

钱媛,马旭林,郭启云,等,2019. 基于 FNL 和 GRAPES 分析场的探空温度数据的误差分析[J]. 气象,45(10):1464-1475. Qian Y, Ma X L, Guo Q Y, et al, 2019. Error analysis of sounding temperature data based on the FNL and GRAPES analysis fields [J]. Meteor Mon, 45(10):1464-1475(in Chinese).

## 基于 FNL 和 GRAPES 分析场的探空 温度数据的误差分析\*

钱媛<sup>1,2</sup> 马旭林<sup>1</sup> 郭启云<sup>2</sup> 杨荣康<sup>2</sup> 曹晓钟<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

**提 要:** 分别以美国 NCEP 的 FNL 分析场和我国 GRAPES 的分析场为参考对北京探空站的温度数据从观测余差、平均偏差、标准偏差、概率密度分布、峰度系数、偏度系数、相关系数和均方根误差多个角度进行评估。根据评估结果对探空温度数据进行质量控制, 并分析质量控制效果。结果显示: 探空温度数据质量较高, 误差基本在  $\pm 1^\circ\text{C}$  以内。基于 FNL 分析场的评估结果与 GRAPES 的评估结果有略微差异。单个时刻选取的可疑值和错误值的阈值具有根据基于分析场余差的分布特征自适应确定的特点。根据评估进行质量控制后的探空温度质量得到改善, 且数据保留了原有的特征。该质量控制方法能够有效地消除季节性差异, 且质量控制后两个参考标准的评估结果基本一致。

**关键词:** 探空温度, 误差分析, 质量控制

**中图分类号:** P413

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.013

## Error Analysis of Sounding Temperature Data Based on the FNL and GRAPES Analysis Fields

QIAN Yuan<sup>1,2</sup> MA Xulin<sup>1</sup> GUO Qiyun<sup>2</sup> YANG Rongkang<sup>2</sup> CAO Xiaozhong<sup>2</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Technology,  
Ministry of Education, Nanjing 210044

2 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

**Abstract:** Based on the FNL data of the United States NCEP and the analysis fields of Chinese GRAPES, the temperature data of Beijing sounder station are evaluated, including observation residuals, average deviations, standard deviations, probability density distributions, kurtosis coefficients, skewness coefficients, correlation coefficient and root mean square error. Then, the quality control of temperature data of sounding is conducted and the quality control effect is analyzed according to the evaluation results. The test results show that the sounding temperature is of good quality and the error is within  $\pm 1^\circ\text{C}$  basically. There is a slight difference between the evaluations of the FNL analysis and the GRAPES results. The threshold values of the suspicious value and error value selected at a single time can be determined by itself adaptively according to the characteristics of residual distribution based on the analysis fields. The quality of the sounding temperature is improved and the data retain the original characteristics after quality control.

\* 国家重点研发计划(2018YFC1506200、2018YFC1506201 和 2018YFC1506204)共同资助

2018 年 3 月 1 日收稿; 2018 年 9 月 28 日收修定稿

第一作者: 钱媛, 主要从事探空数据分析研究. Email: 15261820706@163.com

通信作者: 马旭林, 主要从事数值预报资料同化、集合预报的研究. Email: xulinma@nuist.edu.cn

according to the evaluation. The quality control method can effectively eliminate the seasonal difference and the evaluation results of the two reference standards are basically consistent after quality control.

**Key words:** sounding temperature, error analysis, quality control

## 引 言

高空气象观测(主要指探空观测)作为综合气象观测的重要组成部分,常用来表征大气物理状态的相对真值,描述高空大气的天气和气候变化(王英和熊安元,2015);不仅要满足天气分析和数值预报的需要,还要满足气候变化监测的需要(李伟等,2010;2011;郭启云和李伟,2013;刘超等,2017)。探空观测可以作为风廓线、GNSS/MET 水汽观测等高空遥感设备的相对比对参考标准(蔡兆男等,2009;彭艳秋等,2012;吴蕾等,2014;赵静等,2017),还可以作为评估卫星反演的大气温湿度廓线的基准应用于卫星资料的检验与评估(朱元竞等,1998;孙学金等,2004;杜明斌等,2009;王洪等,2010;徐桂荣等,2016)。国外在 20 世纪 90 年代已经开始研究如何利用高垂直分辨率探空资料分析小尺度天气结构特征,以及根据对流层高层和平流层低层的温度廓线进行谱分析(Hamilton and Vincent, 1995)。SPARC(Stratospheric Processes and Their Role in Climate)数据中心提供的高分辨率的探空资料(垂直分辨率约为 30 m),被用于研究分析重力波时空变化的谱特征,及热带对流系统质量通量和水汽收支的关系(Bell and Geller, 2008)。目前,探空观测温度资料的评估方法主要如下:一是观测对比分析:马颖等(2010)进行了 59 型与 L 波段探空仪温度和位势高度记录对比研究,通过这个研究来评估更新后的 L 波段探空数据温度和位势高度质量;赵世军等(2012)采用 Vaisala 和 RS92 探空仪同球施放比对法,对多天同一时次的探测数据进行统计,分析了 RS92 探空仪的温压湿探测性能。二是模式验证法,使用模式预报场或者分析场进行对比分析:以模式的预报场或者分析场为参考标准,求观测数据与参考标准的误差、误差的平均偏差、标准差等参数,通过这些参数评估观测数据质量(赵志强和李佳,2005;李平等,2013)。

目前,国内业务上使用的是 L 波段探空系统,它提供了密集的“秒级”数据,是一个能够获取高垂直分辨率廓线探空信息的平台。中国 120 个探空站点可连续自动测定高空温、压、湿、风等气象要素。

按照  $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  的升速计算,秒级数据垂直采样间隔约为 8 m,探测高度可达 10 hPa 即 35 km 左右(杨湘婧等,2011,田广元和张鹏亮,2011)。和传统的探空资料相比,L 波段秒级数据具有高分辨率、定位准确的特点,L 波段探空系统是目前唯一能对中国高空大气进行同时的、立体探测的系统,且探测数据可靠(郝民等,2014)。从 L 波段探空系统应用于业务至今,其秒级数据资料质量一直是国内外学者关注的重点(赵志强和李佳,2005;陶世伟等,2006;李峰等,2012)。已有结果都表明 L 波段秒级温度数据质量非常高,但是已有研究中对于探空数据的评估过程缺乏更全面深入的研究探讨,只从偏差、平均偏差和标准差三方面评估探空资料;此外,大多是定性的评估,没有通过统计参数确定一个定量的评估标准;而且大多没能根据评估结果进行质量控制。然而,这些方面都是资料应用中尤其值得关注和研究的重点。

本文将采用模式验证法来评估 L 波段秒级数据中的温度资料的质量,即基于 NCEP 的 FNL 分析场和中国 GRAPES 的分析场对探空数据中的温度进行误差分析,并根据评估结果对其进行质量控制,分析质量控制结果。

## 1 数据与方法

试验采用北京探空站(站号:54511)2016 年 7 月 1 日至 2017 年 6 月 30 日共一年的 L 波段探空秒级数据的温度资料为观测值,标记为 O;相同时间段美国 NCEP 的 FNL 分析场、我国 GRAPES 的分析场为参考,标记为 A。将一年数据分为春夏秋冬四个季节,首先将分析场的格点资料插值为站点资料,选择其北京站位置数据;然后根据分析场具有的等压面(FNL 资料共有 31 层等压面,从 1000~1 hPa;GRAPES 分析场共有 30 层等压面,从 1000~10 hPa)提取探空资料中相应等压面的数据;最后按照 00 时(UTC,下同)和 12 时分别进行误差分析。由于 FNL 分析场是从 1000~1 hPa,而 GRAPES 分析场是从 1000~10 hPa,所以在进行误差分析时分析范围选择 1000~10 hPa。

首先使用温度数据计算观测余差  $T_{\text{dv}} = O - A$ ,

然后计算每一个季节观测余差的平均偏差(dvavg)和标准偏差(std),得到每个季节每个等压面观测余差的概率密度分布(PDF)和对应的偏度系数(skew)与峰度系数(kurtosis),并得出每一个季节每个等压面  $O$  和  $A$  的相关系数( $r$ )和均方根误差( $s$ ),从多个角度一一分析探空数据中温度的误差分布特征。

在数学统计中,误差分布一般遵循正态分布(又称高斯分布)。根据正态分布的特征规律,统计学中规定与平均值的偏差超过两倍标准差的测定值称为异常值(即可疑值),与平均值的偏差超过三倍标准差的测定值称为高度异常的异常值(即错误值)。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;指定为检出错误值的显著性水平  $\alpha=0.01$ ,称为舍弃水平。因此,在处理数据时,应剔除错误值;可疑值是否剔除,视具体情况而定。由此,试验中将选择  $dvavg \pm 2std$  (该条件对应约 95.4% 的有效样本)作为单个时刻温度的可疑值阈值,  $dvavg \pm 3std$  (该条件对应约 99.7% 的有效样本)作为单个时刻温度的错误值阈值。

在进行质量控制时,首先根据错误值阈值将每个时刻温度的错误值订正,此次试验采取的订正方法是直接将错误值订正为分析场数据;然后根据相关系数和均方根误差等各个参数综合判断可疑值是订正还是保留。通过上述方法,对探空温度数据进行质量控制,并求解各个参数,以分析质量控制效果。

## 2 试验结果分析

### 2.1 单个观测时刻的观测余差分析

#### 2.1.1 基于 FNL 分析场的观测余差特征分析

以 FNL 分析资料为参考,对北京探空站 2016 年 7 月 1 日至 2017 年 6 月 30 日一年的 L 波段探空秒级数据的温度资料进行余差分析。由图 1a 可知,探空观测温度和 FNL 温度的趋势一致,逆温结构和一些小细节都有很好的跟随性;700 hPa 以下探空温度相对模式温度偏高,700~300 hPa 两者基本重合;300~10 hPa,探空温度以模式温度为轴,左右波

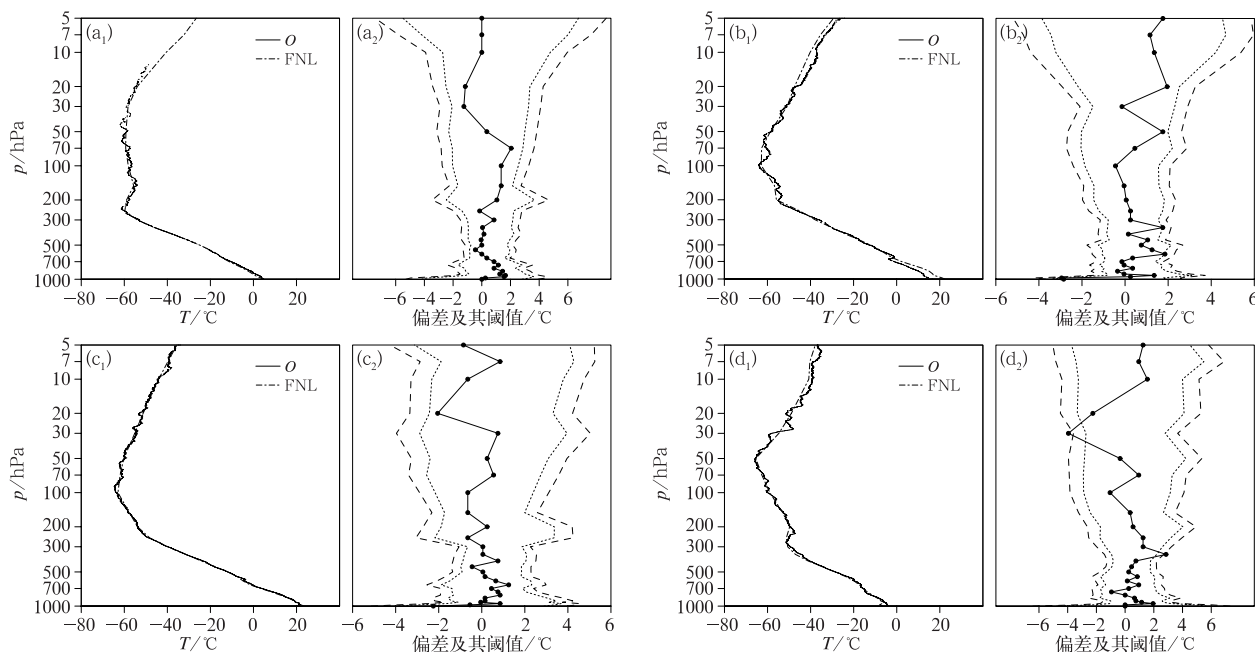


图1 00 时的 NCEP 模式和观测的温度一致性( $a_1, b_1, c_1, d_1$ ),偏差及其阈值( $a_2, b_2, c_2, d_2$ )

(观测余差:实线,错误点阈值:虚线,可疑点阈值:点线)

(a)2017 年 3 月 23 日,(b)2017 年 6 月 4 日,(c)2016 年 9 月 15 日,(d)2017 年 1 月 14 日

Fig. 1 Temperature consistency of NCEP model and observation ( $a_1, b_1, c_1, d_1$ ), deviation and its threshold ( $a_2, b_2, c_2, d_2$ ) (observed residual error: solid line, wrong value threshold: dashed line, suspicious value threshold: dotted line) at 00 UTC

(a) 23 March 2017, (b) 4 June 2017, (c) 15 September 2016, (d) 14 January 2017

动。观测余差主要集中在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,基本在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 之间。春季探空温度错误值和可疑值的阈值整体上有随高度增加而逐渐增大的趋势,在这个大趋势下,不断地有小波动,其中低层波动较多,高层相对平滑。分析图 1b~1d 发现,夏秋冬三季的探空温度特点和春季基本相似,其中冬季的温度一致性相比另外三个季节略差,且夏秋冬三季的阈值从低层至高层一直存在波动。12 时的探空温度质量(图略)与此类似。

### 2.1.2 基于 GRAPES 分析场的观测余差特征分析

以 GRAPES 的分析场为参考,对北京探空站 2016 年 7 月 1 日至 2017 年 6 月 30 日一年的 L 波段探空秒级数据的温度资料进行余差分析。由图 2a 可知,探空观测温度和 GRAPES 分析场温度的一致性较好,逆温结构和一些小细节都有很好的跟随性,相对基于 FNL 分析场的略有不同;低层探空温度偏高,中层探空温度和 GRAPES 的分析场温度基本重合,高层探空温度围绕 GRAPES 的分析场温度有小波动,波动相对基于 FNL 分析场略大。观测余差基本在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。整体上,和基于 FNL 分析资料的观测余差相比,基于 GRAPES 分析场的观测余差略大,这是一年中所有时刻的温度观测余差都存在的现象。此外,探空温度错误值和可疑值的阈值整体上有随高度增加先减小后逐渐增大的趋势,在这个大趋势下,不断地波动。以上是春季探空温度

的特征,夏、秋、冬三季存在相同的特征,其中冬季探空温度质量最差,图 2d<sub>1</sub> 体现两者之间的一致性较差,冬季图与此图类似的图大约有 1/3,右侧图中的观测余差廓线波动较大。12 时的探空温度质量(图略)与此类似。

综合一年中所有时刻的温度观测余差分析,无论以 FNL 还是以 GRAPES 为参考,都发现阈值存在同样的特点,即从低层到高层逐渐增大,整个过程存在小的波动。由此可以发现,由两倍标准偏差选择的可疑值和由三倍标准偏差选择的错误值是基于分析场余差分布特征,自适应确定的阈值,而不是固定的阈值。它综合考虑了单个季节内余差的整体特征,不是单纯的将偏差大的点选为错误点,而是基于综合的选择,从而准确地确定出真正的错误点和可疑点。此次分析由于单个时刻的图数量较多,春夏秋冬每季选取一张图进行展示。

## 2.2 探空温度资料质量的季节变化特征

### 2.2.1 基于 FNL 分析场的季节统计参数特征分析

按照春夏秋冬四季将一年的数据分段,分别计算以 FNL 资料为参考的观测余差的平均偏差和标准偏差。图 3 是 00 时各季节的温度平均偏差廓线和标准偏差廓线。由图可知,四个季节 00 时的平均偏差基本在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,以正偏差为主,负偏差极少,主要集中在 $0\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。说明探空温度数据质量较好,验

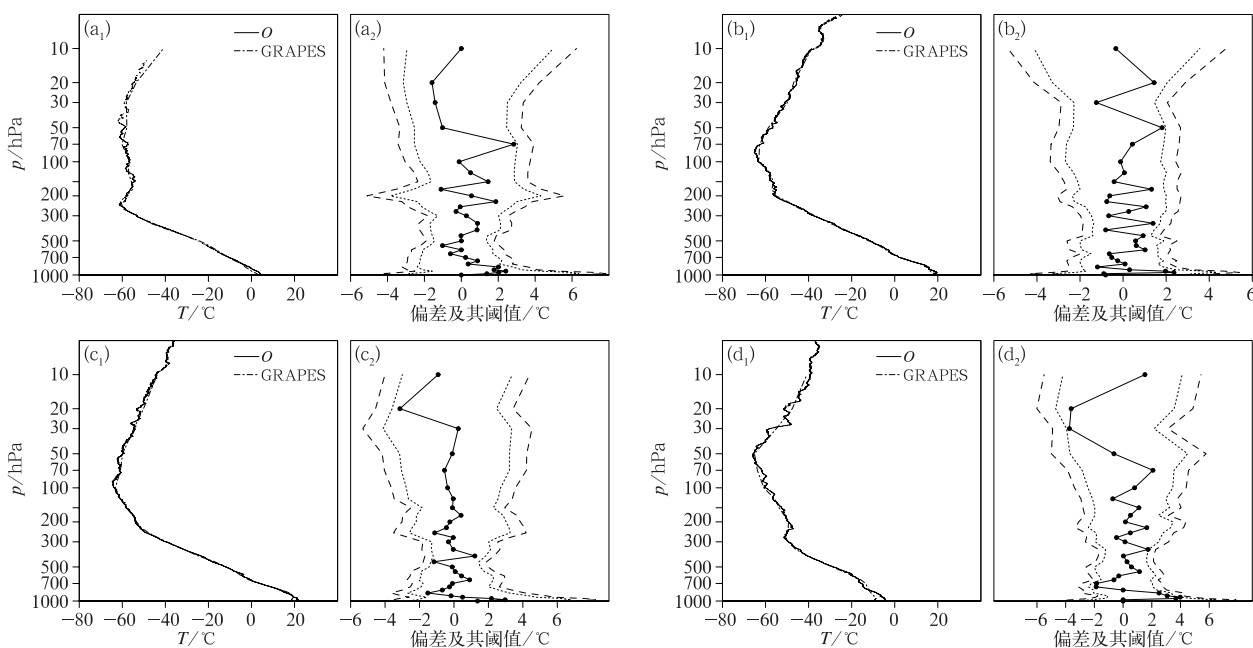


图 2 同图 1, 但为 GRAPES 模式

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the model of GRAPES

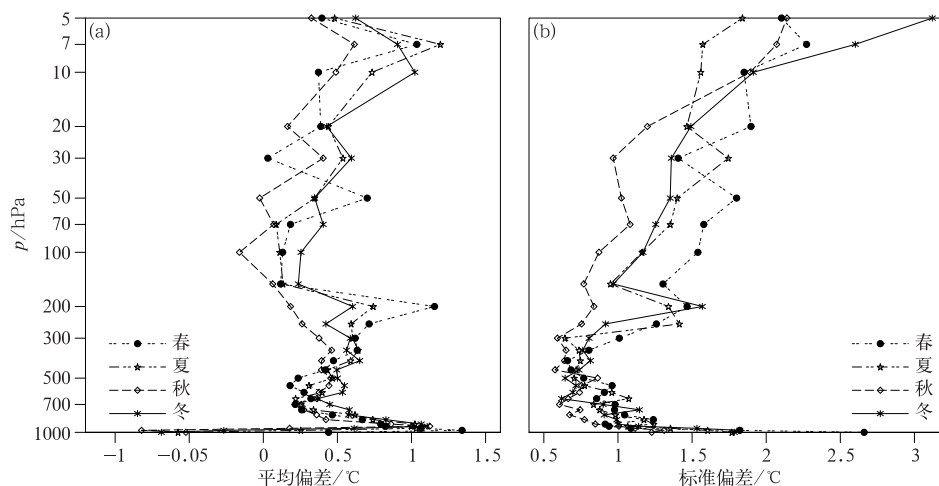


图 3 2016 年 7 月至 2017 年 6 月 00 时基于 FNL 的各季节温度平均偏差廓线(a)和标准偏差廓线(b)

Fig. 3 Average deviation profile (a) and standard deviation profile (b) of temperature based on FNL in the four seasons at 00 UTC from July 2016 to June 2017

证了其可以作为其他观测数据的评估标准的科学性。其中,1000 hPa 四个季节的平均偏差相差略大,有正有负,700~400 hPa 四个季节都基本集中在 0.5℃附近,整体上春季波动较大,剩余三个季节的平均偏差大部分集中在 0~0.5℃。00 时的标准偏差基本集中在 0.5~2℃,四个季节的标准偏差都存在随高度增加先减小后增加的趋势,整体上春夏秋季节的标准偏差较小且集中,冬季的标准偏差在高层突变,较大。说明观测余差在低层(900 hPa 及以下等压面)和高层(100 hPa 及以上等压面)相对分散,中层(900~100 hPa)相对集中。结合平均偏差一起分析可以得出结论,低层和高层的观测余差时大时小,较为分散,数据质量相对中层较差。和 00 时相比,12 时探空温度(图略)的不同之处有:平均偏

差主要集中在-0.5~0.5℃,负偏差较多,有明显的随高度增加观测余差从正值过渡到负值的情况。

利用概率密度分布(PDF)和与之相对应的峰度系数和偏度系数来描述基于 FNL 分析场的探空温度数据的观测余差分布特点。根据图 4 中四个季节 500 hPa(其余等压面图略)的概率密度分布发现,500 hPa 的观测余差基本集中在±2℃,极少的观测余差超过这个范围;从这个角度发现,秋季的观测余差最集中,其次是春冬两个季节,夏季分布相对分散。由 00 时四个季节各等压面概率密度分布图相对应的峰度系数和偏度系数(图 5)可以发现,四个季节的偏度系数基本集中在±1 范围内,夏季波动最大,春秋两季波动较小;峰度系数基本集中在 0~6,同样地夏季波动最大,春秋两季波动较小。

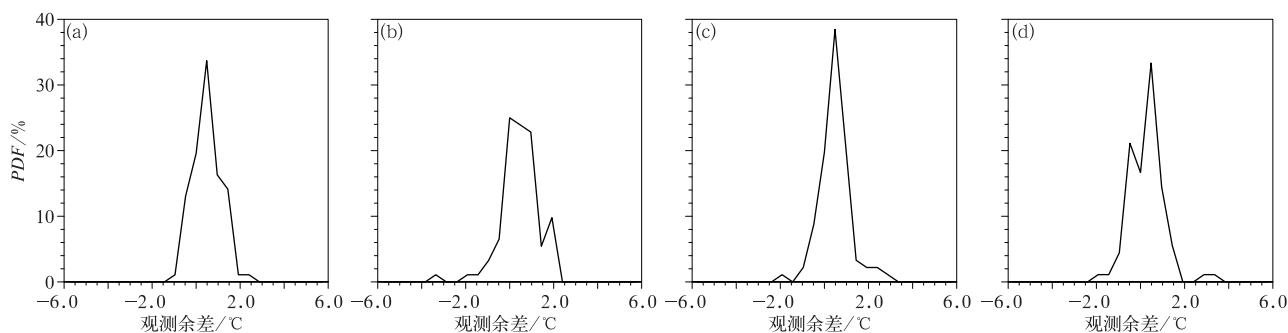


图 4 2016 年 7 月至 2017 年 6 月 00 时基于 FNL 的各季节 500 hPa 温度观测余差的概率密度分布

(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 4 Probability density distribution of the 500 hPa temperature observed residual error based on FNL in each season at 00 UTC from July 2016 to June 2017

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

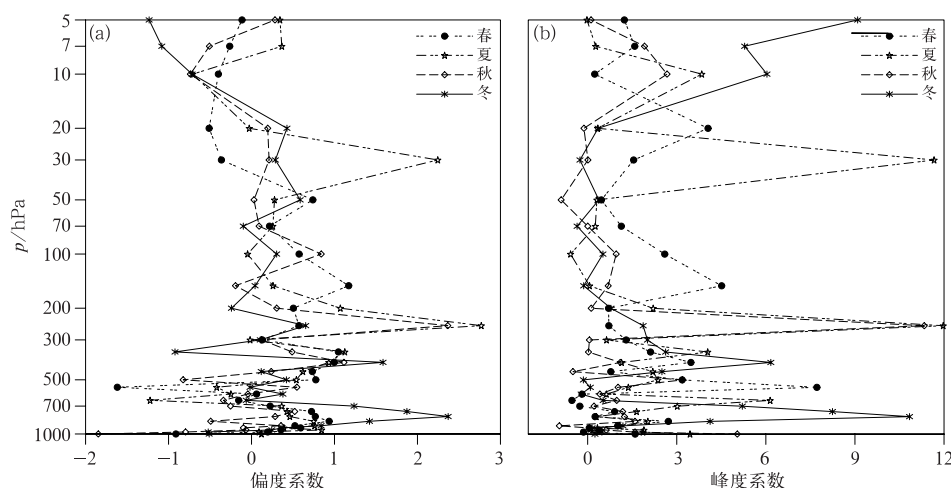


图 5 2016 年 7 月至 2017 年 6 月 00 时基于 FNL 的各季节偏度系数廓线(a)和峰度系数廓线(b)

Fig. 5 The profile of skewness (a) and the kurtosis coefficient (b) of the observed temperature deviation based on FNL in each season at 00 UTC from July 2016 to June 2017

将概率密度分布、峰度系数、偏度系数三者结合分析,可以发现秋季探空温度质量最高,夏季最差。

根据正态分布可知偏度系数和峰度系数(峰度系数在计算过程中已经减去 3)都为 0 最佳。通过统计这一年的数据,按照超过阈值的偏度系数占有偏度系数的 5%,确定偏度系数的阈值为  $\pm 1$ ;按照超过阈值的峰度系数占有峰度系数的 5%,确定峰度系数的阈值为  $\pm 3.5$ ;如果超过这个范围,认为该层数据存在问题,需要考虑订正这一层的可疑值。

利用分析场温度和探空观测温度的相关系数来评估探空温度质量(500 hPa 为例分析)。由评估散点图(图 6)发现,四个季节分析场温度和探空观测温度的变化趋势一致,其中,春秋两季一致性更高,夏季最低。分析四个季节所有等压面的相关系数发

现,观测温度和分析场温度两者的相关系数很高,基本都大于 0.95,只有极个别的等压面才会出现小于 0.90 的情况,说明探空温度数据质量较高。

经过统计计算后,按照超过阈值的相关系数占有所有相关系数的 5%,确定相关系数阈值为 0.95,如果出现小于 0.95 的相关系数,认为该层数据存在问题,需要考虑订正这一层的可疑值。

表 1 是 2016 年 7 月至 2017 年 6 月的 00 和 12 时各等压面的均方根误差,这里仅展示 1000、925、850、700、500 hPa。均方根误差可以用来衡量每层等压面中高空观测数据偏离模式数据的程度,从而评估探空温度质量。均方根误差越小,说明探空数据越靠近模式数据,探空数据质量越高。根据表 1 得出结论,各个等压面的均方根误差基本小于

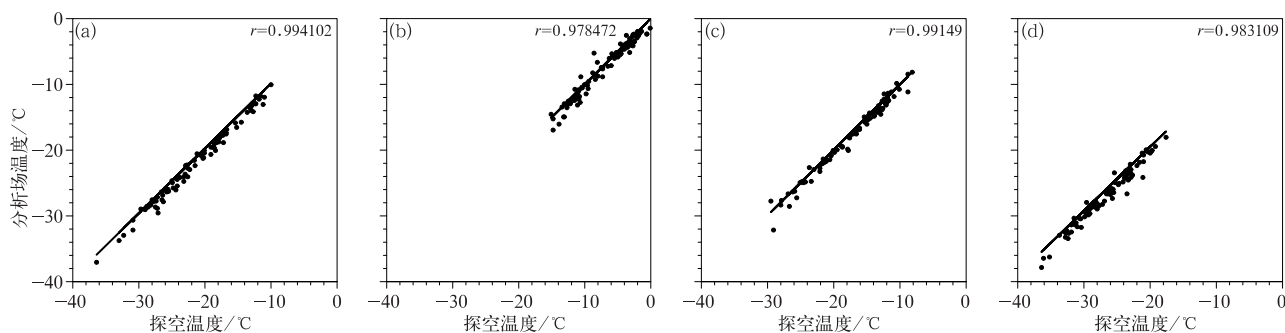


图 6 2016 年 7 月至 2017 年 6 月 00 时基于 FNL 的各季节 500 hPa 温度散点图  
(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 6 Temperature scatter diagram of 500 hPa based on FNL in each season at 00 UTC from July 2016 to June 2017  
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter



1.5℃,少数几个等压面超过1.5℃,说明温度数据质量较高。

经过统计计算后,按照超过阈值的均方根误差占全部均方根误差的5%,确定了均方根误差的阈值( $S$ ), $S \leq 1.5$ 认为数据质量较好, $S > 1.5$ 时认为该层数据存在问题,需要考虑对该层的可疑值进行订正。

以上所有季节参数选定的阈值都是根据超过阈值的参数占5%确定的,其中,统计样本为以FNL分析资料为参考,由一年365天,一天两个时次,一

次31个等压面的探空温度数据计算季节参数,共22630个样本。综合所有季节参数,基于FNL分析场对探空温度数据进行全面评估,其平均偏差基本在 $\pm 1^\circ\text{C}$ ,标准偏差在 $0 \sim 2^\circ\text{C}$ ;观测余差集中在 $\pm 2^\circ\text{C}$ ,有时左偏,有时右偏,偏度系数较小,余差相对集中;相关系数基本超过0.95,相关性高;均方根误差较小,探空温度基本和模式温度基本重合。整体上,四个季节中秋季质量最高,剩余三个季节不同的参数有不同的表现;从高度来看,中层温度质量最高,低层略差,高层最差。

表 1 2016 年 7 月至 2017 年 6 月的基于 FNL 资料的均方根误差(单位:℃)

Table 1 Root mean square error (unit:  $^\circ\text{C}$ ) based on the data of FNL from July 2016 to June 2017

	时间/UTC	1000 hPa	925 hPa	900 hPa	850 hPa	700 hPa	500 hPa
春季	00	1.90	1.58	1.46	1.29	1.00	0.81
	12	2.17	0.96	1.04	0.95	0.62	0.96
夏季	00	1.33	1.50	1.21	0.88	0.64	0.97
	12	1.45	0.88	0.90	0.77	0.62	0.70
秋季	00	1.85	1.46	1.60	1.38	0.84	0.84
	12	1.85	0.89	1.08	1.13	0.94	0.76
冬季	00	2.68	1.25	1.21	1.40	1.00	0.80
	12	2.73	1.16	1.16	0.84	0.95	0.74

2.2.2 基于 GRAPES 分析场的季节统计参数特征

图 7 是四个季节基于 GRAPES 分析场的探空温度平均偏差廓线和标准偏差廓线。由图 7a 可知,平均偏差基本在 $-0.5 \sim 1^\circ\text{C}$ ,以正偏差为主,负偏差略少,低层 925~850 hPa 四个季节的平均偏差都大于 $1.5^\circ\text{C}$ ;低层四个季节较为集中,300 hPa 以上相对分散,整体上夏秋季的平均偏差更小,春冬季较大;从平均偏差角度,基于 FNL 的平均偏差略小。

由图 7b 可知,标准偏差基本集中在 $0.75 \sim 2^\circ\text{C}$ ,四个季节的标准偏差都存在随高度增加先减小后增加的趋势,整体上和以 FNL 为参考的标准偏差相当;四个季节的标准偏差特征和平均偏差特征一致。平均偏差和标准偏差结合分析,基于 GRAPES 的探空温度特征相对基于 FNL 的相同,但余差略大。和 00 时相比,12 时(图略)的不同之处有:平均偏差随高度从正值向负值过渡,基本在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。

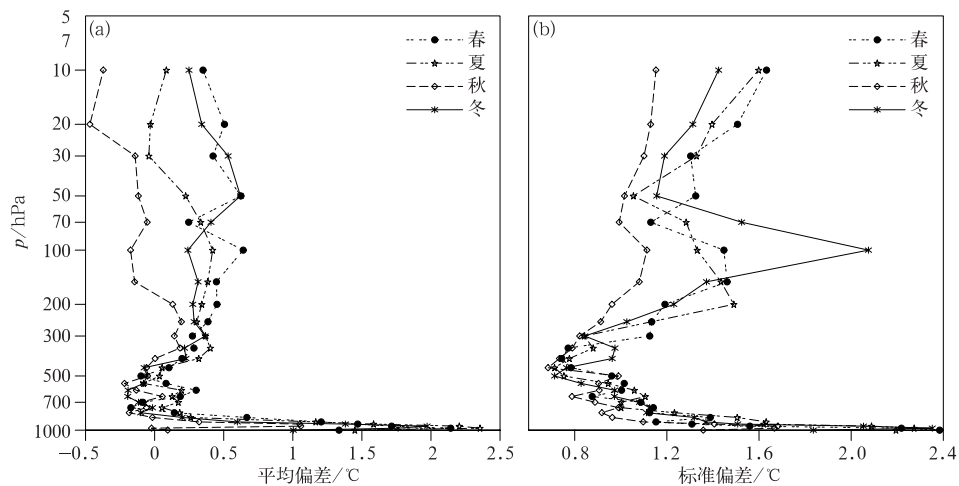


图 7 同图 3,但为以 GRAPES 分析场为参考

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for GRAPES analysis fields as reference

利用概率密度分布和与之相对应的峰度系数与偏度系数描述基于 GRAPES 的 12 时分析场的探空温度数据的观测余差分布特点。由图 8 发现, 500 hPa 的观测余差主要集中在  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  以内, 少数观测余差超过这个范围, 超过这个范围的观测余差和基于 FNL 的观测余差相当; 四个季节中, 冬季的观测余差最集中, 其次是春季, 夏秋季相对分散。根据图 9 进行分析, 发现偏度系数基本集中在  $\pm 1$  以内, 峰度系数基本集中在  $0\sim 6$ , 但两者的极端值比基于 FNL 分析资料的峰度系数和偏度系数的极端值略少。通过统计这一年的数据, 按照超过阈值的偏度系数占有偏度系数的 5%, 确定偏度系数的阈值为  $\pm 1$ ; 按照超过阈值的峰度系数占有峰度系数的 5%, 确定峰度系数的阈值为  $\pm 3.5$ ; 如果超过这个范围, 认为该层数据存在问题, 需要考虑订正这一层的可疑值。从这个角度和 FNL 分析场的评估结果相比, GRAPES 分析场的评估结果基本一致, 区别较小。

评估 GRAPES 分析场温度和探空温度的散点

图(图 10), 发现在 500 hPa, 两者的变化趋势一致, 其中春季最佳, 冬季最差。分析所有等压面的相关系数得出结论, 观测温度和参考温度的相关性较高, 基本大于 0.93, 说明探空温度数据质量较好, 但相对以 FNL 为参考, GRAPES 分析场的相关性略低。

经过统计计算后, 按照超过阈值的相关系数占所有的相关系数 5%, 确定相关系数阈值为 0.93, 若出现小于 0.93 的相关系数, 则认为该层数据存在问题, 需要考虑订正这一层的可疑值。

评估分析 GRAPES 分析场温度和探空温度的均方根误差系数(表 2), 这里仅展示 1000、925、850、700 和 500 hPa。发现所有等压面的均方根误差基本小于  $2.5^{\circ}\text{C}$ ; 且均方根误差呈现随高度增加先减小后增大的趋势, 说明探空温度质量随高度增加先增加后减小。

经过统计计算后, 按照超过阈值的均方根误差占全部均方根误差的 5%, 确定均方根误差的阈值,  $S \leq 2$  认为数据质量较好,  $S > 2$  时认为该层数据存

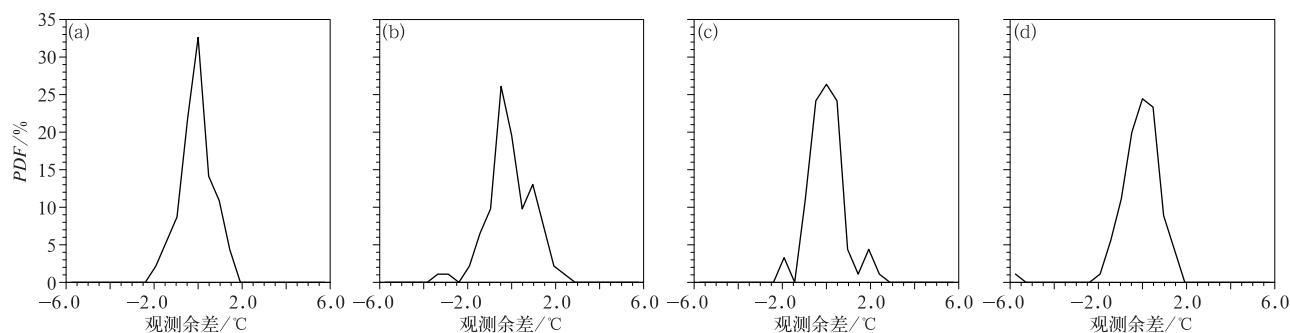


图 8 同图 4, 但为以 GRAPES 分析场为参考

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for GRAPES analysis fields as reference

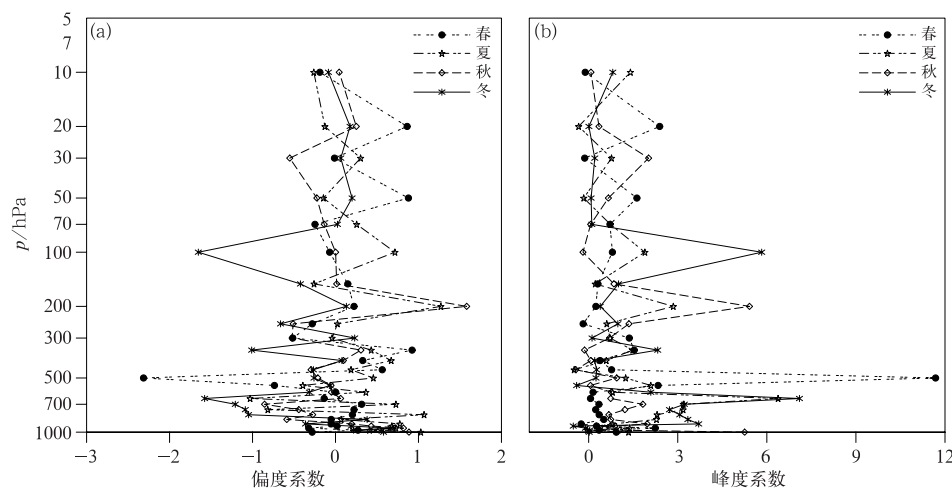


图 9 同图 5, 但为以 GRAPES 分析场为参考

Fig. 9 Same as Fig. 5, but for GRAPES analysis fields as reference



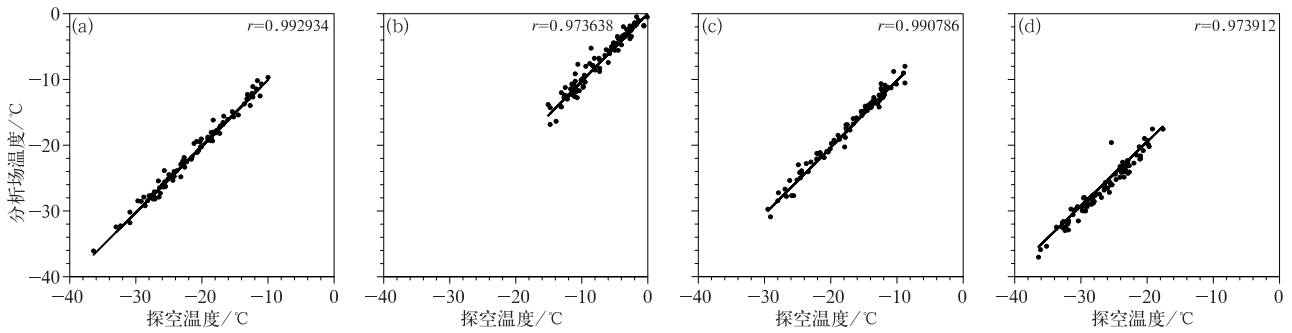


图 10 同图 6,但为以 GRAPES 分析场为参考

Fig. 10 Same as Fig. 6, but for GRAPES analysis fields as reference

表 2 同表 1,但为以 GRAPES 分析场为参考(单位:°C)

Table 2 Same as Table 1, but for GRAPES analysis fields (unit: °C)

	时间/UTC	1000 hPa	925 hPa	900 hPa	850 hPa	700 hPa	500 hPa
春季	00	2.08	2.04	1.49	1.33	1.08	0.71
	12	3.71	1.07	1.16	1.07	0.94	0.84
夏季	00	1.35	1.75	1.14	0.96	0.89	0.99
	12	1.86	1.05	0.96	0.90	0.80	0.85
秋季	00	2.62	2.26	2.00	1.52	1.01	0.75
	12	3.23	1.23	1.16	1.36	1.19	0.82
冬季	00	2.72	1.96	1.66	1.53	1.08	0.96
	12	3.32	1.29	1.10	1.03	1.13	0.76

在问题,需要考虑对该层的可疑值进行订正。从这个角度和 FNL 分析场的评估结果相比,两个分析场的评估结果区别略大。

以上所有季节参数选定的阈值都是根据超过阈值的参数占 5% 确定的,其中,统计样本为以 GRAPES 的 12 时分析场为参考,由一年 365 天,一天两个时次,一次 30 个等压面的探空温度数据计算季节参数,共 21900 个样本。综合所有季节参数,基于 GRAPES 分析场对探空温度数据进行全面评估,其平均偏差基本在  $-1\sim 2^{\circ}\text{C}$ ,标准偏差在  $0.75\sim 2.5^{\circ}\text{C}$  范围内;观测余差集中在  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ ,偏度系数较小,余差相对集中;相关系数基本超过 0.93;均方根误差较小,探空温度基本和模式温度基本重合。整体上,四个季节探空温度质量在不同的参数有不同的表现;从高度来看,中层温度质量最高,高低层略差。整体上,基于 FNL 分析场的评估结果和以 GRAPES 分析场为参考的评估结果略有不同,但大趋势一致。

### 2.3 质量控制后的质量分析

基于多元分析场对探空数据温度质量进行评估之后,对探空温度数据进行质量控制。首先是错误点的质量控制,根据错误值阈值将每个时刻温度的

错误值订正,试验采取的订正方法是将错误值订正为对应的参考数据;其次是可疑点的质量控制,根据上述过程中提到的各参数阈值对可疑点进行处理:若存在所有的参数都认为可疑的等压面,则将该等压面的可疑值进行订正;若只是被个别参数认为可疑的等压面,则该等压面的可疑点保留。经过质量控制之后,再求解各个季节参数,评估分析质量控制效果。得出结论,每一个季节参数都显示质量控制后温度数据质量得到改善,以 00 时的平均偏差和标准偏差为例进行展示分析。

#### 2.3.1 质量控制后单个时刻的质量分析

经过质量控制之后,评估单个时刻的余差分布(图 11),分析质量控制效果(列举前面提到的四个时刻)。由图可知,经过质量控制之后,无论是以 FNL 还是以 GRAPES 为参考,余差主要集中在  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  之间,整体上来说,相比于质量控制前,余差范围缩小,质量提高,不同分析场的评估结果趋于一致。以 2017 年 1 月 14 日为例详细分析单个时刻温度质量,首先,前面提到的错误点已被完全订正,其次,可疑点经过季节参数的排查部分保留了下来,整体上质量提到提高。同时,两个参考都存在个别偏差超过  $2.5^{\circ}\text{C}$  的点,考察具体的天气,这些点是由于某些小尺度系统造成的,这些系统在模式中容易

被忽略。这说明这种质量控制方法是确定真正的错误点进行订正,并不是单纯剔除偏差较大值。

### 2.3.2 质量控制后季节参数分析

图 12 是质量控制后的 00 时平均偏差廓线和标准偏差廓线。由图可知,经过质量控制后,平均偏差基本为正偏差,集中在  $0 \sim 1^\circ\text{C}$  以内,大部分在  $0 \sim 0.75^\circ\text{C}$ ;标准偏差基本在  $0.5 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 。整体上,相比质量控制前,平均偏差和标准偏差减小,四个季节的波动依然存在,但波动幅度变小,即四个季节的偏差更靠近,季节性余差变小,表明温度数据质量提高。同时,两条廓线随高度的变化趋势虽有所减小但依然存在,表明探空数据的特征仍然存在。

评估分析质量控制后以 GRAPES 的 12 h 分析场为参考的 00 时平均偏差廓线和标准偏差廓线(图 13)。发现经过质量控制后,平均偏差大部分为正偏差,集中在  $-0.5 \sim 1^\circ\text{C}$ ,标准偏差基本在  $0.5 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 。无论平均偏差还是标准偏差,都比质量控制前减小,表明温度数据质量改善。同时两条廓线随高度的变化趋势虽有所减小但依然存在,表明探空数据的特征被保留。

从这个角度分析,发现此时无论以 FNL 还是以 GRAPES 为参考,探空温度数据的评估结果基本一致,表明质量控制方法不仅能够有效地改善探空温度数据的质量,还保留数据特征,且质量控制后两个

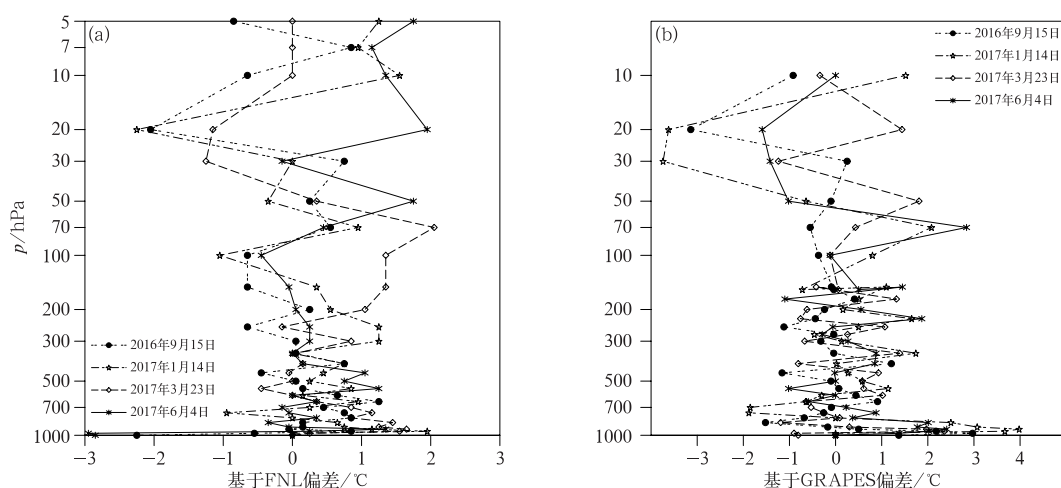


图 11 质量控制后 00 时单个时刻的偏差分布

(a)以 FNL 分析场为参考,(b)以 GRAPES 分析场为参考

Fig. 11 Distribution of deviations at a single time after quality control at 00 UTC

(a) analysis fields of FNL as the reference, (b) analysis fields of GRAPES as the reference

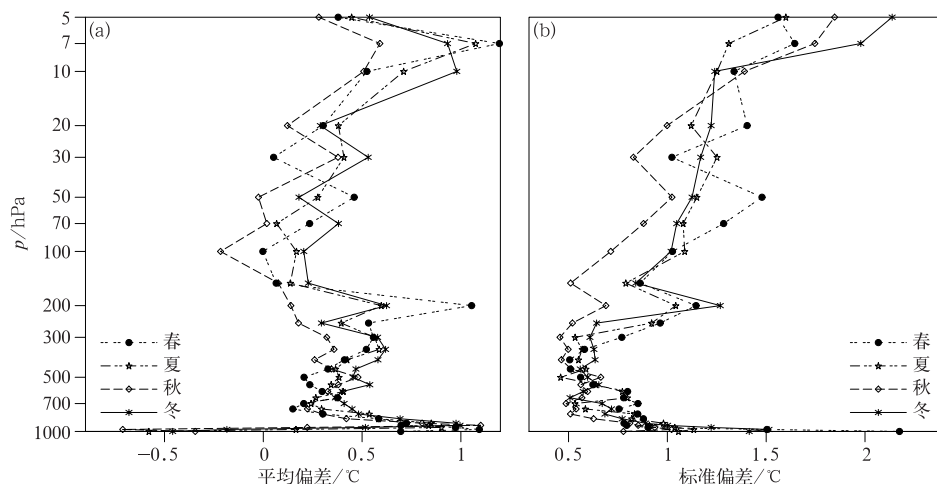


图 12 质量控制后 00 时基于 FNL 的各季节温度平均偏差廓线(a)和标准偏差廓线(b)

Fig. 12 The average deviation profile (a) and the standard deviation profile (b) of temperature based on FNL after the quality control in the four seasons at 00 UTC

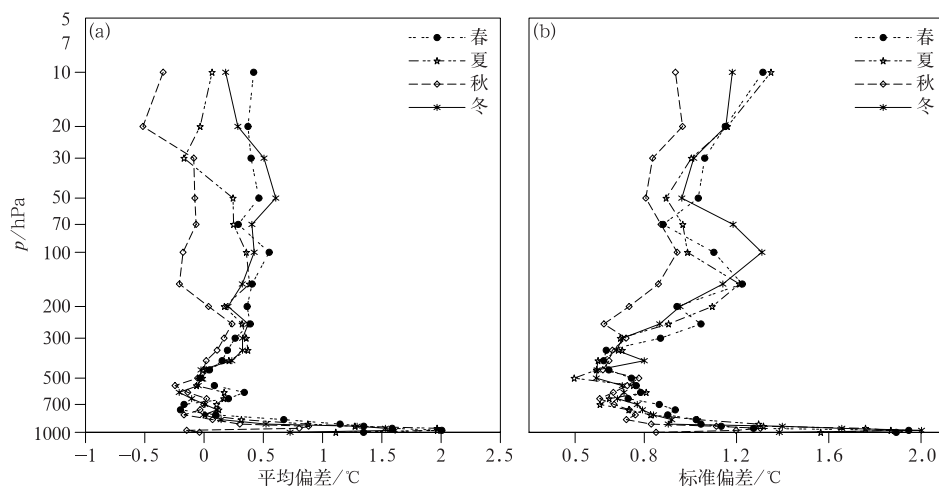


图13 同图12,但为以GRAPES分析场为参考

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for GRAPES analysis fields as reference

分析场的评估结果趋于一致。这说明试验采取的质量控制方法不是单纯的订正和参考差值大的数据,是根据基于分析场余差的分布特征,自适应确定的阈值来灵活地寻找真正的错误点进行订正。除平均偏差和标准偏差外,经过质量控制后的概率密度分布、峰度系数、偏度系数、相关系数和均方根误差也能得出这个结论,各个季节参数变得更接近于最佳状态,同时具有自己的特点。

### 3 结论与展望

本文分别以NCEP的FNL分析场和GRAPES的分析场为参考对北京探空站一年的温度数据从观测余差、平均偏差、标准偏差、概率密度分布、峰度系数、偏度系数、相关系数和均方根误差多个角度进行误差分析,得出以下结论:

(1) 从观测余差角度分析:无论是FNL还是GRAPES,探空温度的余差基本很小,主要集中在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内,00时以正偏差为主,12时随高度由正偏差过渡到负偏差。观测温度和分析场温度一致性较高,逆温层和一些细小的结构都有很好的跟随性。

(2) 季节参数角度分析:从平均偏差、标准偏差、概率密度分布、峰度系数、偏度系数、相关系数和均方根误差多个角度对余差的特点和分布特征进行分析评估,都显示出探空温度数据的质量较高,每一个参数都接近它们的最佳状态。整体上参数显示两个分析场的评估结果略有不同。

(3) 错误点和可疑点的阈值确定:选择 $\text{dvavg} \pm 2\text{std}$ 作为单个时刻温度的可疑值阈值, $\text{dvavg} \pm 3\text{std}$ 作为单个时刻温度的错误值阈值。这个选择不仅在

数学统计上具有意义,而且质量控制后各个参数的特征都显示出该阈值是根据基于分析场余差的分布特征,自适应确定的阈值,能够寻找出真正的错误点进行订正。

(4) 质量控制方法:首先根据错误值阈值将每个时刻温度的错误值订正;然后根据相关系数和均方根误差等各个参数综合判断可疑值是订正还是保留,所有的参数认为可疑的等压面,则订正对应等压面的可疑点,否则保留。经过质量控制方法进行质量控制后,无论是以FNL分析资料为参考,还是以GRAPES分析场为参考,探空温度资料的质量都得到改善,且数据保留了原有的特征。同时这种质量控制方法能够有效地消除季节性差异,质量控制后两个分析场的评估结果趋于一致。

**致谢:** 国家气象中心提供GRAPES分析场和美国NCEP提供FNL分析场资料,王金成在数据分析方面给予帮助,特此感谢。

### 参考文献

- 蔡兆男,王永, Liu X, 等, 2009. 利用探空资料验证 GOME 卫星臭氧数据[J]. 应用气象学报, 20(3): 337-345. Cai Z N, Wang Y, Liu X, et al, 2009. Validation of GOME ozone profiles and tropospheric column ozone with ozone sonde over China[J]. J Appl Meteor Sci, 20(3): 337-345(in Chinese).
- 杜明斌, 杨引明, 丁金才, 2009. COSMIC 反演精度和有关特性的检验[J]. 应用气象学报, 20(5): 586-593. Du M B, Yang Y M, Ding J C, 2009. Evaluation for retrieving precision and some merits of COSMIC data[J]. J Appl Meteor Sci, 20(5): 586-593(in Chinese).
- 郭启云, 李伟, 2013. L 波段雷达探空系统气压测量值与气压反算气压值的误差分析[J]. 气象水文海洋仪器, 30(1): 9-13. Guo Q Y, Li W, 2013. Error analysis between pressure measurement and pressure anti-calculation in L-band radar sounding system

- [J]. Meteor Hydrol Mar Inst, 30(1): 9-13(in Chinese).
- 郝民, 田伟红, 龚建东, 2014. L波段秒级探空资料在GRAPES同化系统中的应用研究[J]. 气象, 40(2): 158-165. Hao M, Tian W H, Gong J D, 2014. Study of L-band second level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system[J]. Meteor Mon, 40(2): 158-165(in Chinese).
- 李峰, 李柏, 吴蕾, 等, 2012. WMO第八届阳江国际探空比对辅助遥感综合试验[J]. 地球科学进展, 27(8): 916-924. Li F, Li B, Wu L, et al, 2012. An introduction of WMO 8th radiosondes inter-comparison and integrated remote instruments experiment[J]. Adv Earth Sci, 27(8): 916-924(in Chinese).
- 李平, 徐枝芳, 范广洲, 等, 2013. 探空温度资料质量控制技术研究[J]. 气象, 39(12): 1626-1634. Li P, Xu Z F, Fan G Z, et al, 2013. Study on quality control of radiosonde temperature[J]. Meteor Mon, 39(12): 1626-1634(in Chinese).
- 李伟, 张春晖, 孟昭林, 等, 2010. L波段气象探测网运行监控系统设计[J]. 应用气象学报, 21(1): 115-120. Li W, Zhang C H, Meng Z L, et al, 2010. The design of operation monitoring system for L-band upper-air meteorological sounding network[J]. J Appl Meteor Sci, 21(1): 115-120(in Chinese).
- 李伟, 赵培涛, 郭启云, 等, 2011. 国产GPS探空仪国际比对试验结果[J]. 应用气象学报, 22(4): 453-462. Li W, Zhao P T, Guo Q Y, et al, 2011. The international radiosonde intercomparison results for China-made GPS radiosonde[J]. J Appl Meteor Sci, 22(4): 453-462(in Chinese).
- 刘超, 花丛, 张恒德, 等, 2017. L波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. 气象, 43(5): 591-597. Liu C, Hua C, Zhang H D, et al, 2017. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer[J]. Meteor Mon, 43(5): 591-597(in Chinese).
- 马颖, 姚雯, 黄炳勋, 2010. 59型与L波段探空仪温度和位势高度记录对比[J]. 应用气象学报, 21(2): 214-220. Ma Y, Yao W, Huang B X, 2010. Comparison of temperature and geopotential height records between 59 type and L-band radiosonde systems[J]. J Appl Meteor Sci, 21(2): 214-220(in Chinese).
- 彭艳秋, 王卫国, 刘煜, 等, 2012. 利用不同资料研究我国大陆上空柱水汽含量[J]. 应用气象学报, 23(1): 59-68. Peng Y Q, Wang W G, Liu Y, et al, 2012. Total column water vapor over Chinese mainland based on different datasets[J]. J Appl Meteor Sci, 23(1): 59-68(in Chinese).
- 孙学金, 赵世军, 余鹏, 2004. GPS掩星切点水平漂移规律的数值研究[J]. 应用气象学报, 15(2): 174-180. Sun X J, Zhao S J, Yu P, 2004. Numerical study of the horizontal drift of the GPS signal ray's perigee in occultation event[J]. J Appl Meteor Sci, 15(2): 174-180(in Chinese).
- 陶士伟, 张跃堂, 陈卫红, 等, 2006. 全球观测资料质量监视评估[J]. 气象, 32(6): 53-58. Tao S W, Zhang Y T, Chen W H, et al, 2006. Monitoring and evaluation system of observation quality[J]. Meteor Mon, 32(6): 53-58(in Chinese).
- 田广元, 张鹏亮, 2011. 浅谈L波段探空秒数据资料在人工增雨中的应用[J]. 安徽农业科学, 39(20): 12328-12329, 12397. Tian G Y, Zhang P L, 2011. Shallow discussion about the application of L-band sounding seconds data in the artificial precipitation[J]. J Anhui Agric Sci, 39(20): 12328-12329, 12397(in Chinese).
- 王洪, 曹云昌, 肖稳安, 2010. COSMIC掩星数据与L波段探空数据的对比分析[J]. 气象, 36(9): 14-20. Wang H, Cao Y C, Xiao W A, 2010. Comparison between the COSMIC and the L-band radiosonde data[J]. Meteor Mon, 36(9): 14-20(in Chinese).
- 王英, 熊安元, 2015. L波段探空仪器换型对高空湿度资料的影响[J]. 应用气象学报, 26(1): 76-86. Wang Y, Xiong A Y, 2015. Effects of radiosonde system changing to L-band radar digital radiosonde on humidity measurements in China[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1): 76-86(in Chinese).
- 吴蕾, 陈洪滨, 康雪, 2014. 风廓线雷达与L波段雷达探空测风对比分析[J]. 气象科技, 42(2): 225-230. Wu L, Chen H B, Kang X, 2014. Comparison between wind profiler and L band upper-air meteorological sounding system[J]. Meteor Sci Technol, 42(2): 225-230(in Chinese).
- 徐桂荣, 乐新安, 张文刚, 等, 2016. COSMIC掩星资料反演青藏高原大气廓线与探空观测的对比分析[J]. 暴雨灾害, 35(4): 315-325. Xu G R, Yue X A, Zhang W G, et al, 2016. Comparison of atmospheric profiles between COSMIC radio occultation and radiosonde observations in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Torr Rain Dis, 35(4): 315-325(in Chinese).
- 杨湘婧, 徐祥德, 陈宏尧, 等, 2011. L波段探空高分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型[J]. 气象, 37(12): 1504-1510. Yang X J, Xu X D, Chen H Y, et al, 2011. The analysis and correlation model of the surface layer information in L band radiosonde high resolution profile[J]. Meteor Mon, 37(12): 1504-1510(in Chinese).
- 赵静, 曹晓钟, 代桃高, 等, 2017. 毫米波云雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象, 43(1): 101-107. Zhao J, Cao X Z, Dai T G, et al, 2017. Comparative analysis of cloud observed by millimeter wave cloud radar and sounding[J]. Meteor Mon, 43(1): 101-107(in Chinese).
- 赵世军, 苏小勇, 高太长, 2012. RS92探空仪温压湿测量性能分析[J]. 气象科技, 40(1): 31-34, 56. Zhao S J, Su X Y, Gao T C, 2012. Performance analysis of RS92 radiosonde for sounding temperature, pressure, and humidity[J]. Meteor Sci Technol, 40(1): 31-34, 56(in Chinese).
- 赵志强, 李佳, 2005. 用与初估场比较的方法分析L波段探空资料质量[C]//中国气象学会2005年年会论文集. 苏州: 中国气象学会. Zhao Z Q, Li J, 2005. Analysis of L-band sounding data quality by comparing with preliminary estimated fields[C]//Papers Collection of the 2005 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Suzhou: Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- 朱元竞, 李万彪, 陈勇, 1998. GMS-5估计可降水量的研究[J]. 应用气象学报, 9(1): 8-14. Zhu Y J, Li W B, Chen Y, 1998. Study of total precipitable water by GMS-5[J]. J Appl Meteor Sci, 9(1): 8-14(in Chinese).
- Bell S W, Geller M A, 2008. Tropopause inversion layer: seasonal and latitudinal variations and representation in standard radiosonde data and global models[J]. J Geophys Res, 113(D5): D05109.
- Hamilton K, Vincent R A, 1995. High-resolution radiosonde data offer new prospects for Research[J]. Eos Trans Amer Geophys Union, 76(49): 497-506.