

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902766

GNSS 掩星观测反演温度质量控制方法研究

程凯琪¹ 郭启云² 马旭林¹ 李昌兴²

(1. 南京信息工程大学 南京 210044; 2. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘要:将中国区域划分成4个气候区,采用双权重标准差及设置相关系数阈值的方法,以中国120站的探空温度作为参考,将2014年的COSMIC、Metop-A、Metop-B掩星温度作为样本进行质量控制,同时也跟传统标准差法进行对比,并对质量控制结果进行了检验。结果显示,3种掩星之间的结果较为相似,不同气候区的温度具有不同的特征,从而划分不同的阈值区间,使质量控制更加准确。传统标准差法标识出的错误数据均可以由双权重标准差法标识出,且双权重法还能检测出传统标准差法无法检测出的错误点。并通过统计确定GNSS掩星温度与探空温度相关系数阈值为0.8609,对可疑温度进行标识。从质量控制结果来看,错误温度的分布大多都是掩星温度与探空温度相差较大的点,剔除质量控制出的错误温度后,掩星温度与探空温度相关性得到明显改善,此方法适用于对GNSS掩星反演温度的质量控制,为气象服务提供更准确的观测资料。

关键词:GNSS掩星;中国气候区;质量控制

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.1520

Research of quality control method of gnss occultation observation inversion temperature

Cheng Kaiqi¹ Guo Qiyun² Ma Xulin¹ Li Changxing²

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The region of China was divided into four climate zones. The method of double weighted standard deviation and correlation coefficient threshold was adopted to take the sounding data of 120 stations in China as reference, the COSMIC, Metop-A, and Metop-B occultation inversion temperatures in 2014 were used as samples for quality control. It is also compared with the traditional standard deviation method, and the quality control results are tested. The results show that the three occultations are similar, and the temperature in different climatic regions has different characteristics, so that different threshold intervals are divided to make the quality control more accurate. The error data identified by the traditional standard deviation method can be identified by the double weight standard deviation method, and the double weight method can also detect error points that the traditional standard deviation method cannot detect, and the double weight standard deviation method is more suitable. Through statistical calculation, the correlation coefficient threshold of GNSS occultation inversion temperature and sounding temperature is determined to be 0.8609, so as to determine whether the suspicious data is erroneous data. From the quality control results, the distribution of erroneous data is mostly the difference between the occultation temperature and the sounding temperature. After eliminating the erroneous data from the quality control, the correlation between the occultation inversion temperature and the sounding temperature is obvious improvement, data quality can be better improved, this method is applicable to the quality control of GNSS occultation inversion temperature, and provides more accurate observation data for weather analysis and numerical prediction.

Keywords: GNSS occultation; climatic zone of China; quality control

收稿日期: 2019-11-19 Received Date: 2019-11-19

* 资助项目: 科技部重大自然灾害监测预警与防范重点专项(2018YFC1506201、2018YFC1506204)、中国气象局气象探测中心自设(TCZS201702)资助项目

0 引言

气象观测是天气分析,提高天气预报准确性的基础,大气气象要素的测量对于揭示天气规律和气候区特征有着重要意义。世界各国进行高空气象观测的手段主要包括卫星、飞机、地面雷达和探空系统以及下投探空^[1-4]。目前,全球导航卫星系统(GNSS)/低轨卫星(LEO)无线电掩星技术已成为一种新兴的探测地球环境参数的方法,国际上主要的导航卫星系统有,美国的全球定位系统(GPS)、欧盟和我国合作的 Galileo 系统、俄罗斯的全球导航卫星系统(GLONASS),以及我国的北斗导航卫星系统等^[5]。全球导航定位系统的不断发展及完善,使无线电掩星技术进一步得到发展。无线电掩星临边探测技术开始于 20 世纪 60 年代,1995 年美国低轨卫星的研制和成功发射,验证了利用导航卫星及低轨卫星探测地球大气的可行性。随后各个国家相继发射了低轨卫星进行掩星观测,主要有 CHAMP、SAC-C、Metop-A、COSMIC、Metop-B 等 20 多颗卫星具备掩星探测能力^[6]。我国分别于 2013 年、2017 年发射了 FY-3C 和 FY-3D 卫星搭载了 GNSS 掩星探测载荷,实现了对大气的掩星观测^[7]。2019 年 6 月美国和台湾联合开发的 COSMIC-2 代也成功发射了 6 颗低倾角轨道卫星,每天可观测到超过 4 000 个的掩星事件,COSMIC-2 也将飞行两个太空气象科学有效载荷,一个射频信标发射机和一个离子速度计。COSMIC-2 任务将以革命性的方式增加大气和电离层观测的数量,这将极大地有利于研究和业务领域,未来可以提供较多的掩星观测。GNSS 掩星观测可得到电离层电子密度及大气折射率等信息,再由折射率反演得到大气的温、压、湿等信息。由于其具有垂直分辨率高、全天候、且可观测海洋和高原等较难观测区域等优点,已被成功运用于中层大气、气候研究、数值天气预报等领域^[8-9],逐渐发展成为高空气象数据重要的来源,实现业务化。

但 GNSS 掩星数据在观测过程中也会存在有误差,主要有测量误差、标定误差以及反演误差,反演过程中 Abel 逆变换使用的上边界条件不确定、水平折射率的无模式性都会造成反演误差,在对流层低层和平流层上层相对误差会较大,导致掩星反演温度的不准确影响掩星反演温度数据的使用^[10-11]。许多学者开展了对掩星数据的质量控制,美国常使用检测特定高度 Level 1 和 Level 2 弯曲角最大差值,由高海拔地区 Level 1 信号振幅中分析出的电离层频闪指数对数据进行质量控制^[12]。Zou 等^[13]通过双权重质量控制方法对掩星的折射率数据进行了质量控制,臧欣^[14]使用此方法对掩星折射率进行了质量控制。目前,对于掩星反演温度的质量控制较少,且较多的采用传统标准差法,同时在质量控制时也较少的

考虑地域及气候区上的差异,不同气候区的温度具有不同的统计特征,采用一致的质量控制方法会造成质量控制的不准确。因此,本文将中国区域根据气候特点划分为不同的气候区,对每个掩星温度数据赋予不同的权重,减小异常值对样本资料平均值和标准差的影响,并根据各个气候区不同的统计特征划分不同的质量控制标准,对掩星反演温度数据进行质量控制,为天气分析、数值预报提供更加准确的观测资料,同时也将双权重平均值和双权重标准差与传统算法计算的平均值和标准差结果进行对比分析,探讨两种方法的结果差异。

1 GNSS 掩星观测及反演原理

GNSS 卫星发射的电磁波信号经过地球大气被安装在 LEO 卫星上的 GNSS 接收机接收,由于大气的不均匀性,GNSS 发射的电磁波信号在经过地球大气时会发生信号延迟(图 1)。LEO 卫星上的接收机能够得到精确的相位延迟和信噪比,在局部球对称大气的假设下,利用多普勒观测方程结合低轨卫星、导航卫星星历,将 L1/L2 信号的附加相位延迟与振幅数据转换为以影响参数为自变量的弯角序列;利用 Abel 变换得到掩星点的折射率垂直廓线。对于理想大气而言,折射率 N 、温度 T 、气压 P 以及水汽压 e 存在如下关系:

$$N = 77.6 \times \left(\frac{P}{T}\right) + 22 \times \left(\frac{e}{T}\right) + 3.379 \times 10^5 \times \left(\frac{e}{T^2}\right) \quad (1)$$

当假设空气干燥时,则有:

$$N = 77.6 \times \left(\frac{P}{T}\right) \quad (2)$$

理想气体方程和静力方程得:

$$\rho = 0.003484 \frac{P}{T} = 4.4897 \times 10^{-5} N \quad (3)$$

$$\frac{\delta P}{\delta z} = -\rho g \quad (4)$$

$$T = 77.6 \frac{P}{N} \quad (5)$$

式中: g 为局地重力加速度; ρ 为大气密度。由折射率廓线根据式(3)得到大气密度分布,然后通过式(4)积分得到大气气压廓线,再由式(5)得到温度廓线,通过上述方程可反演得到大气的温度、气压、以及湿度参数。

2 质量控制方法

2.1 数据

2014 年 1 月 1 日到 12 月 31 日的 GNSS 掩星反演温度数据和中国 120 站的探空秒级数据,GNSS 掩星反演温

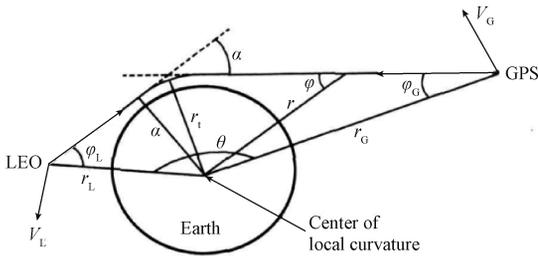


图1 GNSS 掩星观测原理^[15]

Fig. 1 Principle of GNSS occultation observation^[15]

度选取 COSMIC、Metop-A、Metop-B 三种掩星数据为例。GNSS 掩星反演温度数据来源于 <https://www.cosmic.ucar.edu/>，探空秒级数据来源于中国气象局。由于探空站点相对固定，为选取掩星点临近的探空资料作为参考，将 GNSS 掩星和探空数据按照经度、纬度分别小于 1°，时间小于 3 h 的条件进行时空匹配。

2.2 气候区的划分

中国地区幅员辽阔，气候多样。为了更精确地评估数据质量，消除因气候差异导致数据偏差过大的影响，同时也使不同气候区的数据根据其气候特征划分不同的标准，更加准确有效的质量控制，采用气候分区方法。根据多年平均气温、降水和海拔高度，将中国区域划分为 4 个气候区(图 2)，分别为亚热带季风气候区(B)、温带季风(C)、温带大陆性(D)、高原山地(E)^[16]。

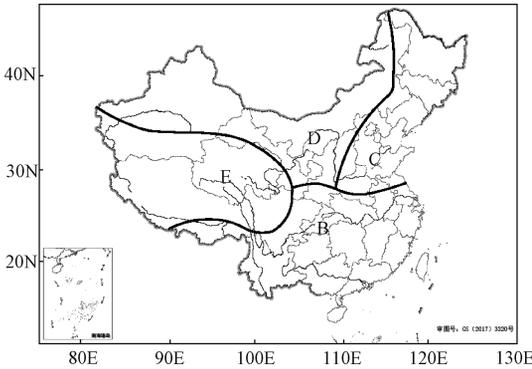


图2 中国气候区的划分

Fig. 2 Climatic distribution in China

2.3 质量控制方法

采用双权重标准差及设置 GNSS 掩星反演温度与参考场温度之间相关系数阈值的方法，主要分为以下 3 步。设有 n 个掩星反演温度样本($O_i, i=1, 2, \dots, n$)， n 个探空温度样本($B_i, i=1, 2, \dots, n$)。

1) 掩星自身质量控制

计算 GNSS 掩星反演温度的权重函数：

$$w_i = \frac{O_i - M}{c \times M_{AD}} \quad (6)$$

其中， $c=7.5$ ，当权重函数 $|w_i| > 1$ 时，进行数据递归，取 $w_i = 1.0$ 。 M 为掩星反演温度的中位数， M_{AD} 为偏差中位数。计算每层掩星反演温度的双权重平均值和双权重标准差：

$$\bar{O}_{bw} = M + \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M)(1 - w_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - w_i^2)^2} \quad (7)$$

$$B_{SD} = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n (O_i - M)^2 (1 - w_i^2)^4 \right]^{0.5}}{\left| \sum_{i=1}^n (1 - w_i^2)(1 - 5w_i^2) \right|} \quad (8)$$

对于大量的气象观测数据，样本符合正态分布。采用 3σ 准则原理，将 $\pm 3\sigma$ 外温度视为可疑， $\pm 4\sigma$ 外的温度视为错误，将错误温度进行剔除，可疑温度和正确温度进行后续质量控制。

2) 一致性检验

引入探空温度作为参考，将掩星反演温度与探空温度偏差作为样本量，计算双权重平均偏差和双权重标准偏差，采用上述 3σ 准则原理标识出可疑温度和错误温度，将可疑温度再次标识。

3) 可疑温度标识

计算各个气候区参考场与 GNSS 掩星反演温度的相关系数 r ：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}} \quad (9)$$

在统计检验时，指定为检出可疑值的显著性水平 $\alpha = 0.05$ ，称为检出水平，按照超过阈值的相关系数占有相关系数的 5% 计算出相关系数阈值，当 GNSS 掩星反演温度与探空温度某层的相关系数小于阈值时，则认为该层的可疑温度为错误温度，否则认为可疑温度为正确温度，对可疑温度进行标识。同时在文中也使用传统计算平均值和标准差的算法对 GNSS 掩星温度数据进行了统计，将两者结果进行对比分析。

3 质量控制结果分析

在 WMO 对探空仪测量的一般情况/最佳情况的温度不确定度评估中^[17]，在 16 km 以下探空仪受太阳辐射较小，探测温度的不确定度可以达到最佳情况，动态误差不超过 0.4 °C，探测温度质量较好。而掩星一般情况下温度不确定度为 1 °C，但在对流层中下层，水汽含量较多的情况下，掩星反演温度不确定度增大，5 km 以下不确定度约为 1.5 °C。在 16 km 以下探空仪探测温度质量较好，可以作为标准对 GNSS 掩星反演温度进行质量控制。

在 16 km 以上由于探测仪受太阳辐射影响较强,探测温度的不确定度增大,所以本文在掩星自身质量控制中对全部数据进行质量控制,而在与一致性检验中仅对 16 km 以下的温度进行质量控制(表 1)。

表 1 WMO 对探空仪测量的一般情况/
最佳情况的温度不确定度评估

Table 1 WMO assessment of general/best case
temperature uncertainty for sonde measurements

要素	高度/km	温度/°C	
		不确定度(一般情况)	不确定度(最佳情况)
	≤16	1	0.4
	>16	2	0.8

3.1 掩星反演温度自身质量控制结果

图 3 所示为 3 种掩星 4 个气候区掩星反演温度的双权重平均值和双权重标准差的廓线分布。由图 3 可知,3

种掩星之间的结果较为相似,4 个气候区掩星反演温度的双权重平均值存在有很大的差别,在亚热带季风气候区和高原山地气候区的逆温层明显比其他两个气候区高度偏高,13 km 以下亚热带季风气候区和高原山地气候区温度偏高,而在 13 km 以上温度逐渐偏低,到 25 km 以上,4 个气候区的双权重平均值相差很小,基本一致。用双权重算法计算出来的 4 个气候区的平均值符合所观测到的事实,亚热带季风气候区和高原山地气候区相比较其他两个气候区纬度位置偏南,逆温层会更高,亚热带季风气候区在低层温度也会偏高。双权重标准差 4 个气候区也存在较大的差别,亚热带季风气候区一年温差较小,其双权重标准差最小,而在温带季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,四季分明,温度变化较大,其双权重标准差较大,4 个气候区温度的双权重标准差从低层到高层大致呈逐渐减小的趋势,低层双权重标准差较大,为 12 °C 左右,高层则较小,基本在 8 °C 以内。

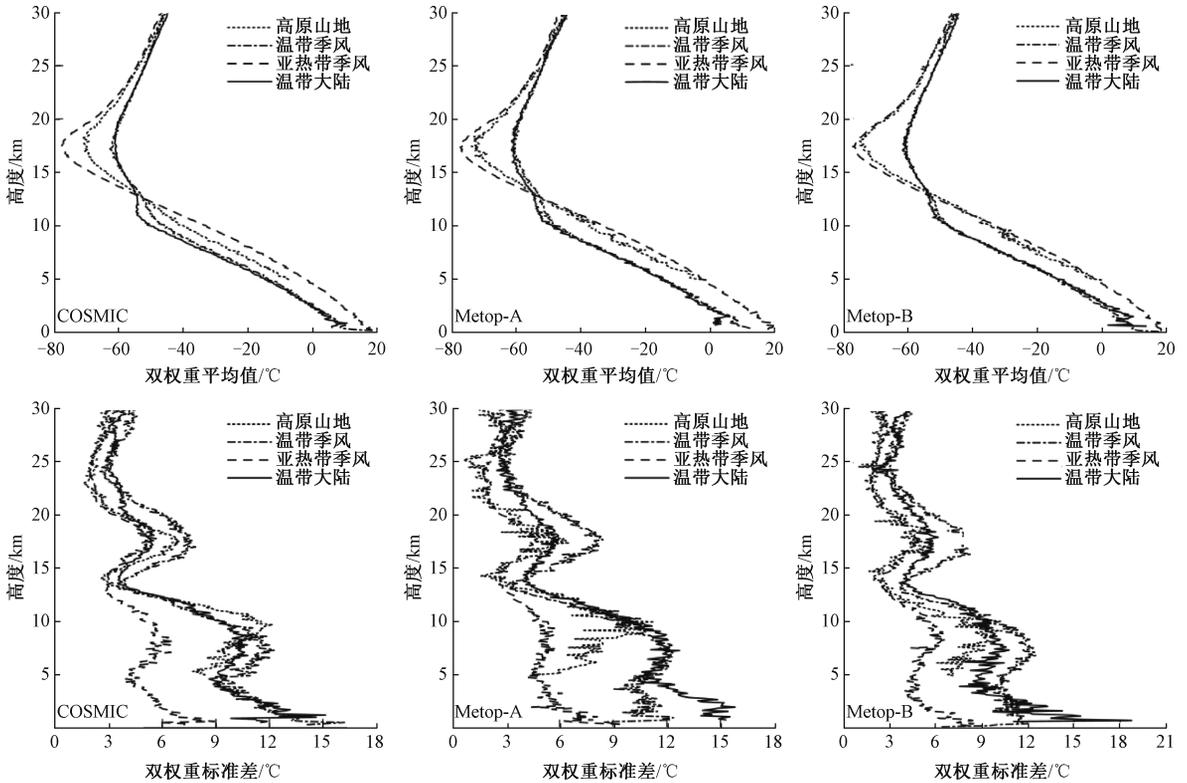


图 3 三种掩星 4 个气候区温度的双权重平均值和双权重标准差的廓线分布

Fig. 3 Profiles of double-weighted average and double-weighted standard deviation of temperature in four climatic zones of three occultations

同时也采用了传统计算平均值和标准差的算法对 3 种掩星在 4 个气候区的温度进行了统计(图 4),由图 4 可知,使用传统算法计算出的掩星温度的平均值与图 3 的双权重平均值存在差别,但是相差较小。而标准差与图 3 的双权重标准差则存在很大的差别,

COSMIC 掩星在温带大陆性气候区的标准差可以达到 160 °C 以上,是图 3 双权重标准差的 10 倍以上。Metop-B 掩星在温带季风气候区的标准差也较大,最大标准差可以达到 100 °C,而其双权重标准差数值则在 15 °C 以内。对各个温度数据的权重进行分析,发

现无论是双权重标准差还是双权重平均值,分布在中值点附近的掩星温度数据都比分布在两翼或者尾部的权重更大。相比较双权重的计算方法,传统的计算

方法更容易受到异常值的影响,当有异常值存在时,标准差会比双权重标准差大很多,直接影响质量控制的效果。

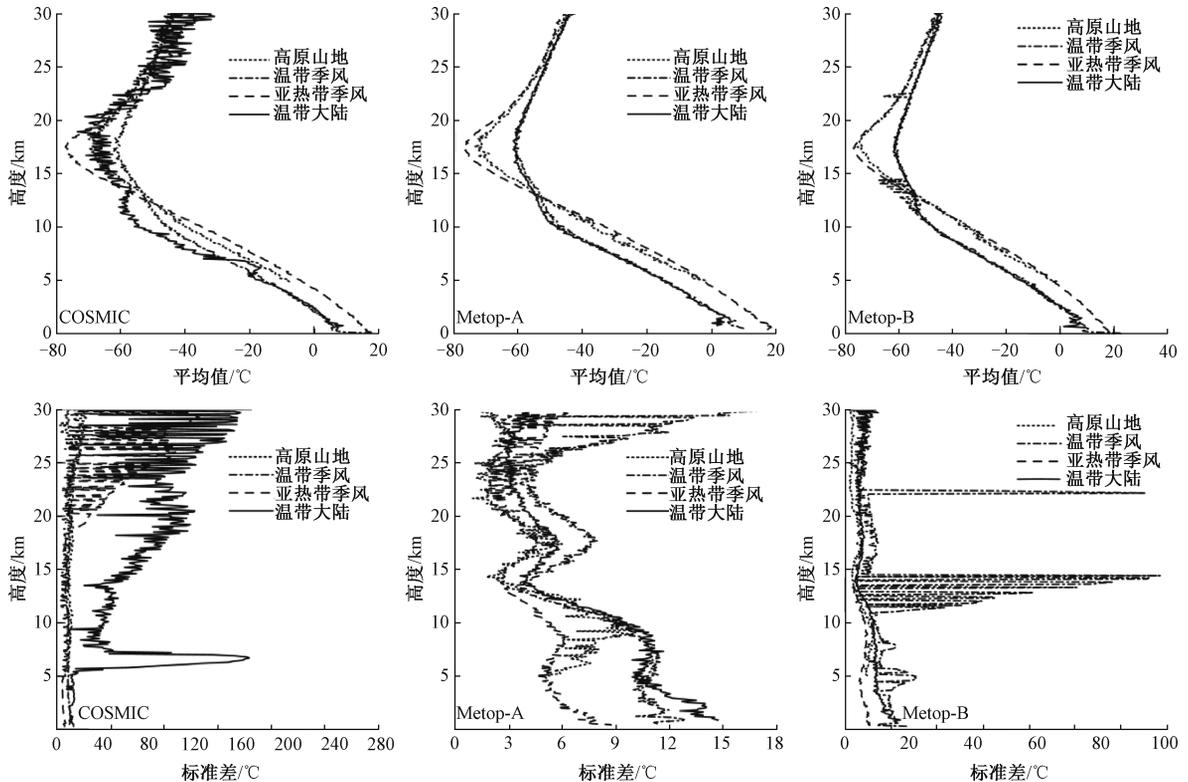


图4 三种掩星4个气候区温度的平均值和标准差的廓线分布

Fig. 4 Profiles of mean and standard deviations of temperatures in four climatic zones of three Occultations

根据图3计算出来的掩星反演温度的双权重平均值和双权重标准差确定GNSS掩星反演温度在4个气候区质量控制的标准,因3种掩星之间的结果较为相似,仅以COSMIC掩星的结果为例(图5)。4个气候区的错误温度和可疑温度标准存在差别,温带大陆性气候区和温带季风气候区的正确温度的区间较大,因为其双权重标准差较大,所以其接受为正确温度的区间较大,符合其统计特征;而亚热带季风气候区则较小。4个气候区在低层的正确温度区间较大,随着高度有减小的趋势。由此可见,划分不同气候区,使每个气候区根据其气候特征划分不同的质量控制标准,质量控制更加准确,根据阈值区间挑选出错误温度和可疑以及正确温度,然后将可疑和正确温度再次进行质量控制。采用传统算法计算出的平均值和标准差划分此阈值区间,由于受异常值影响,平均值与双权重平均值之间相差较小,但标准差要比双权重标准差大很多,其可接受为正确温度的区间要比双权重法确定的区间大很多,对于温带大陆性气候区其可接受为正确温度的区间为-480~480℃,较多的错误温度数据都无法检测出来,质量控制效果较差(图略),双权重标

准差法更为适用。

3.2 一致性检验

将经过掩星反演温度自身质量控制出的错误温度进行剔除,将GNSS掩星反演温度与探空温度之间的偏差作为观测量,再次进行质量控制,与探空参考的一致性检验。图6所示为经过统计得到的4个气候区3种掩星反演温度的双权重平均偏差和双权重标准偏差。3种掩星温度之间的结果较为相似,4个气候区之间的双权重平均偏差较为接近,除个别层次外,16 km以下偏差都在±1℃内,探空与掩星反演温度相差较小。从反演温度的双权重标准偏差来看,4个气候区相差不大,16 km以下数值大多都在2℃以内,亚热带季风气候区略小,在1.6℃左右,温带大陆性气候区和温带季风气候区之间较为接近,高原山地气候区会略大。也采用了传统方法对相同数据的平均偏差和标准偏差进行了计算(图略),平均偏差与双权重平均偏差相差较小,但是标准偏差与双权重标准偏差之间相差较大,在一些层次中计算出的标准偏差是双权重标准偏差的3倍以上,更易受错误值和可疑值的影响,导致可接受为

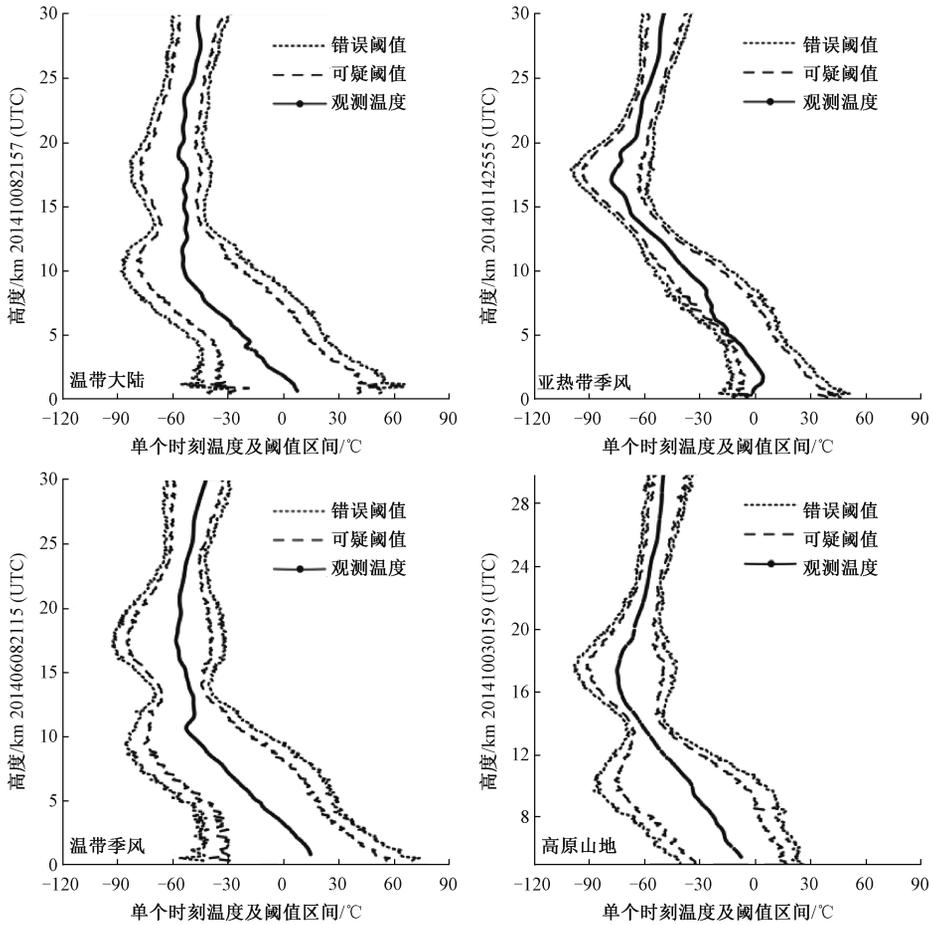


图 5 四个气候区 COSMIC 掩星单个时刻反演温度及阈值区间

Fig. 5 COSMIC inversion temperature at a single moment and threshold range in four climatic regions

正确温度的区间也较大,用双权重法剔除的错误数据全部包含了传统法剔除的点,且双权重法还能检测出传统法无法检测出的错误点,因此以下阈值区间的划分以及质量控制结果均采用双权重平均偏差和双权重标准偏差的结果。

根据图 6 计算出来的 GNSS 掩星反演温度的双权重平均偏差和双权重标准偏差确定 16 km 以下质量控制的标准,3 种掩星结果较为相似,仅以 COSMIC 结果为例(图 7)。由图 7 可知,由于四个气候区 GNSS 掩星反演温度的双权重平均偏差和双权重标准偏差较为接近,所以四个气候区之间阈值区间较为相似,略微存在差别,根据此阈值区间挑选出错误温度和可疑温度,然后将可疑温度再次进行标识。

3.3 可疑温度标识

为了保证准确剔除错误温度数据,且正确温度不被剔除,将经过上述质量控制得到的可疑温度通过探空与 GNSS 掩星反演温度之间的相关系数进行再次判断。图 8 所示为 4 个气候区 3 种掩星反演温度与探空温度相关

系数廓线分布,大多都在 0.8 以上,只有少部分的小于 0.8。经 4 个气候区三种掩星相关系数 1 年的统计,按照超过阈值的相关系数占有所有相关系数的 5% 计算出相关系数阈值,确定相关系数阈值为 0.860 9,将相关系数大于等于 0.860 9 层次上的可疑温度认为是正确温度,将相关系数小于 0.860 9 层次上的可疑温度认为是错误的,对可疑温度根据每层的相关系数进行质量控制,使质量控制更加严谨和准确。

3.4 质量控制出的错误温度

质量控制之后,质量控制标识出的 GNSS 掩星反演温度的错误温度散点图如图 9 所示,本文仅给出 3 种掩星温带季风气候区的结果,其他 3 个气候区结果与其相似(图略)。由图 9 可知,错误温度大都分布在对称轴的两侧,掩星反演温度与探空温度相差较大的点。1) 质量控制剔除与自身温度相差较大的点;2) 质量控制剔除与参考相差较大的温度数据;3) 对可疑温度的判断可以避免错误的温度数据被保留以及正确的温度被误剔除。

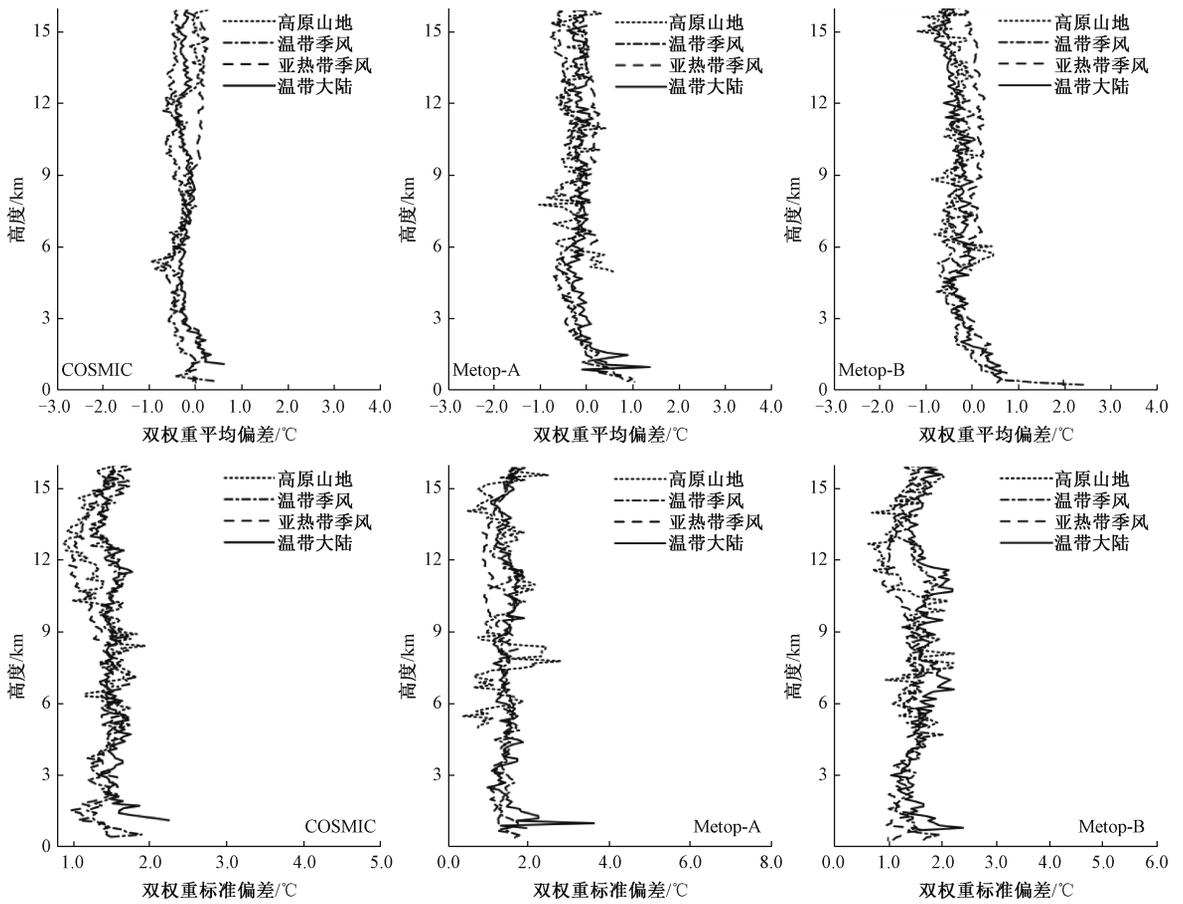


图 6 四个气候区 GNSS 掩星反演温度的双权重平均偏差和双权重标准偏差

Fig. 6 The double weighted mean deviation and double weighted standard deviation of GNSS inversion temperature in the four climate zones

3.5 质量控制前后 GNSS 掩星反演温度与探空温度之间相关系数的对比分析

经过上述质量控制之后,计算 GNSS 掩星反演温度与探空温度质量控制前后的相关系数,评估质量控制的效果。图 10 所示为温带季风气候区质量控制前、掩星自身质量控制之后和全部质量控制步骤之后的 GNSS 掩星反演温度与探空温度的相关系数,其他 3 个气候区结果相似(图略)。由图 10 可知,在质量控制之前,两者温度的相关性较差,有的层次相关系数在 0.5 以下,经过掩星自身质量控制之后,相关系数有了明显的提高,大部分的相关系数都在 0.8 以上,然后再经过与参考的一致性检验和可疑温度的判断之后,相关系数进一步提高,质量控制有了更好的结果,剔除了掩星反演温度中的错误温度,又保证了正确的温度数据能保留,验证了此方法的可靠性,使掩星反演温度可以更好的进行应用。

4 结论

本文将中国地区划分成 4 个气候区,采用双权重标准差法及设置相关系数阈值的方法,对 2014 年 1 月 1 日到 12 月 31 日的 COSMIC、Metop-A、Metop-B 三种 GNSS 掩星反演温度进行了质量控制,同时也跟传统标准差法进行了比较,并检验了质量控制的效果,结论如下。

1) 将中国区域根据气候特点,划分成温带大陆性气候区、温带季风气候区、亚热带季风气候区和高原山地气候区,消除了因气候差异导致数据偏差过大的影响,同时也根据 4 个气候区不同的气候特点划分不同的质量控制标准,使质量控制更加准确。

2) 传统方法统计的平均值和标准差更易受异常数据的影响,标准差要比双权重标准差大很多,从而导致正确温度阈值区间较大,错误数据标识不出。传统标准差法标识出的错误数据均可以由双权重标准差法标识出,且双权重法还能检测出传统法无法检测出的错误点,双权

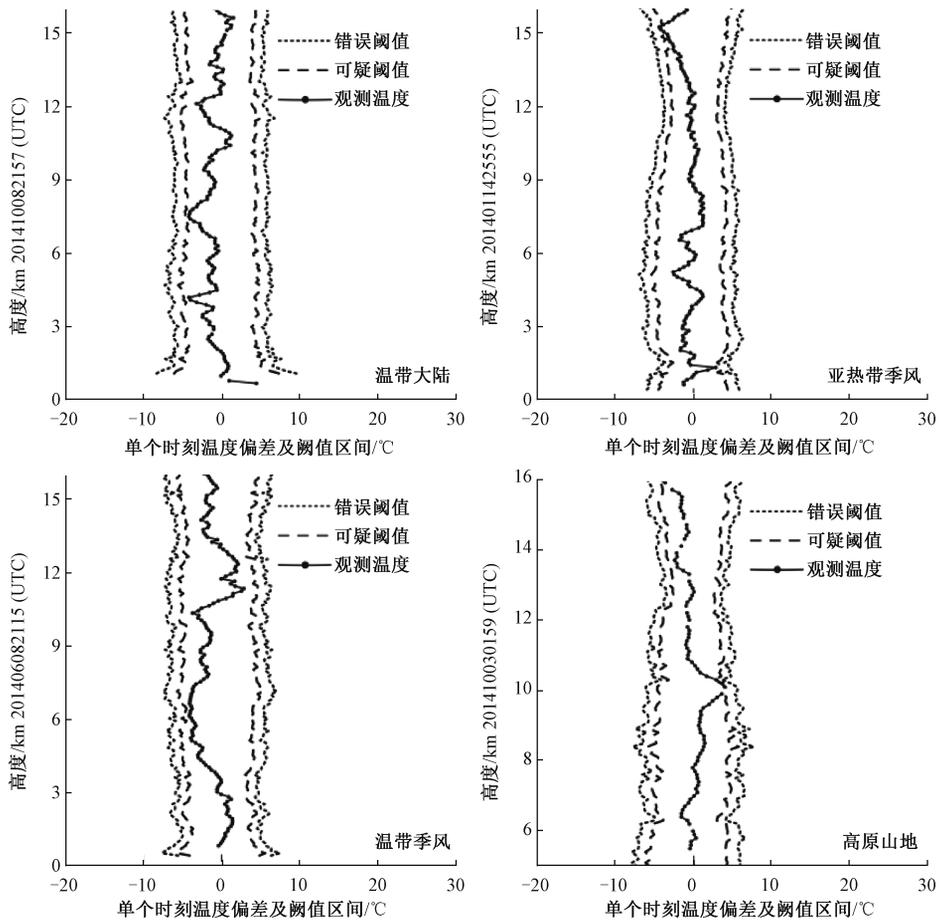


图 7 四个气候区 COSMIC 掩星单个时刻反演温度偏差及偏差的阈值区间

Fig. 7 COSMIC occultation temperature deviation at a single moment and threshold range of deviation in four climate zones

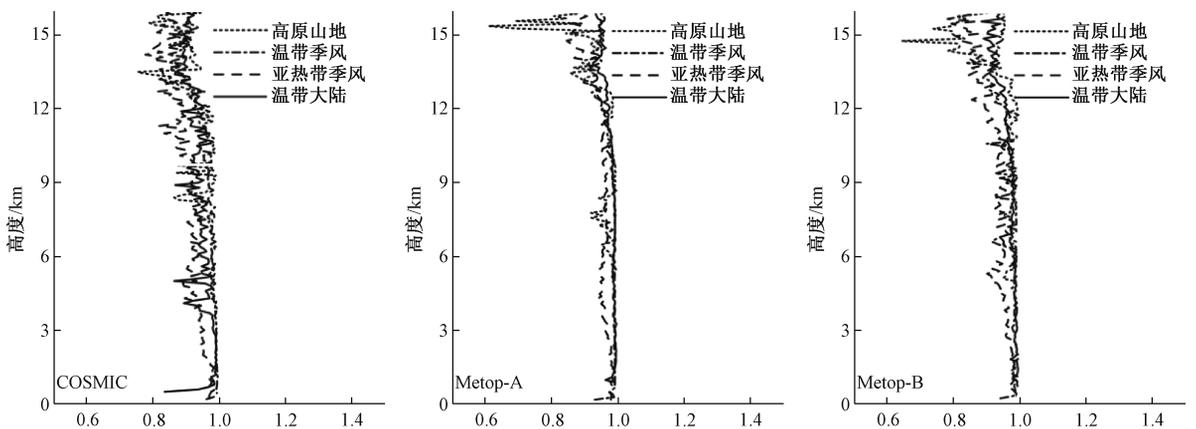


图 8 四个气候区 GNSS 掩星反演温度与探空温度相关系数的廓线分布

Fig. 8 Profile distribution of correlation coefficients between GNSS occultation temperature and sounding temperature in the four climate zones

重标准差法更为适用。

3) 可疑温度标识, 经过 4 个气候区 3 种掩星反演温度与探空温度相关系数的统计, 最终确定相关系数阈值为 0.860 9, 将相关系数 $\geq 0.860 9$ 层次上的可疑温度定

为正确温度, 否则, 判为错误温度。

4) 经过对比质量控制前后掩星反演温度与探空温度的相关系数, 在经过质量控制之后, 两者之间的相关系数得到了明显的提高, 质量控制之后相关系数接近 1, 相关

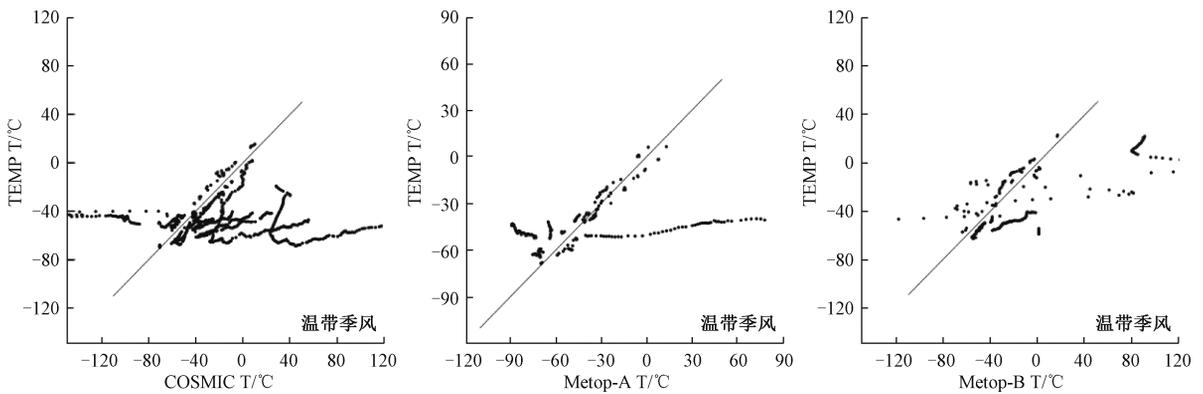


图9 三种掩星反演温度在温带季风气候区的错误数据分布,横坐标为掩星反演温度,纵坐标为探空温度(黑色实线为 $y=x$,黑色点为错误数据)

Fig. 9 Error data distribution of the three occultation inversion temperatures in the temperate monsoon climate zone, the abscissa is the occultation inversion temperature, the ordinate is the sounding temperature (the black solid line is $y=x$, and the black points are incorrect data).

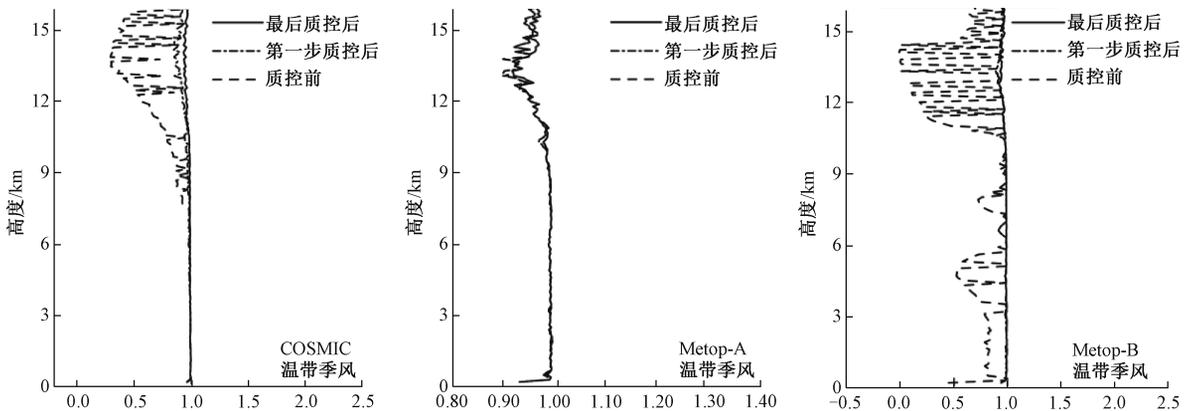


图10 温带季风气候区质量控制前后3种掩星反演温度与探空温度的相关系数

Fig. 10 Correlation coefficients between three occultation inversion temperatures and sounding temperatures before and after quality control in the temperate monsoon climate zone

性较好,质量控制效果较好。

本文选取了 GNSS 掩星反演温度中的 COSMIC、Metop-A、Metop-B 三种掩星反演温度作为样本进行质量控制,此方法同样也适用于我国 FY-3C、FY3D 掩星反演温度的质量控制,为 GNSS 掩星反演温度提供较为精细的质量控制方法,剔除数据中的错误数据,为天气分析、数值预报提供更加准确的观测资料。

参考文献

[1] 曹晓钟,郭启云,杨荣康. 基于长时平漂间隔的上下二次探空研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (2): 198-204.
CAO X ZH, GUO Q Y, YANG R K. Research of rising and falling twice sounding based on long-time interval of flat-floating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 (2): 198-204.

[2] 雷勇,郭启云,钱媛,等. L 波段雷达探空高度评估及其质量标识 [J]. 应用气象学报, 2018, 29 (6): 710-723.
LEI Y, GUO Q Y, QIAN Y, et al. Evaluation and quality mark of radiosonde geopotential height of L-band[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29 (6): 710-723.
[3] 郭启云,李峰,郭凯,等. 自动探空系统性能实验与评估 [J]. 电子测量技术, 2015, 38 (2): 10-15.
GUO Q Y, LI F, GUO K, et al. The evaluation of experiment and the performance of automatic sounding system [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38 (2): 10-15.
[4] 魏明明. 风速测量结果中关于水汽修正项的影响分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33 (6): 103-111.
WEI M M. Analysis of the influence of water correction

- term in wind speed measurement results [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(6):103-111.
- [5] 王肖伟, 项杰. GNSS 无线电掩星折射率数据的一维变分同化 [C]. 第 32 届中国气象学会, 2015, 32: 163-168.
WANG X W, XIANG J. One-dimensional variational assimilation of GNSS radio occultation refractive index data [C]. The 32nd China Meteorological Annual Meeting, 2015, 32:163-168.
- [6] 丁金才, 郭英华, 郭永润, 等. 利用 COSMIC 资料对 17 个台风热力结构的合成分析 [J]. *热带气象学报*, 2011, 27(1): 31-43.
DING J C, GUO Y H, GUO Y R, et al. The composite analysis of the thermal structure of 17 typhoon by using COSMIC data [J]. *Journal of Tropical Meteorological*, 2011, 27(1): 31-43.
- [7] 王树志, 朱光武, 白伟华, 等. 风云三号 C 星全球导航卫星掩星探测仪首次实现北斗掩星探测 [J]. *物理学报*, 2015, 64(8), 089301-1:089301-8.
WANG S ZH, ZHU G W, BAI W H, et al. For the first time fengyun3C satellite-global navigation satellite system occultation sounder achieved spaceborne Bei Dou system radio occultation [J]. *Acta Phys Sin.*, 2015, 64(8), 089301-1: 089301-8.
- [8] SHAO H. Assimilation of GPS radio occultation observation [D]. Florida: The Florida State University, 2005.
- [9] STEINER A K, LACKNER B C, LADSTADTER F, et al. GPS radio occultation for climate monitoring and change detection [J]. *Radio Science*, 2011, 46: RS0D24.
- [10] 宫晓艳, 胡雄, 吴小成, 等. GPS 测量误差对大气掩星反演精度影响分析 [J]. *地球物理学报进展*, 2008, 23(6): 1764-1781.
GONG X Y, HU X, WU X CH, et al. Analysis of the influence of GPS measurements error on inversion precision of atmospheric radio occultation [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(6): 1764-1781.
- [11] 陈婧亚, 许龙霞, 李孝辉. 接收机位置误差对 GNSS 定时的影响分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(6): 1458-1465.
CHEN J Y, XU L X, LI X H. Analysis of receiver position error impact on GNSS timing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(6): 1458-1465.
- [12] KUO Y H. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(5): 3-6.
- [13] ZOU X, ZHEN Z. A quality control procedure for GPS radio occultation data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, doi:10.1029/2005-JD005846.
- [14] 臧欣. COSMIC 掩星资料误差分析与质量控制 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
ZANG X. COSMIC radio occultation data error analysis and quality control [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012.
- [15] 胡雄, 曾祯, 张训械, 等. 大气 GPS 掩星观测反演方法 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 768-774.
HU X, ZENG ZH, ZHANG X X, et al. Atmospheric inversion methods of GPS radio occultation [J]. *Chinese Journal of Geophysical*, 2005, 48(4): 768-774.
- [16] 张大任, 郑静, 范军良, 等. 近 60 年中国不同气候区极端事件的时空变化特征 [J]. *中国农业气象*, 2019, 40(7): 422-434.
ZHANG D R, ZHENG J, FAN J L, et al. Spatiotemporal variations of extreme temperature indices in difference climatic zones of China over the past 60 years [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(7): 422-434.
- [17] WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation [R]. World Meteorological Organization, 2014.

作者简介



程凯琪, 2017 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 掩星数据的质量控制以及其在资料同化、数值预报方面的应用。

E-mail: qchengkai@163.com

Cheng Kaiqi received B. Sc. from Nanjing University of Information Science and Technology in 2017. Now she is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science and Technology. Her main research interests include quality control of GNSS occultation data and its applications in data assimilation and numerical prediction.



郭启云 (通信作者), 2004 年于兰州大学获得学士学位, 2007 年于中国气象科学研究院获得硕士学位, 现为中国气象局气象探测中心正研级高级工程师, 主要研究方向为探空、掩星等垂直观测质控及应用。

E-mail: feng_cloudy@163.com

Guo Qiyun (Corresponding author) received B. Sc. from Lanzhou University in 2004 and M. Sc. from Chinese Academy of Meteorological Sciences in 2007. His main research interests include quality control and application of GNSS occultation data, sounding and other vertical observation.