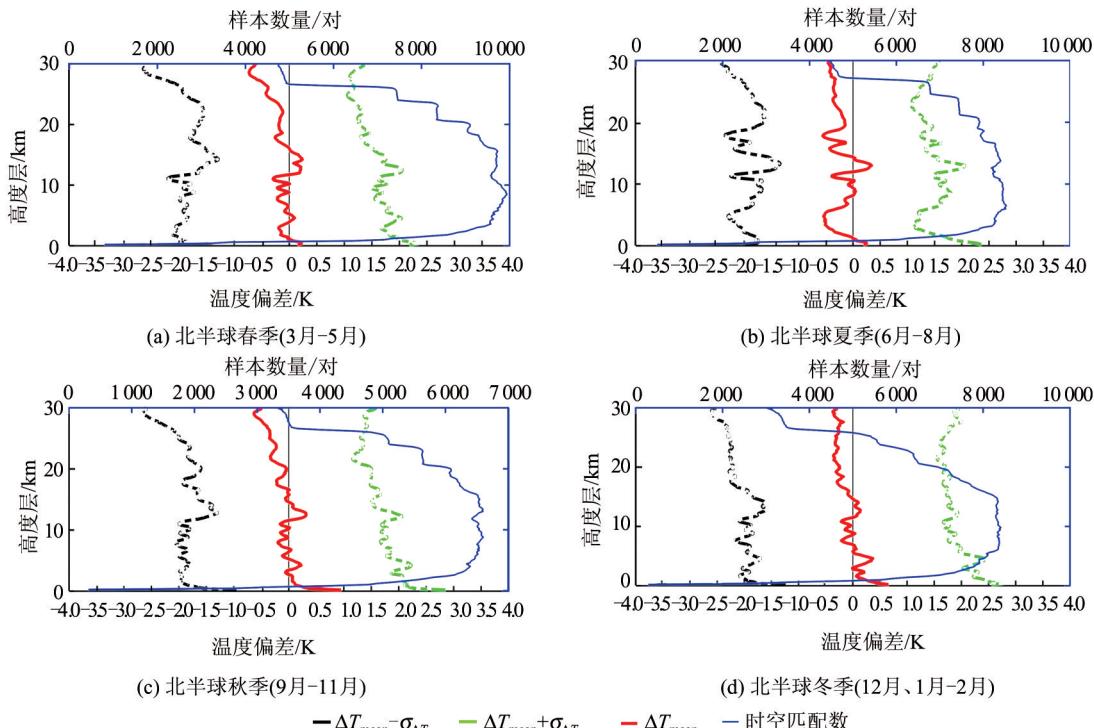


图1 COSMIC掩星数据和北温带湿温廓线与探空站数据不同季节的温度偏差变化曲线图

Fig.1 COSMIC Occultation Data and Curves of Temperature Deviations of Wet Temperature Profile and Sounding Station Data in Different Seasons

由图1可知,COSMIC反演湿温廓线的温度较探空数据偏低,且在25 km高度以上,温度平均偏差略微增加,湿温廓线的温度平均偏差保持在0.5 K以内,各层温度平均偏差低于0.25 K。5~25 km高度数据量较多,标准差稳定在1.5~2.5 K。总体上,COSMIC湿温廓线数据质量较好。

为了研究季节变化对COSMIC湿温廓线数据质量的影响,将北半球北温带春夏秋冬4组数据进行方差检验,表4为季节变化因素的方差分析表,图2为春夏秋冬各个季节温度偏差的均值及置信区间箱线图。图2中红色线条表征均值,黑色实线反映样本上下界,蓝色上

边界代表上 1/4 分位线, 蓝色下边界为下 1/4 分位线。

表 4 季节变化因素方差分析表

Tab.4 Variance Analysis of Seasonal Factor

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	置信度
组间	0.000 28	3	0.000 1	0.01	0.999 6
组内	0.473 91	20	0.023 7		
总和	0.474 19	23			

由表 4、图 2 可知, 均值变化趋势线条近似于一条直线, 表明季节变化对温度平均偏差影响不大, 该因素的统计量  $F=0.999 6 > 0.05$ , 可接受原假设, 表明季节变化与温度平均偏差无显著性差异, 即 COSMIC 湿温廓线数据质量受季节因素变化的影响不显著。

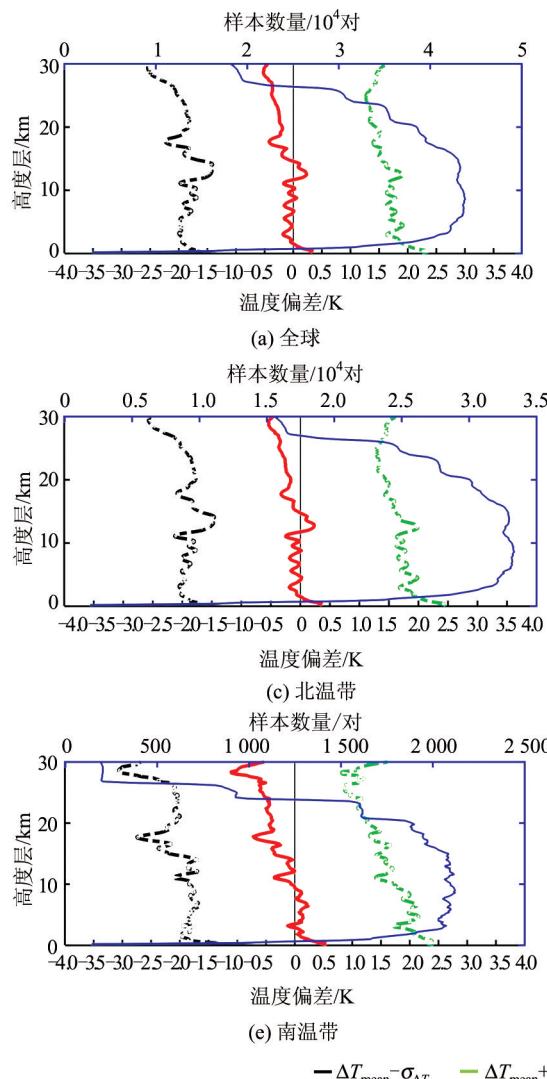


图 3 COSMIC 掩星数据和不同纬度带地区探空站资料的温度偏差变化曲线

Fig.3 COSMIC Occultation Data and Curves of Temperature Deviation of the Sounding Station Data in Different Latitude Zones

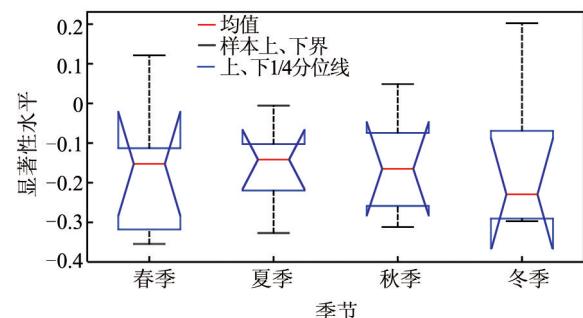


图 2 不同季节温度偏差的均值及置信区间箱线图

Fig.2 Box Plots of Mean Values and Confidence Intervals of Temperature Deviations for Different Seasons

### 2.3 纬度带变化分析

为了探究纬度带变化对 COSMIC 掩星数据质量的影响, 本文基于范围样本展开了分析。图 3 为不同纬度带湿温廓线的温度偏差变化曲线。

由图3可知,在热带、南温带地区,温度偏差变化曲线扰动范围明显扩大,平均偏差波动性显著增加。这是由于水汽模糊问题对温度的影响显著,因此赤道和高纬度带需考虑水汽干扰的影响。由表3可知,湿温廓线与探空数据在热带和南温带的温度平均偏差分别为-0.285 0 K和-0.264 2 K,而北寒带、北温带和南寒带地区温度平均偏差分别为-0.023 5 K、-0.157 5 K、-0.051 6 K。因此,热带和南温带地区温度平均偏差存在跳变现象。

为研究纬度带变化对COSMIC湿温廓线数据质量的影响,将6个纬度带统计区域数据进行方差检验。表5为纬度带变化因素的方差分析表,图4为各个纬度带统计区域方差检验的均值及置信区间的箱线图。

表5 纬度带因素方差分析表

Tab.5 Variance Analysis of Latitude Factor

方差来源	平方和	自由度	均方差	F值	置信度
组间	0.236 16	4	0.059 0	3.83	0.024 4
组内	0.231 05	15	0.015 0		
总和	0.467 21	19			

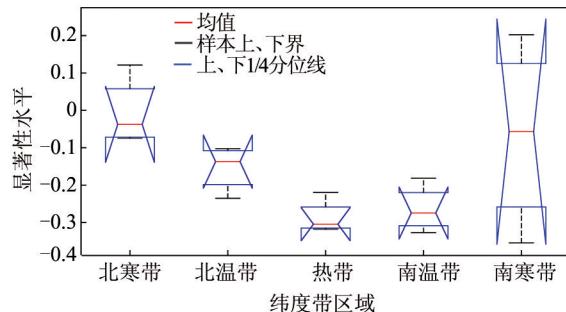


图4 不同统计区域均值及置信区间箱线图  
Fig.4 Box Plots of Mean Values and Confidence Intervals in Different Statistical Areas

由表5、图4可知,均值线条在热带和南温带地区出现跳变现象,样本上下界在南寒带纬度带异常;纬度带变化因素的统计量 $F=0.024\ 4<0.05$ ,可拒绝原假设,表明纬度带变化与温度平均偏差有显著性差异,即COSMIC湿温廓线数据质量受纬度带变化因素的影响显著。

### 3 结语

本文以3 h和300 km为匹配标准,将2016年UTC 00:00、06:00、12:00和18:00的IGRA全球探空数据与COSMIC掩星数据匹配,在0.2~30 km高度范围比较两种资料,统计分析二者温度平均

偏差和标准差,探究COSMIC掩星反演的湿温廓线质量是否受季节、纬度带变化的影响。结果表明,全球范围内温度平均偏差为-0.162 8 K,总体低于0.2 K,COSMIC掩星反演的湿温廓线质量和探空精度相当;季节变化因素对应的统计量 $F=0.999\ 6>0.05$ ,表明季节变化与温度平均偏差无显著性差异,即COSMIC湿温廓线数据质量受季节因素变化的影响不显著;由于热带和南寒带地区水汽丰富,因此温度偏差受其影响显著。温度平均偏差峰值位于热带地区,南半球南寒带次之。纬度带变化因素的统计量 $F=0.024\ 4<0.05$ ,表明纬度带变化因素与温度平均偏差有显著性差异,即COSMIC湿温廓线数据质量受纬度带变化因素的影响显著。

致谢:感谢CDAAC提供掩星资料和NOAA提供无线电探空数据。

### 参考文献

- [1] Steiner A K, Kirchengast G, Ladreiter H P. Inversion, Error Analysis, and Validation of GPS/MET Occultation Data [J]. *Annales Geophysicae*, 1998, 17(1):122-138
- [2] Businger S, Chiswell S R, Bevis M, et al. The Promise of GPS in Atmospheric Monitoring [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 77(1):5-18
- [3] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, et al. Observing Earth's Atmosphere with Radio Occultation Measurements Using the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D19): 23 429-23 465
- [4] Xu Xiaohua, Liu Shulun, Luo Jia. Analysis of Global Atmospheric Boundary Layer Top Structure Changes Using COSMIC Occultation Refraction Index [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] Scherllinpirscher B, Steiner A K, Kirchengast G, et al. The Power of Vertical Geolocation of Atmospheric Profiles from GNSS Radio Occultation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(3):1 595-1 616
- [6] Ware R, Rocken C, Solheim F, 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

- [7] Le Xin'an, Guo Yinghua, Zeng Zhen, et al. GNSS Radio Occultation Detection Technology in Near-Earth Space Environment [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(4):1 161-1 188(乐新安,郭英华,曾桢,等. 近地空间环境的GNSS无线电掩星探测技术[J]. 地球物理学报, 2016, 59(4):1 161-1 188)
- [8] Hajj G A , Ao C O , Iijima B A , et al. CHAMP and SAC-C Atmospheric Occultation Results and Intercomparisons[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(D6):6 109
- [9] Ma Z ,Kuo Y H , Ralph F M , et al. Assimilation of GPS Radio Occultation Data for an Intense Atmospheric River with the NCEP Regional GSI System [J]. *Journal of Changchun University of Science & Technology*, 2010, 139(7):188-197
- [10] 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, 102(D25):29 849-29 866
- [11] Schmidt T, Heise S, Wickert J, et al. GPS Radio Occultation with CHAMP and SAC-C: Global Monitoring of Thermal Tropopause Parameters[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(6):1 473-1 488
- [12] Wang Hong, Cao Yunchang, Xiao Wen'an. Comparison Between the COSMIC and L Band Radiosonde Data[J]. *Meteorology*, 2010, 36(9): 14-20(王洪,曹云昌,肖稳安.COSMIC掩星数据与L波段探空数据的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(9): 14-20)
- [13] Wang Borui, Liu Xiaoyang, Wang Jiuke. COSMIC Occultation Inversion Data Quality Analysis [J]. *Journal of Peking University (Natural Sciences)* , 2013, 49(2):241-251(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)
- [14] Fu E, Zhang K, Marion K, et al. Assessing COSMIC GPS Radio Occultation Derived Atmospheric Parameters Using Australian Radiosonde Network Data [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 1 054-1 059
- [15] 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 Atmospheres*, 2010, 115:D23104
- [16] 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) : 8 327-8 355
- [17] He W, Ho S, Chen H , 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):1 397-1 413
- [18] Gou Xiaoping, Fu Yang, Guo Yuening, et al. COSMIC Mission and Error Analysis of GPS Radio Occultation Data[J]. *Scientia Meteorologica Sinica* , 2009, 29(3):348-354(苟小平,符养,郭粤宁,等. COSMIC计划及掩星资料误差分析[J]. 气象科学, 2009, 29(3):348-354)
- [19] Xu Xiaohua, Li Juan, Luo Jia, et al. Quality Check of the Ionospheric Density Profiles from COSMIC Radio Occultation Observations [J]. *Journal of National University of Defense Technology* , 2018, 40 (5): 54-59(徐晓华,李娟,罗佳,等. COSMIC掩星电子密度廓线的质量核检[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(5):54-59)
- [20] Liao Mi, Zhang Peng, Bi Yanmeng, et al. A Preliminary Estimation of the Radio Occultation Products Accuracy from the Fengyun-3C Meteorological Satellite [J]. *Acta Meteor Sinica* , 2015, 73 (6):1 131-1 140(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):1 131-1 140)
- [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] Xu Xiaohua, Wang Haihong. Comparative Study on the Accuracy of GPS Occultation Profiles in Different Seasons [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* , 2010, 35(6):639-643(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)

## Temporal and Spatial Analysis of COSMIC Occultation Inversion of Wet Temperature Profile Quality

WANG Yaxing<sup>1,2</sup> ZHANG Qiuzhao<sup>1,2</sup> SHEN Zhen<sup>2</sup>

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

2 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

**Abstract:** **Objectives:** In order to study the wet temperature profile quality of COSMIC (constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate) occultation inversion, statistical analysis of data error characteristics is needed. **Methods:** Firstly, the linear interpolation method is used to analyze the average deviation and standard deviation of each layer temperature of 0.2-30 km with time window 3 h and horizontal distance 300 km as matching criteria. The temperature average deviation characteristics treat as a function of altitude, season and latitude are studied. Then, through the use of 2016 annual IGRA (integrated global radiosonde archive) sounding data, the COSMIC wet temperature profile quality in the global region is analyzed, and the characteristics of the COSMIC wet temperature profile quality in the north temperate zone are sorted out. The COSMIC occultation wet temperature profile in different latitude zones is explored. The characteristics of quality are treat as a function of latitude. **Results:** The results show that the average temperature deviation in the global range is  $-0.16$  K, the deviation is lower than 0.2 K, and the COSMIC occultation wet temperature profile quality is similar to the sounding accuracy. The seasonal variation statistic  $F=0.999$   $6>0.05$ , this factor has no significant effect on the COSMIC wet temperature profile quality. The statistic of the latitude band change  $F=0.024$   $4<0.05$ , which has a significant effect on the COSMIC wet temperature profile quality. In particular, the tropical region is greatly affected by water vapor, the average temperature deviation is at the peak, the deviation is higher than 0.25 K, and the southern temperate zone is second. **Conclusions:** This paper carries out experimental analysis and reveals the error characteristics of GNSS occultation technology detection data, including two different dimensions of time and space, which will promote research in the fields of air weather monitoring and climate change.

**Key words:** COSMIC occultation; sounding data; wet temperature profile; significance test

**First author:** WANG Yaxing, master, specializes in GNSS meteorology. E-mail: wangyaoxing@cumt.edu.cn

**Corresponding author:** ZHANG Qiuzhao, PhD, associate professor. E-mail: qiuzhaocumt@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41874040, 41774026); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD).

**引文格式:** WANG Yaxing, ZHANG Qiuzhao, SHEN Zhen. Temporal and Spatial Analysis of COSMIC Occultation Inversion of Wet Temperature Profile Quality[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6):887-894. DOI:10.13203/j.whugis20190051 (王耀兴, 张秋昭, 沈震. COSMIC掩星反演湿温廓线质量的时空分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6):887-894. DOI:10.13203/j.whugis20190051)