

杨国彬,郭启云,舒康宁,等,2021.基于名单控制方法的探空测风数据质量分析[J].气象,47(6):727-736. Yang G B,Guo Q Y, Shu K N, et al, 2021. Quality analysis of the radiosonde wind observation data based on the list control method[J]. Meteor Mon, 47(6):727-736(in Chinese).

## 基于名单控制方法的探空测风数据质量分析\*

杨国彬<sup>1,2</sup> 郭启云<sup>2</sup> 舒康宁<sup>1</sup> 夏元彩<sup>2</sup>

1 云南省气象信息中心,昆明 650034

2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

**提 要:** 提出一种基于观测数据获取率、获取准时率、质量控制正确率和模式一致率的综合名单控制方法,使用 2019 年全国 120 个探空站测风数据对该方法进行验证,并对观测数据质量进行分析。结果显示:名单控制可以有效检查出观测数据存在问题的站点,名单站点观测数据相对于模式数据存在明显的系统性偏差,偏差和均方根误差相对于全国平均值都显著偏大。探空测风数据质量较好,四季风向、风速观测数据和模式数据较为一致,偏差分别在  $\pm 1^\circ$  和  $\pm 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  内;秋季风向一致性较好;夏季和冬季风速一致性低于春季和秋季;风向一致性春季和夏季随气压减小先减小后增大,秋季和冬季则相反;风速一致性随气压减小基本呈三峰型变化。

**关键词:** 名单控制,探空,风向,风速,质量分析

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.008

## Quality Analysis of the Radiosonde Wind Observation Data Based on the List Control Method

YANG Guobin<sup>1,2</sup> GUO Qiyun<sup>2</sup> SHU Kangning<sup>1</sup> XIA Yuancai<sup>2</sup>

1 Yunnan Meteorological Information Center, Kunming 650034

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

**Abstract:** A list control method is proposed, which considers the acquisition rate, acquisition punctuality rate, quality control accuracy rate and model consistency rate of observation data. The wind observation data of 120 radiosonde stations in 2019 are used to validate the method, and analyze the quality of observation data. The results are as follows. The stations with observation data problems can be effectively checked out by the list control method. Compared with the model data, the observation data of the list stations have obvious systematic deviation, and the bias and root mean square error (RMSE) are significantly larger than the national averages. The quality of radiosonde wind observation data is good, and the wind direction and wind speed observation data are relatively consistent with the model data in all the four seasons with the biases are within  $\pm 1^\circ$  and  $\pm 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. The wind direction consistency in autumn is the highest, and the wind speed consistency in summer and winter is lower than that in spring and autumn. The wind direction consistency first decreases and then increases with the decrease of pressure in spring and summer, while it is opposite in autumn and winter. The wind speed consistency basically changes

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

2020 年 5 月 26 日收稿; 2020 年 12 月 29 日收修定稿

第一作者:杨国彬,主要从事气象资料质量控制与应用研究. E-mail:yanggb\_ynu@163.com

通讯作者:郭启云,主要从事探空关键技术研究及应用. E-mail:feng\_cloudy@163.com

in a three-peak pattern with the decrease of pressure.

**Key words:** list control, radiosonde, wind direction, wind speed, quality analysis

## 引 言

探空观测可以定点定时进行高空气象数据的观测,受地物、地形及人类活动的影响较小,其数据是我国主要的气象数据类型之一(高山,2014);与各种遥测技术,如风廓线雷达相比(万蓉等,2011;吴志根等,2013;曲巧娜等,2016;王栋成等,2019),它具有探测精度高,探测距离远的特点(郭启云等,2018b;曹晓钟等,2019;胡炬等,2019)。探空观测数据常被用于检验数值预报、再分析和遥感探测产品(赵天保和符淙斌,2009;王金成等,2017;程凯琪等,2020;郭启云等,2020b),在科研、模式预报、天气分析、农业和各类气象服务之中发挥着重要的作用(吴泓锟等,2019;李芳芳等,2019;钱媛等,2019)。但由于电磁干扰、仪器变性、信号突失、下沉气流和仪器故障等情况会造成探空观测数据异常,而探空观测数据质量会直接影响到数据应用的效果,因此,在数据使用前需对其进行必要的质量控制(中国气象局,2010)。

大气风场资料是天气演变分析中最直观和最有价值的资料之一(周长艳等,2015),根据大气风场的演变,尤其是高空风,可以了解中小尺度强对流天气发生发展的某些重要物理过程(张培昌等,2001;陈鹏等,2015;王丽吉和杨程,2018;李金辉等,2020),比如高空槽脊的位置,高、低空急流的强度和深度,冷、暖平流的分布等;高空分辨率和高精度的风场观测数据能够有效提高数值天气预报准确性,对提高强对流生成发展趋势预报能力有重要的意义(李娟等,2016);此外,通过对高空风的研究,可以为风电开发企业和政府可持续开发利用风能资源提供很多参考(孟丹等,2019)。而探空测风是业务和科研主要高空风观测手段之一(董新宁等,2017),因此,探空测风数据的质量一直是众多学者关注的重点,国内外已有很多机构和学者采用不同方法对探空测风数据进行质量控制(Durre et al,2006;Liao et al,2014;Houchi et al,2015;廖捷和周自江,2018;王丹等,2020)和质量评估(郭启云等,2018a)。

目前,我国针对探空测风数据的质量控制主要包括不同高度层的风速允许值范围检查和水平风场的垂直切变检查等(汪万林等,2011;Liao et al,

2014),或者通过模式预报场的评估结果进行质量控制(郭启云等,2020a)。黑名单检查可以剔除与背景场差异较大的观测站点(White,2003;St-James and Laroche,2005),但是目前针对探空观测数据的黑名单通常来自和观测数据质量相关的一些先验信息,或者通过分析质量控制结果、比较观测和背景场的偏差等方式来确定(庄照荣等,2014)。现有对于探空观测数据的名单控制方法的研究存在定性化、判断依据单一等问题,本文旨在提出一种基于观测数据获取、常规质量控制和背景场检查的综合观测数据名单控制方法,据其将观测站点分别列入黑、黄、白名单,从而为数据用户提供参考;使用2019年全国探空测风数据对名单控制方法进行验证,并对2019年全国探空测风数据进行质量分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 数 据

从全国综合气象信息共享平台(China Integrated Meteorological Information Service System, CIMISS)(熊安元等,2015)获取经过国、省、台站三级质量控制的带有质量控制码的2019年1月1日至12月31日119个(全国探空站共120个,沈阳站2019年4月1日起停止提供数据)探空站每天两个时次(00和12 UTC,下同)的探空测风数据。通过对质量控制结果的统计(表1)发现,2019年全国探空测风数据质量较好,各月正确数据占比均大于98%,数据缺测是探空测风数据存在的主要问题,可疑和错误均较少,部分月份会对数据进行修改。

模式背景场资料采用相同时段的中国气象局数值预报中心研发的全球与区域同化预报系统(Global-Regional Assimilation and Prediction System, GRAPES)的东北半球区域中尺度预报产品GRAPES\_GFS v2.0(张萌等,2019),空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,垂直方向从1000~10 hPa,共26层;本文使用的是每个观测时次前一时次的12 h预报产品与观测数据进行对比分析。

在名单站点分析中引入欧洲中期数值预报中心(European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts, ECMWF, 简称 EC) 东北亚地区高分辨率数值确定性预报产品进行对比分析, 该数据空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 垂直方向从 925~10 hPa, 共 19 层, 无 30 hPa 等压面。

参照日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA) 对探空测风数据的评估标准 (<http://qc.kishou.go.jp/>) 进行观测数据粗大误差的剔除, 风速涉及的标准等压面包括 1000、925、850、700、500、400、300、250、200、150、100 hPa, 风向涉及的标准等压面包括 500、400、300、250、200、150 hPa, 基于上述标准等压面数据展开研究。

表 1 逐月不同质量控制结果数据占比 (单位: %)

Table 1 Monthly data proportion of different quality control results monthly (unit: %)

月份	质量控制码				
	0	1	2	4	8
1	98.29	0.19	0.05	0.00	1.47
2	98.19	0.15	0.05	0.00	1.61
3	98.23	0.25	0.06	0.04	1.43
4	98.30	0.25	0.01	0.05	1.39
5	98.31	0.21	0.02	0.01	1.45
6	98.50	0.18	0.02	0.02	1.29
7	98.42	0.20	0.01	0.01	1.36
8	98.24	0.24	0.01	0.00	1.51
9	98.16	0.30	0.01	0.02	1.52
10	98.38	0.18	0.01	0.43	1.00
11	99.42	0.00	0.02	0.00	0.56
12	99.42	0.00	0.02	0.00	0.57
平均	98.49	0.18	0.02	0.05	1.26

注: 0—数据正确, 1—数据可疑, 2—数据错误, 4—数据修改, 8—数据缺失。  
 Note: 0—data right, 1—data suspicious, 2—data error, 4—data modified, 8—data missed.

### 1.2 方法

基于 CIMISS 探空测风数据获取量、数据获取时间和数据质量控制码等有关信息计算观测数据获取率、获取准时率和质量控制正确率, 并基于观测数据与 GRAPES 模式预报数据的偏差和均方根误差计算模式一致率。定义综合观测数据质量指数为  $R$ , 则:

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i R_i \quad (1)$$

式中:  $R_i$  为数据质量因子,  $n$  为质量因子总数, 取值  $n=4$ ,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  分别为观测数据获取率、获取准时率、质量控制正确率和模式一致率;  $\omega_i$  为各质量因子对应的权重系数,  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ , 观测数据质量

控制正确率和模式一致率是观测数据质量重要指标, 是本文关注的重点, 而观测数据获取率和获取准时率是业务管理的范畴, 在本文只是综合考虑, 所给权重较低, 因此取  $\omega_1 = \omega_2 = 0.1$ ,  $\omega_3 = \omega_4 = 0.4$ 。则式(1)可具体为:

$$R = 0.1R_1 + 0.1R_2 + 0.4R_3 + 0.4R_4 \quad (2)$$

某站点某观测时次,  $R_1$  为实际从 CIMISS 获取的数据总量与应该获取的数据总量的比率, 只要任意从 CIMISS 获取到该站任意标准等压面的观测数据, 则认为数据获取成功;  $R_2$  为每个观测时次之后 120 min 内获取的数据总量与实际获取的数据总量的比率;  $R_3$  为标准等压面上质量控制码为 0 (数据正确)、4 (数据为修改值) 的数据总量与实际获取的数据总量的比率。

#### 1.2.1 模式一致率

以 GRAPES 模式预报产品作为背景场数据, 通过计算观测数据与背景场数据的偏差 (Bias) 和均方根误差 (RMSE), 根据偏差小于阈值的比例计算出对应的模式一致率  $R_4$ 。具体计算步骤如下:

若某时次某一标准等压面上, 某探空站点观测数据为  $O$ , 背景场数据为  $B$ , 则观测偏差为:

$$Bias = O - H(B) \quad (3)$$

式中:  $H$  为观测算子, 即通过水平和垂直的空间插值将格点上的背景场数据插值到站点。

某站点  $j$  观测数据与背景场数据的均方根误差为:

$$RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Bias_k^2} \quad K = 1, \dots, M \quad (4)$$

式中:  $M$  为计算时段内, 第  $j$  个观测站点某一标准等压面的观测数据总量, 则所有观测站点的平均均方根误差为:

$$\overline{RMSE} = \frac{\sum_{j=1}^N RMSE_j}{N} \quad j = 1, \dots, N \quad (5)$$

式中:  $N$  为观测站点总量。

将  $\alpha \overline{RMSE}$  作为观测数据与模式数据一致与否的判断阈值, 系数  $\alpha$  根据多次试验确定, 本文参照庄照荣等 (2014) 的研究, 取  $\alpha = 2$ 。则模式一致率可以表示为:

$$R_4 = \frac{\sum_{l=1}^{L'} n_l}{\sum_{l=1}^L n_l} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\sum_{l=1}^{L'} n_l$  为  $|\overline{Bias}| < 2 \overline{RMSE}$  的标准等压面总层数,  $\sum_{l=1}^L n_l$  为某站点总的标准等压面层数。

### 1.2.2 名单控制标准

通过上述方法计算各探空站在每个观测时次的观测数据质量因子,进行月平均,再根据式(2)计算得到各个站点的月平均综合观测数据质量指数  $R$ ,根据表 2 中的名单控制标准(相关界限值通过一年的数据多次试验得出,能够较好地控制不同名单站点的比例),将各观测站点列入不同的名单。站点若被列入黑名单,则认为其观测数据可能存在较为严重的错误;若被列入黄名单,则认为其观测数据可能存在错误;若被列入白名单,则认为其观测数据正确。

表 2 各站点观测数据名单控制标准  
Table 2 List control standard for observation data of each station

综合观测数据质量指数	名单
$R \leq 75\%$	黑名单
$75\% < R \leq 85\%$	黄名单
$R > 85\%$	白名单

### 1.2.3 质量分析指标

衡量任意两个气象要素之间关系密切程度的统

计量是相关系数,对于观测数据( $O$ )与背景场数据( $B$ )的相关系数计算公式为:

$$r(O, B) = \frac{Cov(O, B)}{\sqrt{Var(O)Var(B)}} \quad (7)$$

式中: $Cov(O, B)$ 为观测数据与背景场数据的协方差; $Var(O)$ 、 $Var(B)$ 分别为观测数据与背景场数据的方差。相关系数越大,说明该层等压面的观测数据和背景场数据相关程度越大,数据一致性越高,本文采用  $t$  检验法来对相关系数进行显著性水平检验。

## 2 结果和分析

### 2.1 名单控制结果

通过对 2019 年全国探空站点风向和风速分别进行名单控制,结果显示,2019 年全国探空站点风向和风速观测数据质量均较好,所有站点风速逐月综合观测数据质量指数均大于 85%,无任何站点被列入黑、黄名单;由图 1 可知,56146 站风向 1 月被列入黄名单、2—3 月被列入黑名单,其他月份所有站点风向综合观测数据质量指数均大于 90%。

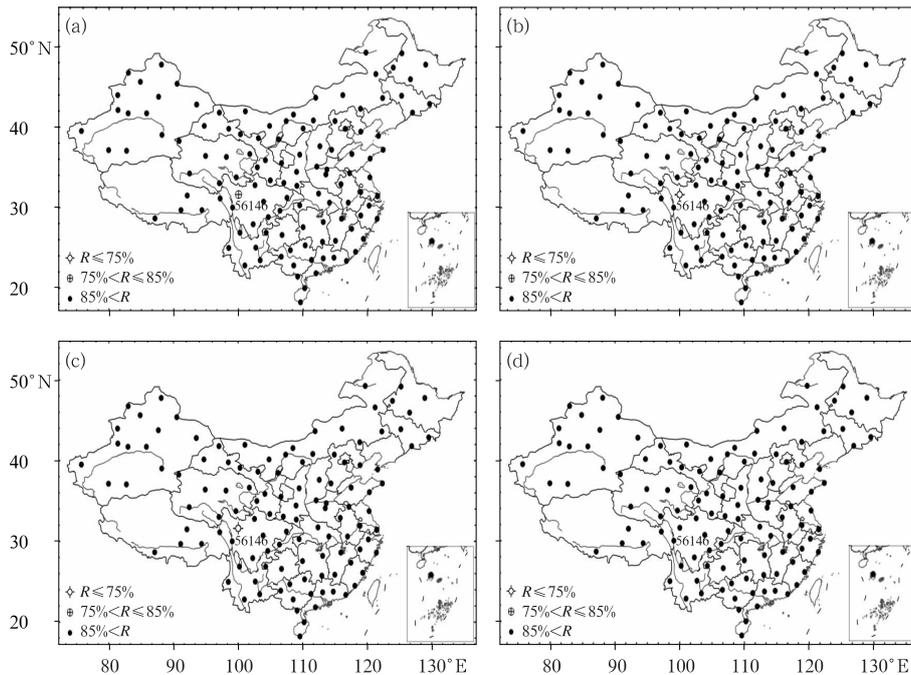


图 1 2019 年 1 月(a), 2 月(b), 3 月(c), 4 月(d)风向名单控制结果

Fig. 1 The results of wind direction list control for January (a), February (b), March (c) and April (d) 2019

### 2.2 名单站点分析

表 3 给出了 56146 站 2019 年逐月质量因子和综合观测数据质量指数。由表 3 可知,1—3 月该站风向观测数据模式一致率  $R_4 < 70\%$ , 这是由 300 hPa 以上部分等压面偏差超过阈值造成的(图 2a),从而导致综合观测数据质量指数  $R < 85\%$  而被列入黄、黑名单。

从 56146 站 1—4 月风向观测数据与 EC、GRA-

PES 模式数据平均偏差的垂直分布(图 2b)可以看出,该站风向观测数据相对于两种模式数据均偏小,200 hPa 及以上等压面观测数据相对于 EC 和 GRAPES 模式数据的偏差均超过阈值,因而可以确定为观测数据异常造成偏差较大,导致模式一致率较低。因为该站 2 月和 3 月连续出现在黑名单中,对其进行了跟踪反馈,经与台站核实,判定为 L 波段测风雷达标定存在问题造成数据异常,4 月重新对雷达进行找北标定后,观测数据不再有问题,5 月

表 3 56146 站 2019 年逐月质量因子和综合观测数据质量指数(单位:%)  
Table 3 Monthly quality factor and comprehensive observation data quality index at Station 56146 in 2019 (unit: %)

月份	$R_1$	$R_2$	$R_3$		$R_4$		$R$	
			风向	风速	风向	风速	风向	风速
1	100	96.80	96.48	96.48	66.67	100	84.94	98.27
2	100	96.77	98.09	98.09	33.33	100	72.25	98.91
3	100	100	99.60	99.60	33.33	100	73.17	99.84
4	100	96.67	98.33	98.33	83.33	100	92.33	99
5	100	100	100	100	100	100	100	100
6	100	100	99.55	99.55	100	100	99.82	99.82
7	100	100	100	100	100	100	100	100
8	100	100	100	100	100	100	100	100
9	100	98.33	98.03	98.03	100	100	99.05	99.05
10	100	83.61	98.03	98.03	100	100	97.57	97.57
11	100	100	100	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100	100	100	100

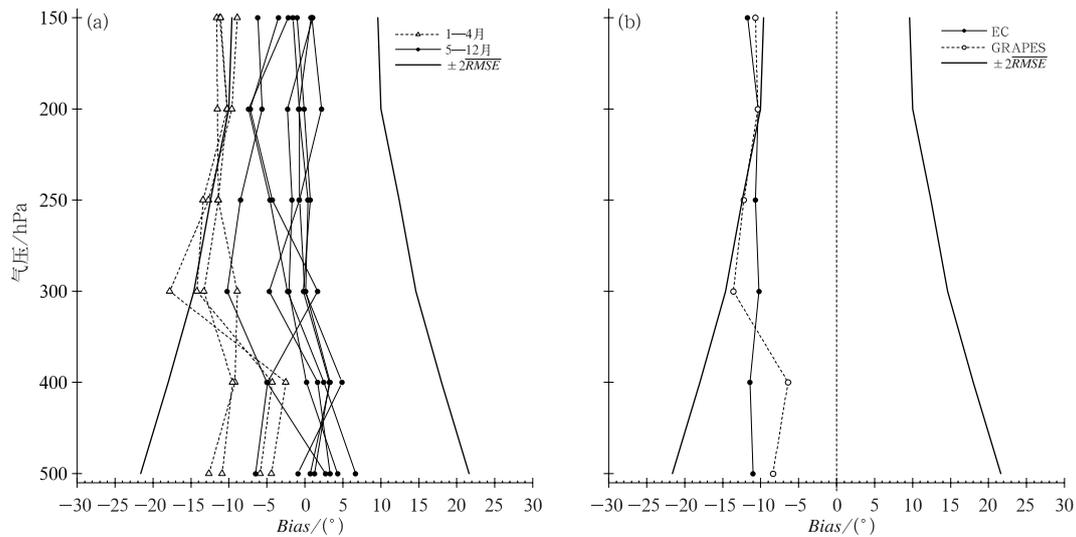


图 2 56146 站观测数据与 GRAPES 模式数据逐月偏差(a)和 1—4 月观测数据与 EC、GRAPES 模式数据平均偏差(b)

Fig. 2 The monthly Bias between observation data and GRAPES mode data (a) and average Bias between observation data and EC and GRAPES model data from January to April (b) at Station 56146

以后风向观测数据模式一致率  $R_i$  均为 100% (表 3)。这表明,本文提出的名单控制方法可以有效检查出观测数据存在问题的站点,对名单站点进行跟踪解决后可以有效提高观测数据质量。

为进一步分析名单站点与全国所有站点平均结果的差异,图 3 分别给出了不同等压面 56146 站和全国平均偏差和均方根误差,由图可知,所有等压面 56146 站偏差相对于全国平均值偏差大于  $10^\circ$ ,均方根误差较全国平均值偏大  $5^\circ \sim 7^\circ$ ;56146 站偏差和均方根误差相对于全国平均值的偏差极大值均出现在 150 hPa,分别为  $11.6^\circ$  和  $7.4^\circ$ 。

由上述分析可知 150 hPa 相对偏差是所有等压面里面最大的,因此图 4 给出了 2019 年 1—4 月 56146 站 150 hPa 的风向观测数据、EC 和 GRAPES 模式数据逐时次变化序列。由图可知,三种数据随时间变化的趋势一致;两种模式数据差异不大,而观测数据相对于模式数据存在明显的系统性偏小,1 月 15 日 12 UTC 开始系统性偏差显著增大,2、3 月偏差较大,对雷达重新进行找北标定后 4 月 7 日 00 UTC 开始偏差显著减小。1—4 月观测数据与 EC、GRAPES 模式数据平均偏差分别为  $-13.2^\circ$ 、 $-10.4^\circ$ 、 $-13.4^\circ$ 、 $-12.5^\circ$ 、 $-12.3^\circ$ 、 $-12^\circ$ 、 $-9.5^\circ$ 、 $-8.8^\circ$ 。

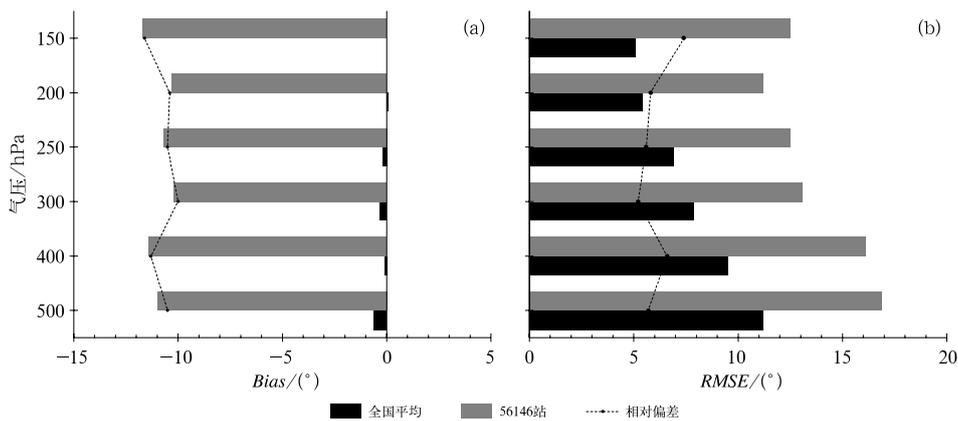


图 3 不同等压面 56146 站和全国平均偏差(a)和均方根误差(b)

Fig. 3 The Bias (a) and RMSE (b) of Station 56146 and national average with different mandatory levels

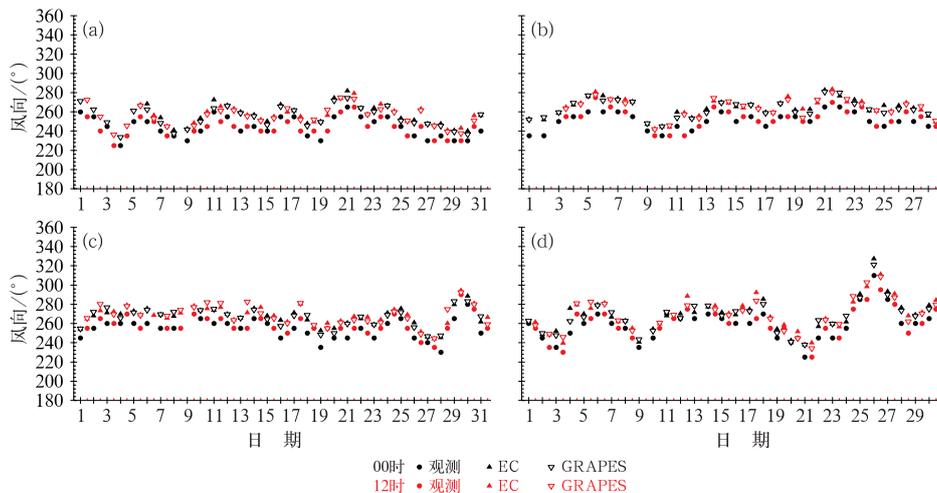


图 4 2019 年 1 月(a),2 月(b),3 月(c)和 4 月(d)56146 站 150 hPa 的风向观测数据、EC 和 GRAPES 模式数据逐时次变化序列

Fig. 4 Hourly distribution of wind direction observation data, EC and GRAPES model data at Station 56146 at 150 hPa in January (a), February (b), March (c) and April (d) 2019

### 2.3 观测数据质量分析

为了进一步分析 2019 年全国探空测风的风向和风速数据质量,分别从不同标准等压面不同季节的风向和风速观测数据与 GRAPES 模式数据的偏差、均方根误差、相关系数三个方面对 2019 年探空测风数据进行质量分析,相关指标的计算和统计都是基于标量法进行的。

#### 2.3.1 偏差

由表 4 可知,四季各等压面风向偏差均在  $\pm 1^\circ$  内。春季 500~250 hPa 为负偏差,其他等压面为正

偏差,负偏差随气压减小而减小,正偏差则反之;夏季除 250 和 200 hPa 外均为正偏差,总体来说偏差绝对值随气压减小先减小后增大;秋季各等压面正负偏差交替出现,偏差绝对值随气压减小先增大后减小;冬季各等压面均为负偏差,偏差绝对值随气压减小基本呈“W”型变化。所有等压面绝对偏差平均值秋季远小于其他季节;不同等压面各季节绝对偏差在 500 hPa:冬季>春季>夏季>秋季,400 hPa:夏季>秋季>冬季>春季,300 hPa:冬季>秋季>春季>夏季,250 hPa:冬季较大,200 和 150 hPa:春季>夏季>冬季>秋季。

表 4 各季节各等压面风向偏差(单位:°)

Table 4 Bias of wind direction at different mandatory levels in each season (unit: °)

季节	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa	150 hPa	绝对平均
春季	-0.44	-0.05	-0.10	-0.02	0.64	0.84	0.35
夏季	0.37	0.51	0.02	-0.03	-0.30	0.81	0.34
秋季	-0.18	0.20	-0.29	0.01	-0.04	0.11	0.14
冬季	-0.64	-0.14	-0.39	-0.27	-0.25	-0.32	0.34

由表 5 可知,四季各等压面风速偏差均在  $\pm 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  内,1000 hPa 均为负偏差,其他等压面以正偏差为主,偏差随气压减小基本呈三峰型变化,峰值分别出现在 1000、700 和 200 hPa。春季和冬季 250 和 200 hPa 偏差较大,夏季和秋季 1000 hPa 偏差较

大。所有等压面绝对偏差平均值冬季>夏季>秋季>春季;不同等压面各季节绝对偏差在 1000 hPa:秋季>夏季>冬季>春季,925 hPa:春季>秋季>夏季>冬季,850 和 500 hPa 夏季偏差较大,其他等压面冬季较大。

表 5 同表 4,但为风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Table 5 Same as Table 4, but for wind speed (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

季节	1000 hPa	925 hPa	850 hPa	700 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa	150 hPa	100 hPa	绝对平均
春季	-0.38	0.25	0.19	0.62	0.37	0.38	0.58	0.82	0.95	0.50	-0.02	0.46
夏季	-1.32	0.15	0.29	0.67	0.56	0.54	0.58	0.73	0.85	0.57	0.05	0.57
秋季	-1.43	-0.22	-0.16	0.54	0.37	0.42	0.49	0.65	0.55	0.25	-0.05	0.47
冬季	-0.39	0.04	0.22	0.70	0.37	0.60	0.96	1.16	1.19	0.99	0.53	0.65

#### 2.3.2 均方根误差

由表 6 和表 7 可知,四季各等压面风向均方根误差在  $4.58^\circ \sim 15.65^\circ$ ,随气压减小而减小,不同等压面均方根误差大小均是夏季>秋季>春季>冬季。四季各等压面风速均方根误差在  $2.07 \sim 4.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

随气压减小先增大后减小,700 hPa 及以下等压面均方根误差均小于  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,300 和 250 hPa 等压面均方根误差较其他等压面大;不同等压面各季节均方根误差在 1000 hPa 秋季>冬季>夏季>春季,其他等压面春季最大、秋季最小。

表 6 各季节各等压面风向均方根误差(单位:°)

Table 6 RMSE of wind direction in different mandatory levels in each season (unit: °)

季节	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa	150 hPa	平均
春季	12.97	11.44	9.90	8.81	6.81	6.17	9.35
夏季	15.65	15.20	14.10	13.06	10.84	9.83	13.11
秋季	13.48	12.17	10.42	9.24	7.93	7.67	10.15
冬季	10.12	8.35	6.61	5.71	4.78	4.58	6.69

表 7 同表 6, 但为风速(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )Table 7 Same as Table 6, but for the wind speed (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

季节	1 000 hPa	925 hPa	850 hPa	700 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa	150 hPa	100 hPa	平均
春季	2.07	2.52	2.72	2.98	3.53	3.92	4.54	4.54	3.83	3.29	3.52	3.41
夏季	2.10	2.48	2.63	2.72	3.00	3.26	3.81	4.01	3.78	3.21	2.73	3.07
秋季	2.31	2.25	2.41	2.50	2.75	3.08	3.39	3.32	2.94	2.78	2.61	2.76
冬季	2.22	2.42	2.58	2.89	3.38	3.58	3.82	3.73	3.28	3.18	3.40	3.13

### 2.3.3 相关系数

由表 8 可知, 四季各等压面风向相关系数均大于 0.80, 并且通过了 0.01 的显著性水平检验, 均随

气压减小而增大; 不同等压面各季节相关系数在 500 hPa 夏季、秋季较冬季、春季大, 400 hPa 及以上等压面秋季、冬季较春季、夏季大。

表 8 各季节各等压面风向相关系数

Table 8 Correlation coefficient of wind direction at different mandatory levels in each season

季节	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa	150 hPa	平均
春季	0.86	0.87	0.90	0.92	0.93	0.92	0.90
夏季	0.91	0.89	0.89	0.91	0.93	0.94	0.91
秋季	0.90	0.91	0.94	0.96	0.96	0.95	0.94
冬季	0.88	0.92	0.94	0.95	0.95	0.94	0.93

由表 9 可知, 四季各等压面风速相关系数在 0.57~0.95, 都通过了 0.01 的显著性水平检验, 春季、夏季随气压减小先增大后减小, 秋季、冬季

925 hPa 较上下等压面略大, 850~100 hPa 随气压减小先增大后减小; 700 hPa 以下等压面各季节相关系数差异不大, 其他等压面冬季最大夏季最小。

表 9 同表 8, 但为风速

Table 9 Same as Table 8, but for wind speed

季节	1 000 hPa	925 hPa	850 hPa	700 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	250 hPa	200 hPa	150 hPa	100 hPa	平均
春季	0.57	0.65	0.65	0.71	0.81	0.86	0.90	0.91	0.93	0.92	0.85	0.80
夏季	0.63	0.63	0.63	0.65	0.70	0.76	0.82	0.85	0.87	0.88	0.82	0.75
秋季	0.61	0.72	0.66	0.69	0.76	0.84	0.89	0.92	0.93	0.92	0.88	0.80
冬季	0.62	0.68	0.66	0.75	0.84	0.90	0.93	0.94	0.95	0.93	0.87	0.82

## 3 结 论

本文提出一种基于观测数据获取、常规质量控制和背景场检查的综合观测数据名单控制方法, 使用 2019 年全国探空测风数据对该方法进行了验证, 对名单控制结果进行了分析, 并对探空测风的风向和风速数据进行质量分析, 得到以下主要结论:

(1) 2019 年全国探空测风数据质量较好, 数据缺测是探空测风数据存在的主要问题, 可疑和错误数据均较少。名单控制可以有效检查出观测数据存在问题的站点, 名单站点观测数据随时间变化的趋势与不同模式数据一致, 但相对于模式数据存在明显的系统性偏差, 偏差和均方根误差相对于全国平均值都显著偏大。

(2) 相对于模式数据, 四季各等压面风向偏差在  $\pm 1^\circ$  内, 春季、夏季偏差绝对值随气压减小先减小后增大, 秋季、冬季则随气压减小先增大后减小; 春季 250 hPa 以下等压面观测数据小于模式数据, 250 hPa 以上则相反, 夏季除 250 和 200 hPa 外观测数据均大于模式数据, 秋季观测数据与模式数据较为一致, 正负偏差交替出现, 冬季所有等压面观测数据小于模式数据。四季各等压面风速偏差在  $\pm 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  内, 偏差随气压减小基本呈分别在 1 000、700 和 200 hPa 出现峰值的三峰型变化; 除 1 000 hPa 外, 观测数据基本都大于模式数据, 总体来说, 春季、秋季较夏季、冬季观测数据与模式数据更为一致。

(3) 相对于模式数据, 四季各等压面风向均方根误差在  $4.58^\circ \sim 15.65^\circ$ , 随气压减小而减小; 不同等压面均方根误差大小均是夏季 > 秋季 > 春季 > 冬

季。四季各等压面风速均方根误差在  $2.07 \sim 4.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 随气压减小先增大后减小; 除  $1\,000 \text{ hPa}$  外, 各等压面均方根误差春季最大、秋季最小。

(4) 四季风向、风速观测数据和模式数据显著相关, 风向平均相关系数均大于  $0.8$ , 风速相关系数在  $0.57 \sim 0.95$ , 各季节风向、风速相关系数基本随气压减小而增大。所有等压面风向相关系数平均值为秋季  $>$  冬季  $>$  夏季  $>$  春季; 风速夏季略小, 其他季节相当。

## 参考文献

- 曹晓钟, 郭启云, 杨荣康, 2019. 基于长时平漂间隔的上下二次探空研究[J]. 仪器仪表学报, 40(2): 198-204. Cao X Z, Guo Q Y, Yang R K, 2019. Research of rising and falling twice sounding based on long-time interval of flat-floating[J]. Chin J Sci Instrum, 40(2): 198-204(in Chinese).
- 陈鹏, 刘德, 周盈颖, 等, 2015. 一次重庆特大暴雨过程的中尺度分析[J]. 高原气象, 34(1): 82-92. Chen P, Liu D, Zhou Y Y, et al, 2015. Analysis of heavy rain caused by shear line over Chongqing[J]. Plateau Meteor, 34(1): 82-92(in Chinese).
- 程凯琪, 郭启云, 马旭林, 等, 2020. 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, 34(7): 177-186. Cheng K Q, Guo Q Y, Ma X L, et al, 2020. Research of quality control method of GNSS occultation observation inversion temperature [J]. J Electron Meas Instrum, 34(7): 177-186(in Chinese).
- 董新宁, 方德贤, 周国兵, 等, 2017. 两种垂直风廓线的对比及应用 I: 一致性分析[J]. 高原气象, 36(3): 788-800. Dong X N, Fang D X, Zhou G B, et al, 2017. Comparison and application of two kinds vertical wind profile data part I: consistency analysis[J]. Plateau Meteor, 36(3): 788-800(in Chinese).
- 高山, 2014. 高空气象探测数据分析与质量控制系统设计及实现[D]. 成都: 电子科技大学. Gao S, 2014. Data analysis of the upper-air detection and the system design for quality control[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China(in Chinese).
- 郭启云, 钱媛, 杨荣康, 等, 2020a. L波段探空雷达测风质量控制方法研究[J]. 大气科学学报, 43(5): 845-855. Guo Q Y, Qian Y, Yang R K, et al, 2020a. Study on the quality control method of wind measurement of L-band sounding radar[J]. Trans Atmos Sci, 43(5): 845-855(in Chinese).
- 郭启云, 杨荣康, 程凯琪, 等, 2020b. 基于探空观测的多源掩星折射率质量控制及对比[J]. 应用气象学报, 31(1): 13-26. Guo Q Y, Yang R K, Cheng K Q, et al, 2020b. Refractive index quality control and comparative analysis of multi-source occultation based on sounding observation[J]. J Appl Meteor Sci, 31(1): 13-26(in Chinese).
- 郭启云, 杨加春, 杨荣康, 等, 2018a. 球载式下投国产北斗探空仪测风性能评估[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 10(5): 629-640. Guo Q Y, Yang J C, Yang R K, et al, 2018a. Evaluation of wind performance of domestic Beidou dropsonde of ball-loading[J]. J Nanjing Univ Inf Sci Technol (Nat Sci Ed), 10(5): 629-640(in Chinese).
- 郭启云, 杨荣康, 钱媛, 等, 2018b. 气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空对比分析[J]. 气象, 44(8): 1094-1103. Guo Q Y, Yang R K, Qian Y, et al, 2018b. Full-range sounding comparison analysis of balloon borne rdiosonde rising and parachute carrying radiosonde descending[J]. Meteor Mon, 44(8): 1094-1103(in Chinese).
- 胡姮, 曹云昌, 梁宏, 2019. L波段探空观测偏差分析及订正算法研究[J]. 气象, 45(4): 511-521. Hu H, Cao Y C, Liang H, 2019. Systematic errors and their calibrations for precipitable water vapor of L-band radiosonde[J]. Meteor Mon, 45(4): 511-521(in Chinese).
- 李芳芳, 陈起英, 吴泓锟, 2019. 基于秒级探空资料的中国地区浮力频率分布[J]. 应用气象学报, 30(5): 629-640. Li F F, Chen Q Y, Wu H K, 2019. A statistical study of brunt-vaisala frequency with second-level radiosonde data in China[J]. J Appl Meteor Sci, 30(5): 629-640(in Chinese).
- 李金辉, 田显, 岳治国, 2020. 基于火箭探空资料的冰雹云内部结构个案分析[J]. 大气科学, 44(4): 748-760. Li J H, Tian X, Yue Z G, 2020. Case study of hail cloud internal structure based on rocket sounding data[J]. Chin J Atmos Sci, 44(4): 748-760(in Chinese).
- 李娟, 孙建华, 张元春, 等, 2016. 四川盆地西部与东部持续性暴雨过程的对比分析[J]. 高原气象, 35(1): 64-76. Li J, Sun J H, Zhang Y C, et al, 2016. Comparative analysis of persistent heavy rainfall events in west and east Sichuan Basin[J]. Plateau Meteor, 35(1): 64-76(in Chinese).
- 廖捷, 周自江, 2018. 全球常规气象观测资料质量控制研究进展与展望[J]. 气象科技进展, 8(1): 56-63. Liao J, Zhou Z J, 2018. Quality control of the global conventional meteorological observations: progresses and prospects[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1): 56-63(in Chinese).
- 孟丹, 陈正洪, 陈城, 等, 2019. 基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J]. 气象, 45(12): 1756-1761. Meng D, Chen Z H, Chen C, et al, 2019. Research on wind changes at different heights in atmospheric boundary layer based on sounding wind data[J]. Meteor Mon, 45(12): 1756-1761(in Chinese).
- 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).
- 曲巧娜, 盛春岩, 孙青, 等, 2016. 风廓线雷达与 L 波段探空雷达测风资料的对比[J]. 干旱气象, 34(6): 1078-1086. Qu Q N, Sheng C Y, Sun Q, et al, 2016. Comparison of horizontal wind between wind profile radar and l band sounding radar[J]. Arid Meteor, 34(6): 1078-1086(in Chinese).
- 万蓉, 周志敏, 崔春光, 等, 2011. 风廓线雷达资料与探空资料的对比分析[J]. 暴雨灾害, 30(2): 130-136. Wan R, Zhou Z M, Cui C

- G, et al, 2011. Comparing wind profiler data with radiosonde data and analyzing[J]. *Torr Rain Dis*, 30(2): 130-136 (in Chinese).
- 王存贵, 初奕琦, 檀望舒, 等, 2018. 结合激光雷达和探空资料研究青藏高原地区混合层高度特征[J]. *大气科学*, 42(5): 1133-1145.
- Wang C G, Chu Y Q, Tan W S, et al, 2018. Characteristics of atmospheric mixing layer height over the Tibetan Plateau with lidar and radiosonde data[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(5): 1133-1145 (in Chinese).
- 王丹, 王金成, 田伟红, 等, 2020. 往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析[J]. *大气科学*, 44(4): 865-884.
- Wang D, Wang J C, Tian W H, et al, 2020. Quality control and uncertainty analysis of return radiosonde data[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(4): 865-884 (in Chinese).
- 王栋成, 邱黎, 董旭光, 等, 2019. 济南边界层风廓线雷达与 L 波段雷达大风探空测风对比[J]. *气象*, 45(8): 1169-1180.
- Wang D C, Qiu C, Dong X G, et al, 2019. Comparing strong wind data observed by boundary layer wind profiling radar and L-band radar in Jinan[J]. *Meteor Mon*, 45(8): 1169-1180 (in Chinese).
- 王金成, 陆慧娟, 韩威, 等, 2017. GRAPES 全球三维变分同化业务系统性能[J]. *应用气象学报*, 28(1): 11-24.
- Wang J C, Lu H J, Han W, et al, 2017. Improvements and performances of the operational GRAPES\_GFS 3DVar system[J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 11-24 (in Chinese).
- 王丽吉, 杨程, 2018. 热带平流层多尺度波动分离方案的研究: 多站点高分辨率无线电探空联合分析[J]. *气象学报*, 76(1): 62-77.
- Wang L J, Yang C, 2018. Separation of planetary and gravity waves in the tropical stratosphere with multi-station radiosonde data[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(1): 62-77 (in Chinese).
- 汪万林, 王伯民, 郭发辉, 等, 2011. QX/T 123-2011: 无线电探空资料质量控制[S]. 北京: 中国气象局. Wang W L, Wang B M, Guo F H, et al, 2011. QX/T 123-2011: Quality control for radiosonde data[S]. Beijing: China Meteorological Administration (in Chinese).
- 吴泓锟, 陈起英, 华维, 等, 2019. 基于秒级探空资料分析四川重力波统计特征[J]. *应用气象学报*, 30(4): 491-501.
- Wu H K, Chen Q Y, Hua W, et al, 2019. A statistical study of gravity wave with second-level radiosonde data in Sichuan[J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(4): 491-501 (in Chinese).
- 吴志根, 徐同, 丁若洋, 等, 2013. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析[J]. *气象*, 39(3): 370-376.
- Wu Z G, Xu T, Ding R Y, et al, 2013. Comparison of wind data measured by Shanghai network wind profilers and Baoshan GFE(L)-1 sounding radar[J]. *Meteor Mon*, 39(3): 370-376 (in Chinese).
- 熊安元, 赵芳, 王颖, 等, 2015. 全国综合气象信息共享系统的设计与实现[J]. *应用气象学报*, 26(4): 500-512.
- Xiong A Y, Zhao F, Wang Y, et al, 2015. Design and implementation of China Integrated Meteorological Information Sharing System (CIMISS) [J]. *J Appl Meteor Sci*, 26(4): 500-512 (in Chinese).
- 张萌, 于海鹏, 黄建平, 等, 2019. GRAPES\_GFS 2.0 模式非系统误差评估[J]. *应用气象学报*, 30(3): 332-344.
- Zhang M, Yu H P, Huang J P, et al, 2019. Assessment on unsystematic errors of GRAPES\_GFS 2.0 [J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(3): 332-344 (in Chinese).
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 2001. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社.
- Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 赵天保, 符淙斌, 2009. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. *大气科学*, 33(3): 634-648.
- Zhao T B, Fu C B, 2009. Applicability evaluation for several reanalysis datasets using the upper-air observations over China [J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(3): 634-648 (in Chinese).
- 中国气象局, 2010. 常规高空气象观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2010. Conventional Upper Air Observation Service Specification[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 周长艳, 唐信英, 邓彪, 2015. 一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J]. *高原气象*, 34(6): 1636-1647.
- Zhou C Y, Tang X Y, Deng B, 2015. Precipitation characteristics and water vapor source analysis of record heavy rainfall process in Sichuan [J]. *Plateau Meteor*, 34(6): 1636-1647 (in Chinese).
- 庄照荣, 薛纪善, 韩威, 等, 2014. 探空观测黑名单检查在变分同化系统中的应用[J]. *应用气象学报*, 25(3): 274-283.
- Zhuang Z R, Xue J S, Han W, et al, 2014. The application of radiosonde observation blacklisting check to variable data assimilation system [J]. *J Appl Meteor Sci*, 25(3): 274-283 (in Chinese).
- Durre I, Vose R S, Wuertz D B, 2006. Overview of the integrated global radiosonde archive [J]. *J Climate*, 19(1): 53-68.
- Houchi K, Stoffelen A, Marseille G J, et al, 2015. Statistical quality control of high-resolution winds of different radiosonde types for climatology analysis [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 32(10): 1796-1812.
- Liao J, Wang B, Li Q X, 2014. A new method for quality control of Chinese rawinsonde wind observations [J]. *Adv Atmos Sci*, 31(6): 1293-1304.
- St-James J S, Laroche S, 2005. Assimilation of Wind Profiler Data in the Canadian Meteorological Centre's analysis systems [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 22(8): 1181-1194.
- White P W, 2003. IFS documentation Part II: data assimilation (CY25R1) [Z]. IFS Documentation Cycle CY25R1.