

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 Dan, WANG Jincheng, TIAN Weihong, et al. 2020. Quality Control and Uncertainty Analysis of Return Radiosonde Data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(4): 865–884. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19203

往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析

王丹^{1,2} 王金成^{1,2} 田伟红^{1,2} 郭启云³

1 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

3 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘 要 为了推动新型探测资料在数值预报模式中的应用, 本文进行了往返式探空资料同化应用前重要的基础性研究工作。基于国内首次往返式探空观测资料, 首先建立了面向业务化应用的往返式探空资料质量控制方案, 通过对比和分析质量控制前后观测样本的统计特征, 论证了质量控制方案的合理性, 质量控制后探测要素抽样分布更为合理, 要素间一致性得到提高。进而以数值天气预报高时间分辨率的模式预报场和同站址业务常规探空观测资料为参考, 分析质量控制后资料的不确定性, 结果表明往返探空探测精度达到了世界气象组织 WMO (World Meteorological Center) 规定的突破目标, 部分探测要素甚至实现了理想目标, 探测资料具有可用性。最后结合数值模式背景场探讨往返探空资料的可同化性, 研究表明往返探空的风场观测和夜间温度观测满足变分同化系统的高斯、无偏假定, 可直接同化; 气压、湿度和日间温度观测在资料同化前需要开展偏差订正工作, 从而更有效的发挥资料价值。本文的研究工作为今后往返探空资料在模式中的同化应用奠定了基础。

关键词 往返探空 质量控制 资料不确定性 同化潜力

文章编号 1006-9895(2020)04-0865-20

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19203

Quality Control and Uncertainty Analysis of Return Radiosonde Data

WANG Dan^{1,2}, WANG Jincheng^{1,2}, TIAN Weihong^{1,2}, and GUO Qiyun³

1 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Numerical Prediction Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Aiming at promoting the application of new types of sounding data in NWP (numerical weather prediction) models, this paper presents a basic research work of return radiosonde data. Based on archived return radiosonde observation datasets in China, a quality control scheme for future operational implementation purposes is established. By comparing and analyzing the statistical characteristics of observation samples before and after the quality control, the rationality of the quality control method is demonstrated. After the quality control procedure, the sampling distribution of the detection variables is more reasonable, and the inner-consistency of variables is also improved. An uncertainty analysis of return radiosonde data is then carried out by referring to the high-resolution NWP model forecast field and the

收稿日期 2019-08-19; 网络预出版日期 2020-01-15

作者简介 王丹, 女, 1987 年出生, 硕士, 主要从事观测资料质量控制和同化应用研究。E-mail: wangd@cma.gov.cn

通讯作者 王金成, E-mail: wangjc@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研究发展计划项目 2018YFC1506205、2017YFC1502102, 中国气象局数值预报 (GRAPES) 发展专项 GRAPES-FZZX-2019

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFC1506205, 2017YFC1502102), China Meteorological Administration Special Numerical Weather Prediction (GRAPES) Development Fund (Grant GRAPES-FZZX-2019)

conventional sounding observation data of the same site. The results show that the precision of return radiosonde reaches the breakthrough target defined by the WMO (world meteorological organization). Some detection variables even achieve the ideal target. Finally, the assimilability of the return radiosonde data is discussed based on the background field of the NWP model. The results show that wind field observations at all times and night temperature observations satisfy the Gaussian and unbiased assumptions of the variational assimilation system and can be assimilated directly. To play a more effective role in the data assimilation system, air pressure, humidity observations, and daily temperature need to be corrected before data assimilation. This work lays a foundation for the future assimilation application of return radiosonde.

Keywords Return radiosonde, Quality control, Uncertainty of data, Potential in assimilation

1 引言

作为综合气象观测系统的重要组成部分, 探空观测能够提供完整的三维大气的温度、气压、湿度、风等信息, 是高空观测体系中最为可信的基准资料 (Faccani et al., 2009)。近年来, 随着探测技术的不断进步, 探空观测已不再局限于标准层和特性层探测, 而转向更高时空分辨率的秒级探测。自 1991 年起, 澳大利亚气象局、英国气象局、法国气象局和美国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 等对全国站点或部分站点开展时间分辨率小于 5 s, 垂直分辨率低于 50 m 的秒级探空观测 (Hamilton and Vincent, 1995)。2011 年起, 我国探空系统也全面进行更新换代, 由 59 型探空系统逐步升级为 L 波段探空系统, 它的采样时间间隔为 1.2 s, 垂直间隔约为 8 m, 能提供更更为密集的大气垂直探测信息 (郝民等, 2014)。

高分辨率的秒级探空资料可以更好地反映大气层结的细致特征, 有助于预报员进行更为精细的天气学分析, 对于开展大气内部运动规律的科学问题探索也提供了更为优质的资料基础 (Allen and Vincent, 1995; Wang and Geller, 2003; 卞建春等, 2004; 王丽吉和杨程, 2018)。数值预报模式是探空资料应用的又一重要领域, 随着数值预报模式向更高水平和垂直分辨率的精细化预报方向发展, 秒级探空资料在高分辨率数值预报模式中的同化应用成为新的探索方向 (Ingleby and Edwards, 2015; Ingleby et al., 2016)。研究表明在数值预报模式中同化秒级探空, 并引入探空漂移信息, 对改善数值模式初始场、提高模式预报技巧有重要作用 (姚爽等, 2015; Laroche and Sarrazin, 2013)。

秒级探空资料应用的一大挑战是确保资料的高质量。长期以来, 常规探空的质量控制技术研究主

要由欧美科研和业务机构推动, 如美国 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 借助模式背景场发展了综合质量控制算法 (Complex Quality Control, CQC) (Collins, 2001); 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 早期发展的 EMOS (ECMWF's Meteorological Operational System) 质量控制系统 (Norris, 1990) 以及后期开发的变分质量控制方法 (Variational Quality Control, VarQC) (Anderson and Järvinen, 1999)。在国内, 国家气象信息中心 Liao et al. (2014) 采用顺序质量控制思路设计了常规探空质量控制算法, 重点优化了高空风切变检查方法; 张金龙和阮新 (2017) 完成了常规探空质量控制系统的业务化集成与应用。上述常规探空质量控制方法虽然成熟, 但是由于秒级探空资料的时空连续性较高, 资料特性与常规探空并不完全一致, 在进行质量控制方法设计时并不能完全复制常规探空, 需要进行深入优化。

探空观测模式多年来无显著进展, 由于受到人力和物力的限制, 全球约 2/3 的探空仍采用每日定常两次 [00 时和 12 时 (协调世界时)] 的传统观测为主 (Choi et al., 2015)。显然, 目前的探测频次并不能满足中小尺度灾害性天气系统的监测和预警需求。在国外, 多采用火箭下投探空或者飞机下投探空进行加密观测, 而我国在汛期或重大天气过程中多启用时间加密观测模式 (Langland et al., 1999; 舒守娟等, 2011; 张诚忠等, 2012; 李跃清等, 2012)。火箭和飞机下投探空以及时间加密观测均存在消耗巨大的问题, 难以维持日常业务, 迫切需要一种新的观测模式。中国气象局气象探测中心多年来一直致力于探空观测新模式的探索, 在 Vaisala RS41 秒探空系统的启发下, 近期提出创新型的往返式探空观测技术。它对探空气球实行一次施放, 多段观测, 即上升段—长时间平漂段—下降

段的观测，实现了探空观测的间接时空加密，探测的垂直廓线数量加倍，同时能获取平流层大气高频次连续观测资料，大幅节约了观测成本，是对探空技术改进的有益尝试。

数值预报模式是新型探测资料的应用示范和反馈优化的“窗口”，新型探测资料在数值模式中得以同化应用对于推动探测模式发展具有重要意义。然而，往返式探空观测资料尚处于试验阶段，技术相对还不够成熟，在进行数值资料同化应用工作前需要明确几点科学问题：（1）新型资料存在哪些观测质量问题，质量控制方案该如何设计？（2）新型资料的特点以及仪器探测性能是否满足世界气象组织 WMO（World Meteorological Organization）提出的气象气球技术的准确度要求？（3）新型资料能否满足变分同化系统对于观测性质的基本假设，是否具有同化应用前景？为了深入回答上述科学问题，本文基于 2018 年长江流域中下游地区取得的为期 1 个月的往返探空野外观测数据，首先开展资料质量控制方法研究，并对质量控制后资料进行评估、深入分析探测数据的不确定性，最后探讨资料的数值预报可同化性。本文的研究工作有助加深对往返式探空资料的理解和应用，并为今后在数值模式中的同化应用建立基础、积累经验。

2 资料与观测实验概况

2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日，中国气象局大气探测中心联合探空仪生产厂家进行了国内首次往返式探空的野外观测试验。在长江流域中下游地区的湖南、湖北、安徽、江西 4 省选取 6 个探空站作为气球施放点，对应 GPS（Global Positioning System）接收机按照 1：3 的比例架设，构成由 20 台左右接收机组成的探空信号地面接收网络（图

1a）。往返探空气球一日施放 2 次，与现有业务探空放球时间错开，时间间隔约 30 分钟。图 1b 是以安庆站 2018 年 6 月 11 日 12 时（协调世界时，下同）为例，往返探空气球施放一次的运行轨迹。往返式探空采用“套球”技术，上升段观测与现有业务类似，气球运行 1.3 h 后到达下平流层，“外球”自动爆破开始进行 5.4 h 长时间平漂观测，后通过爆破“内球”完成下降段探空观测，下降段观测时间约为 1 h。

往返探空观测资料的时间分辨率为 2 s，试验期间 6 个观测站点的总放球次数为 363 次。表 1 给出了往返探空观测资料的统计信息概况，从表可知：气球上升段探测成功率为 100%，平均观测时长为 1.43 h，平均球炸高度为 26835 m。仪器研制的技术性能指标设计中要求气球平漂时间 ≥ 4 h，按此指标统计，现阶段各个站点的平漂成功率约为 45%，平均观测时长为 5.37 h。气球下投成功率分别为安庆站 94.9%、长沙站 85%、赣州站 84.7%、南昌站 98.3%、武汉站 90.3% 以及宜昌站 87.1%，下降段平均观测时长为 0.87 h，气球终止高度站间差异较大，其中安庆站、武汉站下投终止高度较为接近地面。

3 质量控制方法设计及效果评估

3.1 质量控制算法设计

观测资料中通常包含有随机误差、过失误差和系统性误差，对于没有任何天气学意义的错误资料，在资料应用前需要剔除（翟盘茂，1997；郭艳君等，2009）。针对常规探空已经发展了许多质量控制方法，如极值检查、要素间一致性检查、逆温检查、空间一致性检查、风切变检查以及静力学检查等（Durre et al., 2008；廖捷和周自江，2018）。往返

表 1 2018年6月10日至7月10日往返探空观测资料统计信息

Table 1 Statistical information of return radiosonde data from 10 June to 10 July 2018

站点名称	总探测次数	平漂成功率	上升段平均观测时长/h	上升段平均球炸高度/m	平漂段平均观测时长/h	下降段平均观测时长/h	下降段平均终止高度/m
安庆	59	45.8%	1.51	27060.1	5.54	1.01	1813.4
长沙	60	46.7%	1.43	27433.2	5.14	0.75	4135.2
赣州	59	44.1%	1.34	26006.9	5.22	0.77	4554.9
南昌	61	42.6%	1.48	27315.1	5.38	0.91	2596.9
武汉	62	43.5%	1.46	27050.3	5.72	0.91	861.7
宜昌	62	46.8%	1.38	26144.6	5.21	0.88	3563.5

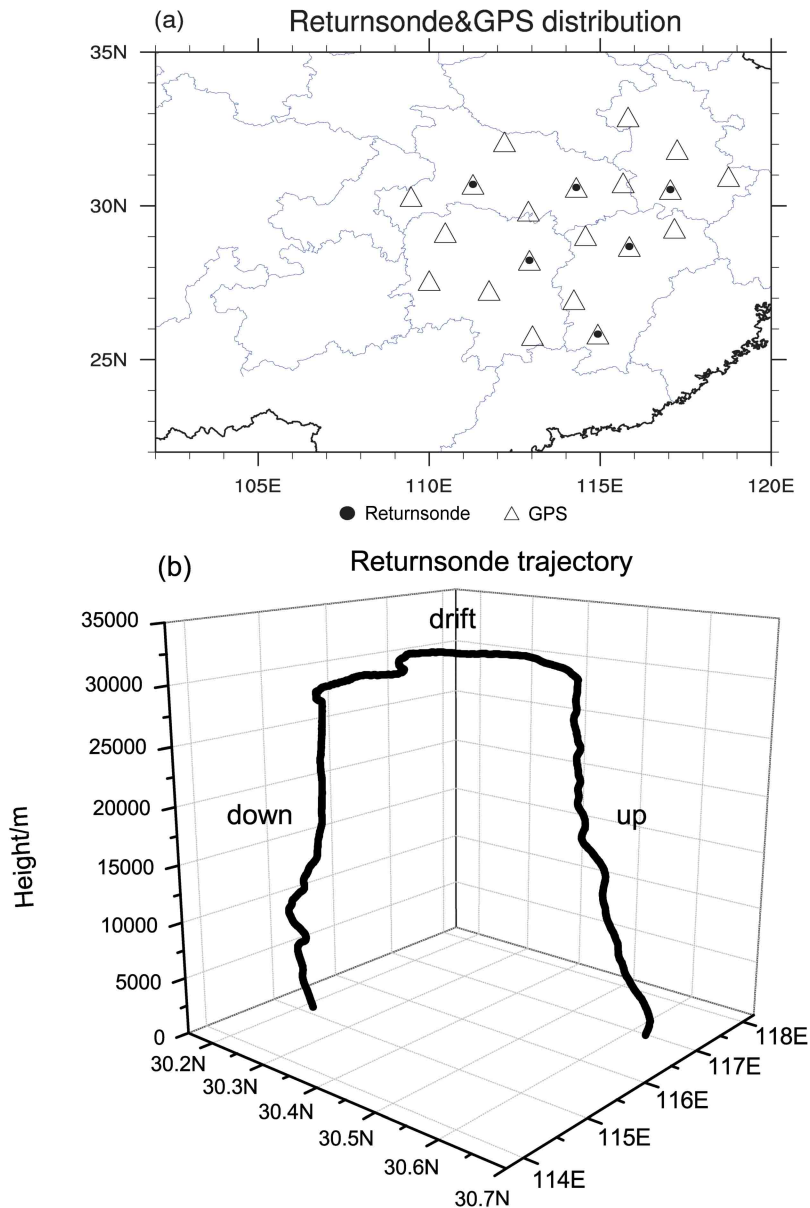


图1 (a) 往返探空试验区布局及(b)以安庆站2018年6月11日12时(协调世界时,下同)为例的观测轨迹示意图。图a中实心黑点代表往返探空气球施放站点,空心三角代表GPS接收机布设点

Fig. 1 (a) Return radiosonde network distribution and (b) an example of observation trajectory for return radiosonde at Anqing station at 1200 UTC on 11 June 2018. In Fig. 1a, the black dots represent return radiosonde launch stations and triangles represent GPS (Global Positioning System) receiver locations

探空的质量控制方法在借鉴常规探空的同时,需结合资料特性,针对性地补充检查步骤。本文设计的质量控制算法流程如图2所示,总原则如下:(1)上升段、平漂段、下降段探测资料特性不同,因此采用分段质量控制策略,三段资料分别开展质量控制;(2)每一个检查步骤只进行质量标识(正确为0,可疑为1,错误为2,未检查为9)而不对数据进行任意剔除,目的在于保证每一个检查模块相

对独立、结果互不干扰。下面具体介绍质量控制策略。

3.1.1 常规检查

常规检查主要包括以下几个步骤:

(1)极值检查是对温度、气压、高度、风速、湿度进行值域范围检查。(2)逆温检查则计算相邻两层的温度差来判断是否有异常逆温存在,其中相邻两层的时间采样为2s(下同)。(3)超绝热

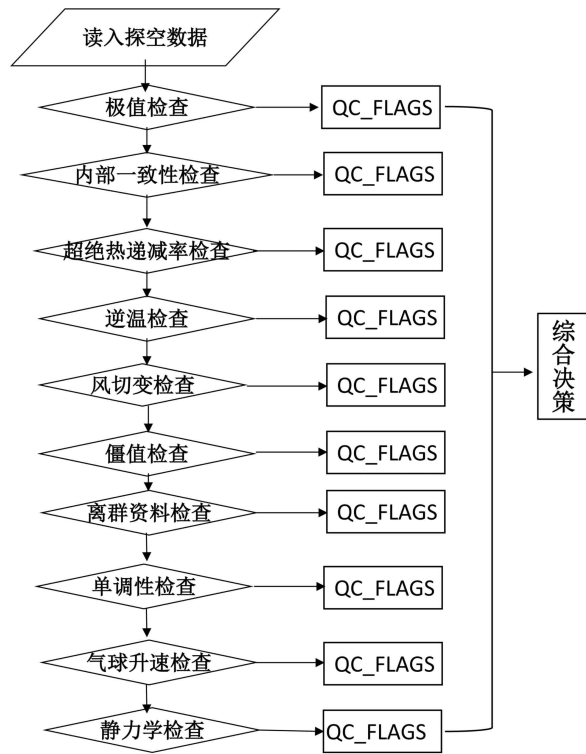


图2 往返探空质量控制流程图, 图中 QC_FLAGS 代表质量控制标识

Fig. 2 Quality control flow of return radiosonde, QC_FLAGS represents quality control flag

递减率检查公式为

$$T_{Di} = T_i \times \left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{R_d}{c_p}} - T_{i+1}, \quad (1)$$

其中, i 表示第 i 探测层, T_D 表示超绝热温度差, T 为温度, p 为气压, R_d 为干空气比气体常数, 其值为 $287 \text{ J (kg K)}^{-1}$ (下同), c_p 为干空气等压比热容, 其值为 $1004.64 \text{ J (kg } ^\circ\text{C)}^{-1}$ 。 T_D 超过极值判据则认为温度异常, 上升段检查中要求满足 $p_i > p_{i+1}$ 预判条件, 下降段则相反, 平漂段气压不具有单调性, 因此不进行超绝热递减率检查。(4) 要素间一致性检查为风向、风速和露点、温度间一致性检查, 以下情况认为资料异常: (a) 风速缺测, 风向非缺测或者风速非缺测、风向缺测; (b) 风向 = 0, 风速 $\neq 0$ 或者风向 $\neq 0$, 风速 = 0; (c) 温度 - 露点 $< 0^\circ\text{C}$ 或者温度 - 露点 $> 50^\circ\text{C}$ 。

以上四步检查判据具体参考欧洲中期天气预报中心 EMOS 系统。

(5) 风切变检查参考廖菲等 (2017), 该方案同时考虑风向和风速的影响, 计算公式为

$$S_{wi} = \sqrt{V_{i+1}^2 + V_i^2 - 2V_i V_{i+1} \cos d}, \quad (2)$$

其中, S_w 代表风切变, V 为风速, d 为相邻两时间层的风向差。 S_w 阈值设置如图 3 中绿色线所示。 S_w 阈值采取后验统计方式得到: 先对 S_w 样本采用双权重算法 (具体介绍见下文) 逐时间层做一致性检查来剔除离群资料, 然后计算每个时间层的标准差均值廓线 (图 3 中蓝线), 对均值廓线进行分段最小二乘拟合 (上升、下降段时间窗取 60 s, 平漂段取 180 s) 得到拟合廓线 (图 3 中红线), 最终取拟合廓线的 N 倍值 (上升、下降段 $N=5$, 平漂段 $N=7$) 作为 S_w 的判据 (图 3 中绿线), 当 S_{wi} 大于判据, 则认为相邻两层风速、风向可疑。

3.1.2 僵值检查

僵值是指在探测过程中出现探测要素值恒定不变的异常情况 (刘雨佳等, 2014)。以下几种情况会出现僵值: (1) 当温度传感器飞升进入较冷空气中, 若传感器上粘附的降水没能及时排干, 冻结释放的潜热将使其升温至 0°C 附近, 产生虚假的“ 0°C 等温层”现象 (WMO, 2019), 如 2018 年 7 月 4 日 00 时武汉探空观测在 30 分钟以上温度出现僵值 (图 4a); (2) 国产探空湿度元件由于性能问题, 在对流层高层低温环境下易被冻结导致测湿元件瘫痪, 相对湿度降低至 2% 以下, 并僵持不变, 而在对流层低层, 湿度元件从高饱和度到低饱和度转换过程中无法及时恢复也会出现湿度僵值 (孙丽和赵姝慧, 2018), 如 2018 年 6 月 15 日 00 时长沙探空观测在探测低层和高层均出现异常偏干层 (图 4c); (3) 探空仪风速探测错误的原因一般为 GPS 定位错误, 造成风速测量值在一段时间内固定不变 (陈磊等, 2017), 如 2018 年 6 月 18 日 00 时宜昌探空观测在 50~60 分钟间水平风速固定不变 (图 4e)。针对探测僵值, 本文对单根垂直廓线进行滑动最小二乘拟合。参考现行 L 波段探空系统的整分钟处理策略以及实践中反复测试, 文中滑动时间窗定为 60 s。计算每段时间窗内探测要素的拟合直线斜率 (图 4b、d、f), 如若斜率接近于零, 则表明出现僵值。对于湿度廓线, 认为 100 hPa 高度以下僵值为探测错误、高层僵值则认为可疑。

3.1.3 离群资料检查

数据一致性检查是质量控制中的重要环节, 通常定义探测要素变化值超过统计样本 3~5 倍标准差的资料为离群值 (傅新姝和谈建国, 2017)。然

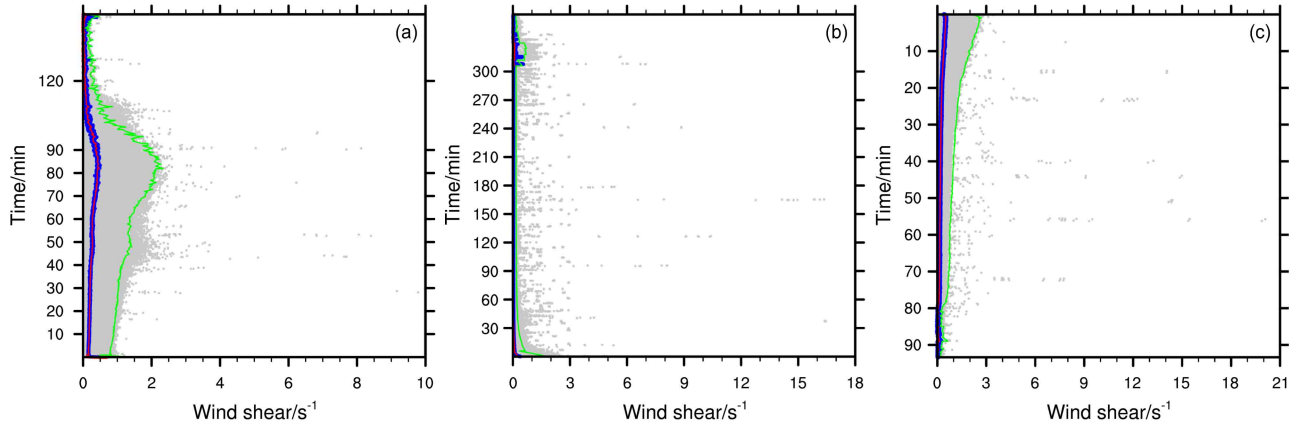


图3 往返探空观测资料集的 (a) 上升段、(b) 平漂段、(c) 下降段风切变阈值随时间的演变。蓝色线为标准差均值廓线, 红色线为最小二乘法拟合廓线, 绿色线为 S_w 判断阈值。往返探空观测资料集的数据采集时间为 2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日, 数据采集地点为安庆、长沙、赣州、南昌、武汉、宜昌 6 个观测站, 下同

Fig. 3 Time evolutions of wind shear threshold in (a) ascending stage, (b) drifting stage, and (c) descending stage of return radiosonde data set. Blue lines represent the mean profiles of standard deviation, red lines represent the least square fitting profiles, and green lines represent the wind shear (S_w) thresholds. Return radiosonde data set is derived from six observation stations (Anqing, Changsha, Ganzhou, Nanchang, Wuhan, Yichang) from 10 June to 10 July 2018, the same below

而, 离群资料本身会对统计样本的平均值和标准差产生很大影响, 从而影响到离群资料的识别 (刘寅, 2014)。为了减小这种影响, 本文对单根垂直廓线中探测要素的时间变率信息进行双权重算法判别 (Zou and Zeng, 2006), 以纬向风 U 为例, 其时间变率 a 定义为

$$a = \frac{U_{i+1} - U_i}{\Delta t}, \quad (3)$$

其中, Δt 取 2 s。双权重判别算法主要步骤如下:

(1) 计算探测要素时间变化样本 X 的双权重统计量, 双权重平均值 $\bar{X}$ 和双权重标准差 D_{BST} 为

$$\bar{X} = M + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (X_i - M)(1 - W_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - W_i^2)^2}, \quad (4)$$

$$D_{BST}(X) = \frac{\left[n \sum_{i=1}^{n-1} (X_i - M)^2 (1 - W_i^2)^4 \right]^{0.5}}{\left| \sum_{i=1}^{n-1} (1 - W_i^2) (1 - 5W_i^2) \right|}, \quad (5)$$

其中, M 是样本的中位数, W_i 为权重函数, 定义为

$$W_i = \frac{X_i - M}{7.5 M_{AD}}, \quad (6)$$

式中, M_{AD} 表示 $|X_i - M|$ 的中位数, 当 $|W_i| > 1$ 时, 取 $W_i = 1$ 。

(2) 计算样本中每个资料的离群距离 (Z):

$$Z_i = \frac{|X_i - \bar{X}|}{D_{BST}(X)}. \quad (7)$$

(3) 对每个 Z_i 值进行判断, 当 $Z_i \geq Z_{qc}$, 则认为相邻两层资料均异常, 其中 Z_{qc} 为设定阈值, 不同探测要素、不同时间层采用不同判据, 计算方法同垂直风切变 S_w 阈值。

数据不一致性有以下三类典型情况: (1) 探测廓线中出现单独野点群, 如图 5a 中 2018 年 6 月 11 日 00 时赣州探空温度观测在 2000 s 附近有明显离群点; (2) 探测廓线存在大段数据的层间变化异常, 如图 5d 中 2018 年 6 月 11 日 00 时宜昌探空温度观测在 4400 s 以上变化尖锐、显然不符合大气运动规律; (3) 探测要素在低值、高值间来回大幅摆动, 如图 5g 中 2018 年 6 月 22 日 00 时安庆探空湿度观测在 1000 s 以下波动造成的条纹状离群带。以上三类情况中异常点对应的 Z 值均大于设定阈值 Z_{qc} (图 5c、f、i 中红色色), 从而都能被有效识别。

3.1.4 单调性检查

对气压和高度变量进行趋势检查。在气球上升过程中, 若探测气压垂直递增/不变、探测高度递减/不变, 则认为当前气压和高度观测可疑, 气球下降段判据则与上升段相反 (Loehrer et al., 1996)。由于气球在平漂过程中会上下浮动, 因此该检查模块对于平漂段观测不适用。

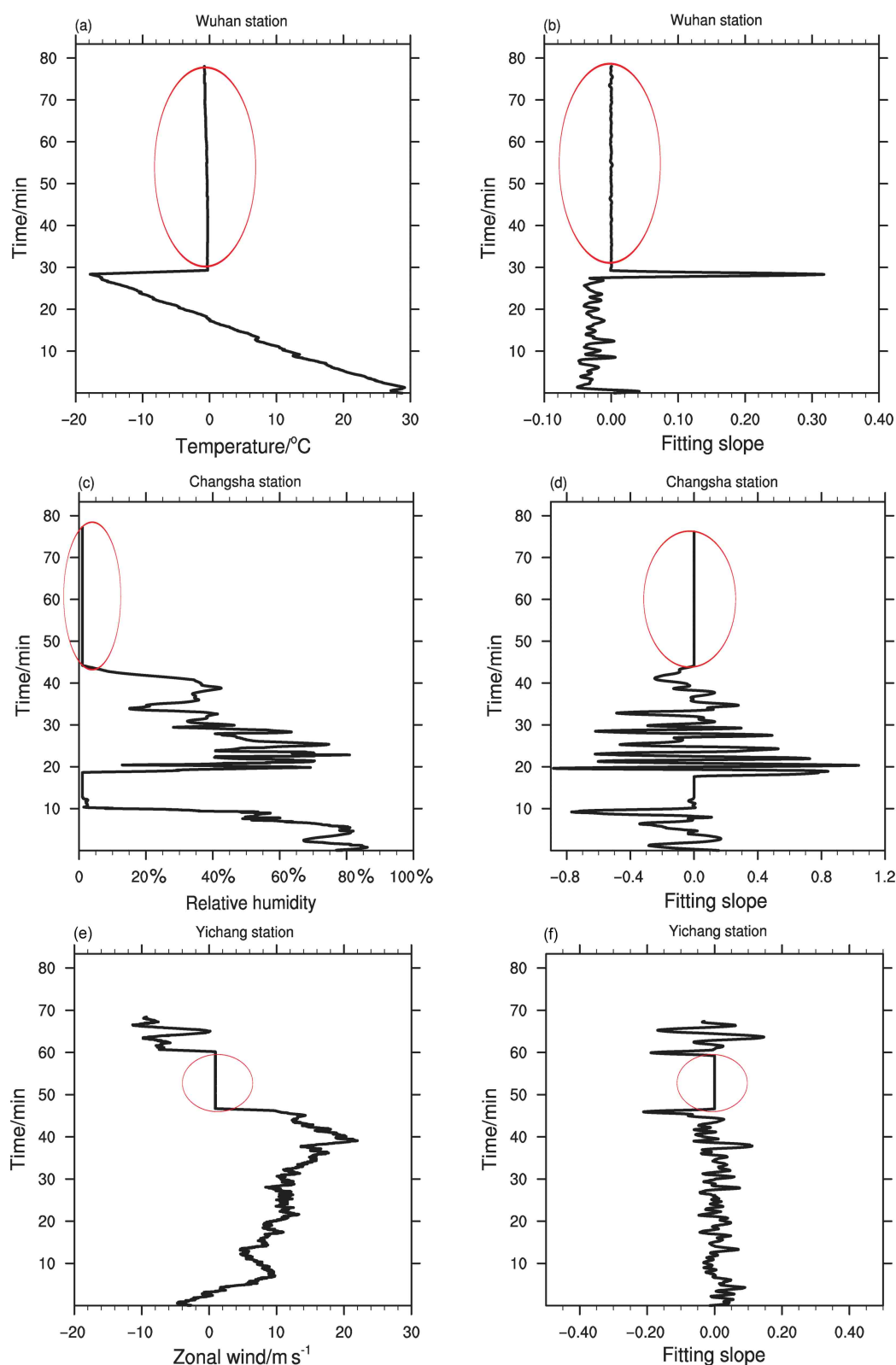


图4 (a) 以武汉站 2018 年 7 月 4 日 00 时为例的温度僵值示例、(c) 以长沙站 2018 年 6 月 15 日 00 时为例的湿度僵值示例、(e) 以宜昌站 2018 年 6 月 18 日 00 时为例的纬向风僵值示例及其 (b、d、f) 对应拟合斜率随时间的演变

Fig. 4 Time evolutions of (a) an example of rigid temperature at Wuhan station at 0000 UTC 4 July 2018, (c) an example of rigid relative humidity at Changsha station at 0000 UTC 15 June 2018, (e) an example of rigid zonal wind at Yichang station at 0000 UTC 18 June 2018, and (b, d, f) corresponding fitting slopes in examples of rigid profiles

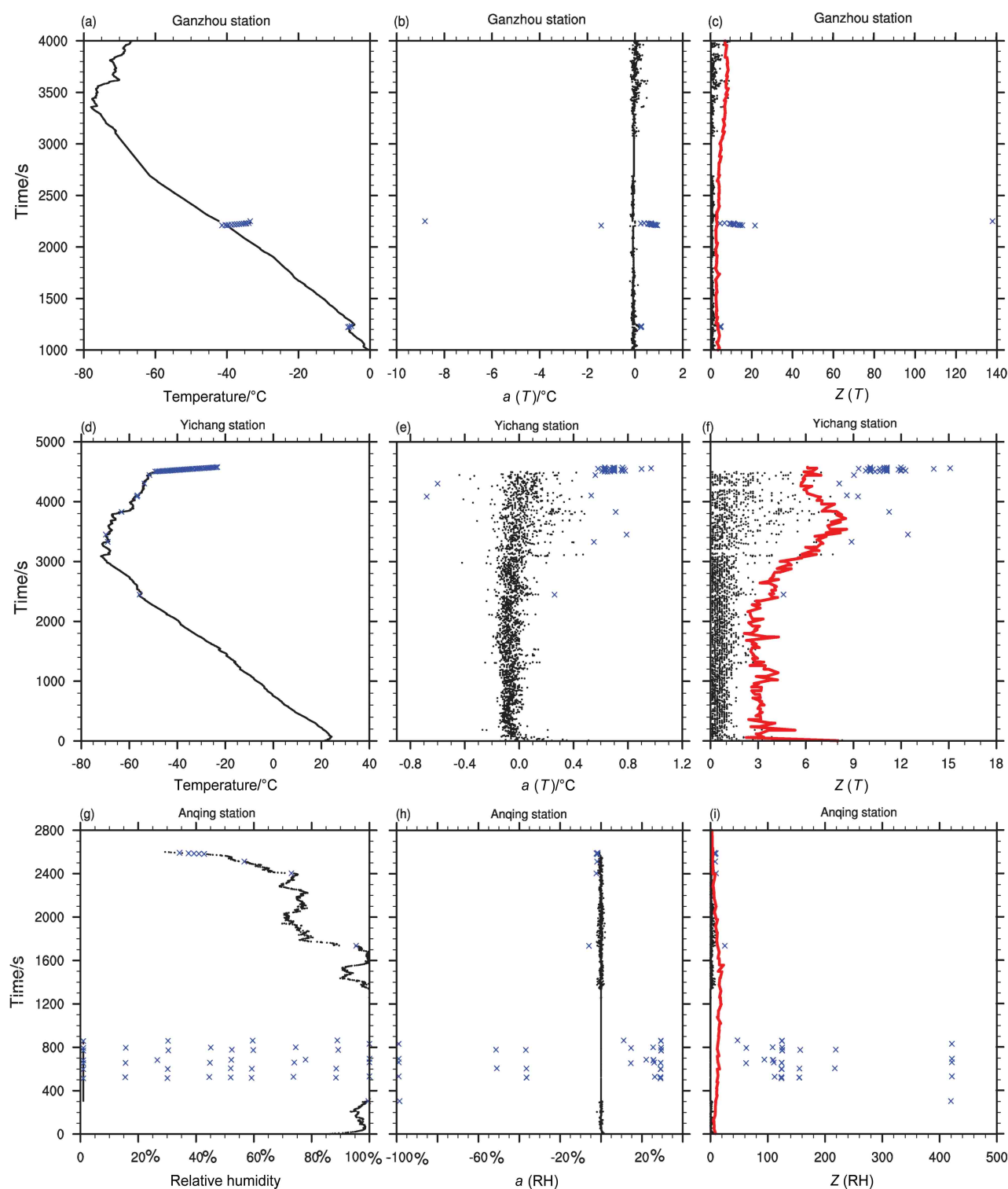


图5 (a-c) 以赣州站 2018 年 6 月 11 日 00 时为例的不一致性温度观测、(d-f) 以宜昌站 2018 年 6 月 11 日 00 时为例的不一致性温度观测、(g-i) 以安庆站 2018 年 6 月 22 日 00 时为例的不一致性相对湿度观测随时间的演变。左列为观测值、中列为观测变量的时间变率 a 、右列为离群距离 Z 。图中蓝色 $\times$ 代表可疑观测, 红色实线代表离群距离阈值 Z_{qc}

Fig. 5 Time evolutions of (a-c) an example of inconsistent temperature of Ganzhou station at 0000 UTC 11 June 2018, (d-f) an example of inconsistent temperature of Yichang station at 0000 UTC 11 June 2018, (g-i) an example of inconsistent relative humidity (RH) of Anqing station at 0000 UTC 22 June 2018. Left column indicates observations, middle column indicates corresponding time variability a , and right column indicates outlier distance score Z . The blue crosses represent suspicious observations, red lines denote the threshold (Z_{qc}) of outlier distance score

3.1.5 气球升速检查

探空气球的上升速度影响到温度、湿度传感器的通风, 同时探空气球急速上升和下降会引起 GPS 定位错误 (WMO, 2019)。因此, 需要对探空气球的升速进行检查。图 6 给出了上升段、平漂段以及下降段探空升速的垂直分布。从图 6 可知: (1) 上升段探空存在“下顿”现象, 可能是强下沉气流所致, 这种情况会破坏上升段气压递减趋势, 对该探测层给予错误标志; 同理, 下降段探空中的“上浮”现象也认为是观测错误。(2) 无论是上升段, 还是平漂段、下降段升速观测中均存在离群点, 特别是上升段和平漂段, 大气的强水平和垂直运动破坏气球净举力平衡是一个可能的原因, 对气球升速采用双权重算法进行一致性检查, 离群值对应探测要素认为可疑。

3.1.6 静力学检查

根据大气静力学公式可推导出压高公式, 从而可求出反算气压:

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = - \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{g}{R_d} \frac{dZ}{\bar{T}_v}, \quad (8)$$

式中, Z 代表位势高度, p 代表气压, R_d 为比气体常数, g 为大气重力加速度, 其值为 9.80665 m s^{-2} , $\bar{T}_v$ 代表层间平均虚温。假设观测准确, 反算气压和观测气压应该相近, 若两者出现较大差异 (本文取 $\pm 50 \text{ hPa}$), 则认为该层气压、温度、湿度和位势高度观测可疑, 结合查看温度、湿度和位势高度其他检查步骤的质量控制码, 可确定该层气压是否错误。该检查模块是气压离群值检查模块的有益补

充, 可有效识别气压离群值检查中的漏判资料, 例如, 2018 年 7 月 3 日 00 时的南昌探空观测在 3000 s 以后变化趋势异常 (图 7a), 经过气压离群值判断虽然可以将气压梯度异常值识别, 但仍存在漏判 (图 7b), 增加静力学检查后, 残留异常值被识别 (图 7c)。

3.1.7 综合决策

遍历所有检查步骤中产生的质量控制码: 若任意质量控制步骤中出现错误标记, 则认为该资料错误; 对于无法确定为错误的可疑资料, 如果有两种以上质量控制方法认为它可疑, 则判定该资料为错误, 否则, 该资料仍旧为可疑。

3.2 质量控制效果评估

为验证质量控制算法的有效性, 参考 Houchi et al. (2015) 采用的百分位法对质量控制前后的观测数据集进行抽样检查。图 8 给出了质量控制前后探测要素的百分位廓线分布图。图中设定的百分位阈值依次为 0、10%、25%、50%、75%、90% 和 100%。从图可知: 纬向风 (U) 和经向风 (V) 的原始观测中 0 和 100% 廓线中存在个别极大风速值, 明显超出合理的风速范围, 质量控制算法能剔除这些异常值, 质量控制后的风场分布更为合理。对于温度观测而言, 在 100% 廓线中能看到明显的虚假“0°C”等温层, 0 廓线在 90 分钟以下存在多处温度变化异常, 质量控制算法能识别这类不合理值, 质量控制后的温度百分位廓线分布也更为合理。气压观测中, 原始观测在 90 分钟以下存在气压变化异常, 质量控制算法修正了气压观测错误。位势高

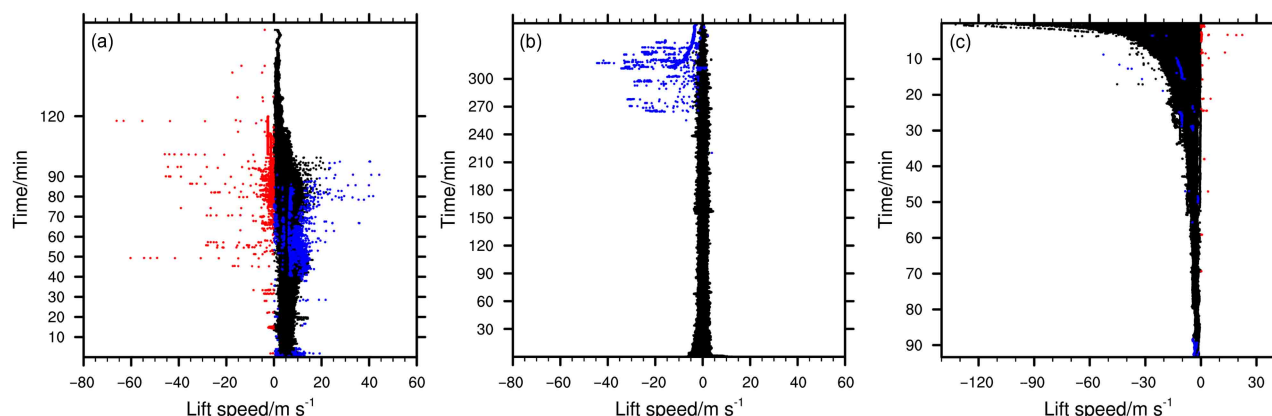


图 6 往返探空观测资料集 (a) 上升段、(b) 平漂段、(c) 下降段探空气球上升速度随时间的演变。红色点代表错误观测, 蓝色点代表可疑观测

Fig. 6 Time evolutions of ascending speed of sounding balloon in the (a) ascending stage, (b) drifting stage, and (c) descending stage of return radiosonde data set. Red dots represent error observations and blue dots represent suspicious observations

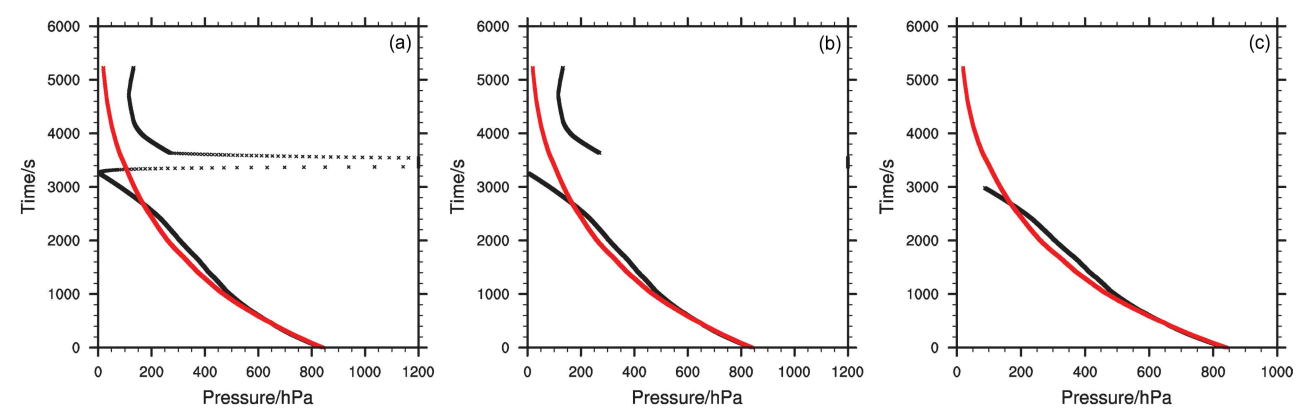


图7 以南昌站2018年7月3日00时为例的异常气压的(a)原始观测、(b)经过气压离群值检查后观测及(c)增加静力学检查后观测随时间的演变。黑色星代表气压观测值,红色线代表反算气压值

Fig. 7 Time evolutions of abnormal pressure at Nanchang station from (a) raw observations, (b) observations after outlier check, and (c) observations after hydrostatic check at 0000 UTC 3 July 2018. Black stars represent raw pressure observations and red lines represent the inverse calculated pressure value

度观测质量控制前后百分位廓线分布差异不大。湿度观测中,原始0廓线在30分钟以下存在2%湿度僵值,质量控制后湿度低层僵值被移除。总体而言,质量控制后的探测要素的抽样分布更为合理,说明本文的质量控制算法是有效的。

质量控制前后数据的一致性也是极为重要的评价指标。图9给出了质量控制前后探测要素的时间变率分布图。从图9可知:质量控制前,水平风(限于篇幅,以 U 为例)、温度、气压、位势高度和湿度观测均存在明显的时间变率异常值,表现为数据间不一致性较强;质量控制后,各个探测要素的时间变率异常值被剔除,数据一致性显著提高。进一步量化计算可知:质量控制前后,水平风、温度、气压、位势高度和湿度的时间变率标准差分别减小了52.9%、5.9%、15.8%、0.6%和22.8%(具体见表2),数据离散度明显减小。以上定量分析和定性分析都证明了本文的质量控制算法的有效性。

4 往返探空资料的不确定性分析

评估新型探空仪器观测性能的最佳方式是进行探空仪比对试验,即多个探空仪同球施放对同一观测对象进行探测从而确定仪器的观测误差(李柏和李伟,2011)。然而,同球比对试验实施成本较高,由于客观条件限制,此次往返探空外场试验没有进行同球施放。同址常规业务探空仅能匹配往返探空上升段、平漂段和下降段资料与常规探空时空错位、难以匹配,不能进行全时段比较。随着数值天气预报的精细化发展,利用数值模式短期预报场对探空资料进行评估已经成为评价观测质量的重要手段,以ECMWF为首的世界各大业务中心均已建立基于数值预报模式的资料监控平台(马颖等,2011;姚雯和马颖,2015)。因此,本文主要采用中国气象局数值预报中心自主研发的GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)四维

表2 往返探空观测资料集观测要素质量控制前后的样本数、时间变率均值、时间变率标准差、以及资料剔除率

Table 2 The sample numbers, mean value of time variability, standard deviation of time variability, and the data rejection rate of observation elements from return radiosonde data set before and after quality control

	样本数		时间变率的均值		时间变率的标准差		资料剔除率
	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后	质量控制前	质量控制后	
纬向风	2560990	2465230	-0.001 m s^{-2}	-0.001 m s^{-2}	0.52 m s^{-2}	0.25 m s^{-2}	3.74%
温度	2560990	2453340	$-0.008\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$	$-0.009\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$	$0.17\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$	$0.16\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$	4.20%
气压	2560990	2454410	-0.103 hPa s^{-1}	-0.101 hPa s^{-1}	0.38 hPa s^{-1}	0.32 hPa s^{-1}	4.16%
位势高度	2560990	2501400	2.525 gpm s^{-1}	2.474 gpm s^{-1}	8.17 gpm s^{-1}	8.12 gpm s^{-1}	2.33%
相对湿度	2560990	2479280	$-0.007\%\text{ s}^{-1}$	$-0.007\%\text{ s}^{-1}$	$0.57\%\text{ s}^{-1}$	$0.44\%\text{ s}^{-1}$	3.19%

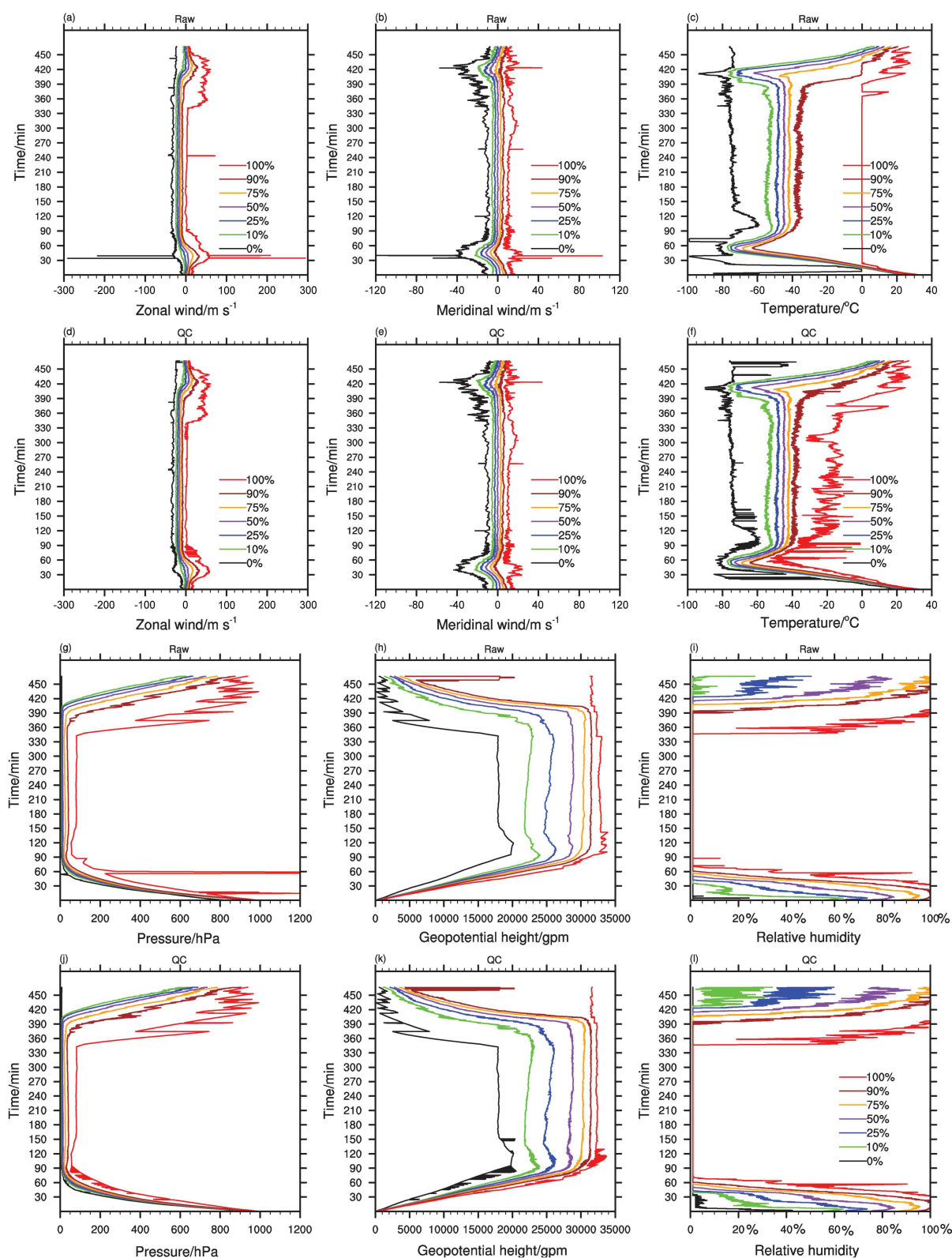


图 8 往返探空观测资料集的质量控制前（第一、三行）和质量控制后（第二、四行）的（a、d）纬向风、（b、e）经向风、（c、f）温度、（g、j）气压、（h、k）位势高度、（i、l）相对湿度的观测值在不同百分位的抽样随时间的演变

Fig. 8 Time evolutions of observation samplings at different percentiles of (a, d) zonal wind, (b, e) meridional wind, (c, f) temperature, (g, j) pressure, (h, k) geopotential height, and (i, l) RH of return radiosonde for raw data (the first and third panels) and data after quality control (second and fourth panels) from return radiosonde data set

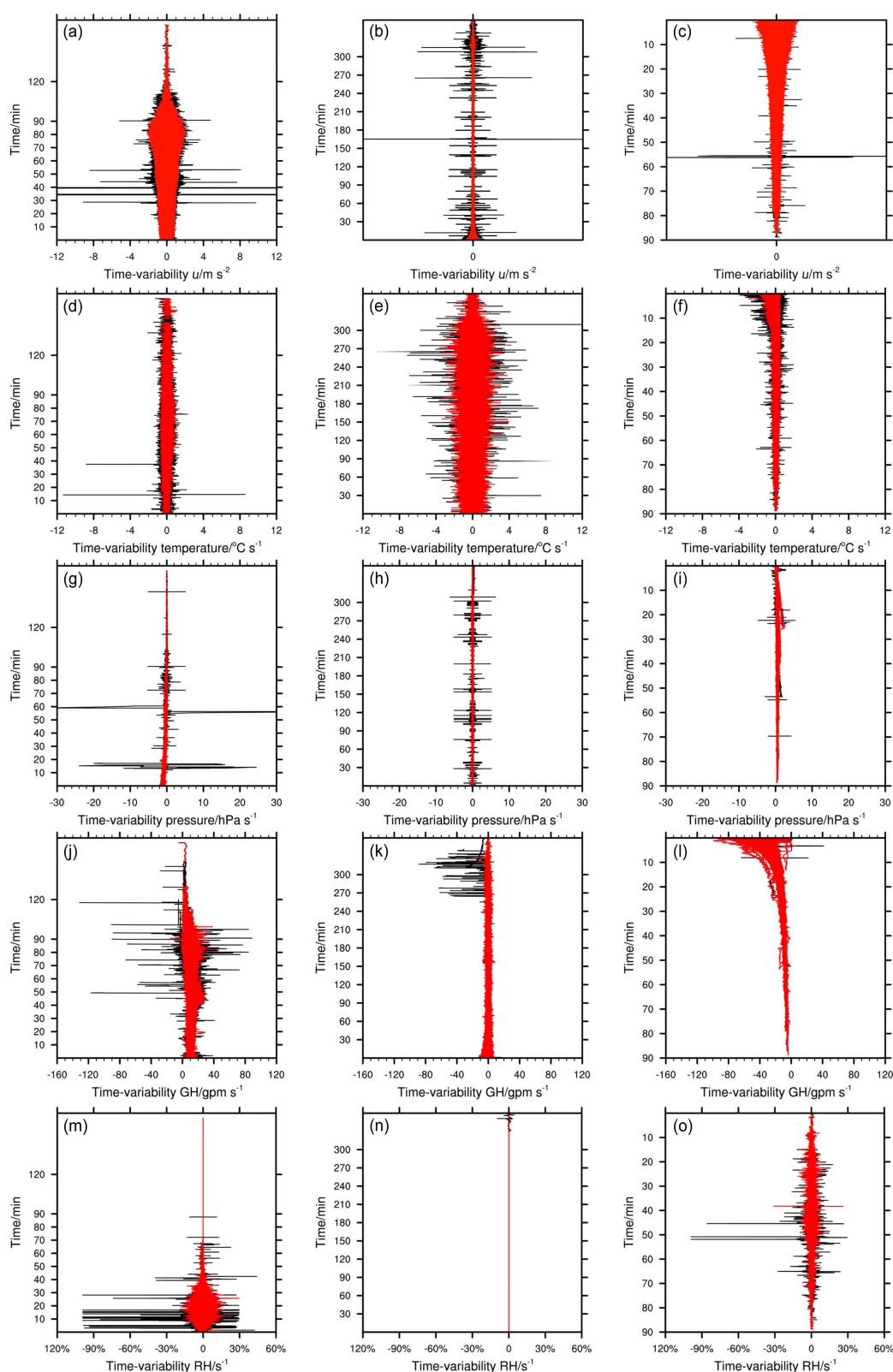


图9 往返探空观测资料集的上升段(左)、平漂段(中)、下降段(右)质量控制前(黑色线)和质量控制后(红色线)的(a、b、c)纬向风、(d、e、f)温度、(g、h、i)气压、(j、k、l)位势高度和(m、n、o)湿度的时间变率随时间的演变

Fig. 9 Time evolutions of time-variability of (a, b, c) zonal wind (u), (d, e, f) temperature, (g, h, i) pressure, (j, k, l) geopotential height (GH), and (m, n, o) relative humidity for ascending stage (left column), drifting stage (middle column), descending stage (right column) of return radiosonde data set before (black lines) and after (red lines) quality control

变分同化系统（以下简称 GRAPES-4Dvar）来评估全时段往返探空的观测数据质量，并结合台站的常规探空进行往返探空上升段资料的评估，以辅助验证观测设备的合理性。文中探测要素的不确定性评估指标主要参考 WMO 仪器与观测方法委员会 CIMO（Commission for Instruments and Methods of Observations）提出的测量标准（WMO, 2019）和中国气象局制定的常规高空气象探测规范（中国气象局, 2010）。

四维变分是三维变分同化在时间维上的扩展，能更准确的考虑观测时间，从而更为精确地计算观测背景差 OMB（Observation Minus Background）（刘永柱等, 2019）。往返探空 OMB 计算具体如

下：首先进行 GRAPES-4Dvar 外循环高分辨率模式的初始化和数组空间分配；然后以 FNL（Final Operational Global Analysis）资料作为模式初始场冷启动，进行高分辨率全物理过程的前向模式积分，积分时长为 6 h；前向积分过程中每到观测时刻外循环模式读入对应时刻的观测，随后计算出 OMB。GRAPES-4Dvar 的观测时间槽为 30 分钟，本文将往返探空资料剖分为 30 分钟观测，采取逐点同化方式（考虑探空漂移信息）代替廓线同化来获得最精确的 OMB 计算。

图 10 给出了往返探空上升段、平漂段和下降段风场 OMB 的标准差和偏差的垂直分布。从图 10 可知，水平风的偏差在各个阶段基本稳定在

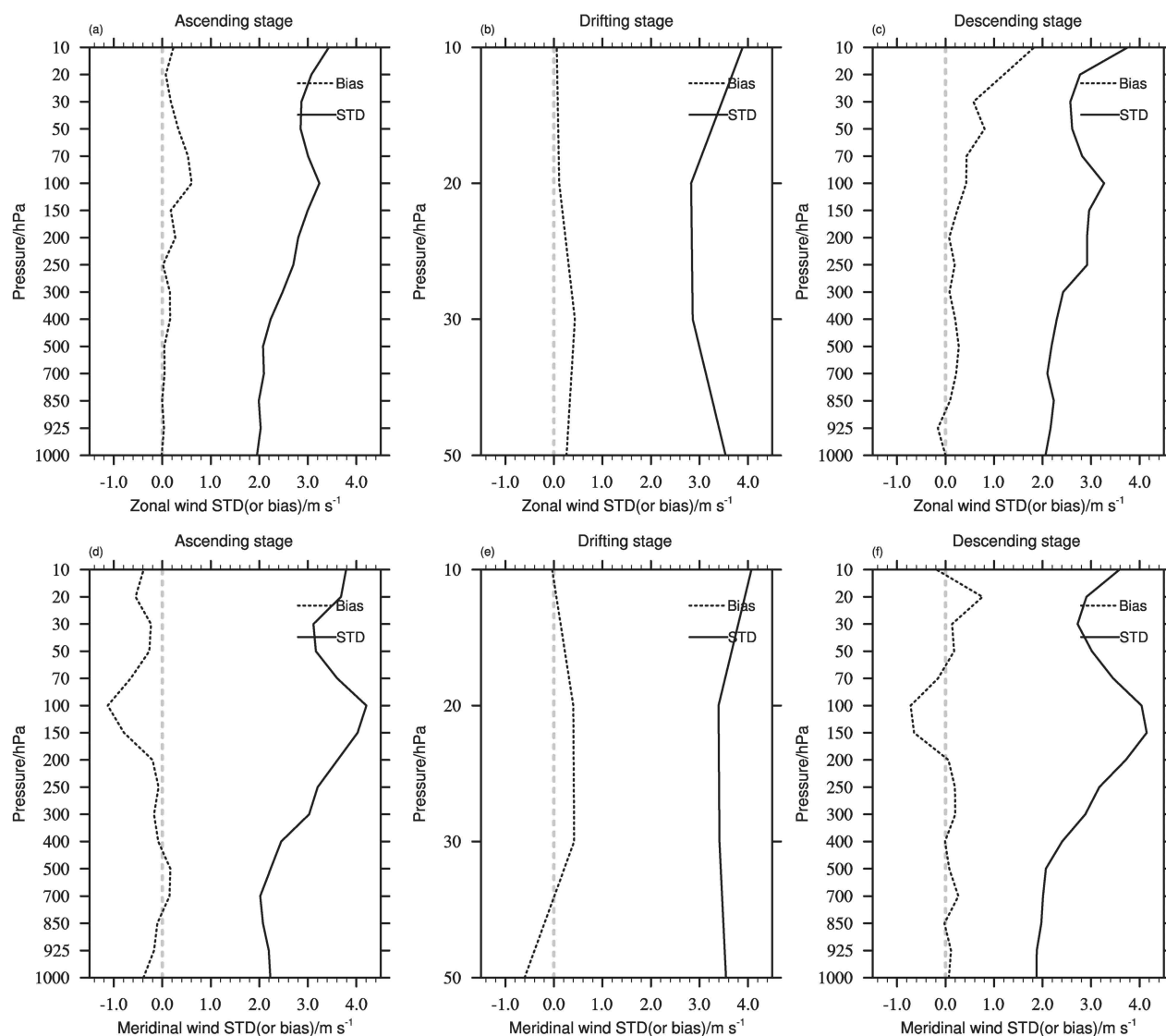


图 10 往返探空观测资料集的水平风相对于 GRAPES 模式背景场的标准差和偏差的垂直分布

Fig. 10 Vertical distributions of STD (Standard deviation) and bias of horizontal wind between return radiosonde data set and GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) model background field

$-0.5\sim 0.5\text{ m s}^{-1}$ 之间,表明测风没有很大的系统性偏差。将大气分为对流层顶以上和对流层顶以下两部分,分别统计风场标准差的平均值,然后与WMO规定的风测量不确定性要求进行比较(计算结果见表3)。根据误差分解原理(李伟等, 2010; 王金成等, 2015),假设观测样本和背景样本足够且满足正态分布,并且观测误差和背景误差无关,可推导出:

$$\sigma_{\text{OMB}}^2 = \sigma_{\text{O}}^2 + \sigma_{\text{B}}^2, \quad (9)$$

其中, σ_{OMB} 表示 OMB 的标准差, σ_{O} 表示观测误差标准差, σ_{B} 表示背景误差标准差。从公式(9)可推理出: $\sigma_{\text{O}} \leq \sigma_{\text{OMB}}$ 。据此理论,分析表3结果可以得出:往返探空水平风的 σ_{OMB} 范围在 $2.42\sim 3.56\text{ m s}^{-1}$,表明仪器测量精度达到了WMO规定的突破目标 $4\sim 6\text{ m s}^{-1}$ 、远优于边界目标 $10\sim 16\text{ m s}^{-1}$ 。此外,对流层顶以下测风精度优于对流层顶以上,下降段探空测风能达达到上升段探空的测风精度,这与ECMWF对于Vaisala RS41新型号探空测风的评估结论相一致(Ingleby, 2017)。

图11是往返探空各个探测阶段温度场的OMB的标准差和偏差的垂直分布。从结果可知,受制于温度传感器的滞后误差和太阳辐射等影响,温度的探测精度总体表现为白天误差大于夜间误差,特别在平漂阶段,温度传感器长时间暴露于太阳照射之下,造成白天/夜间温度差异超过4 K。WMO对于温度不确定度的理想目标范围为 $0.6\sim 1\text{ K}$,突破目标为 $1.8\sim 2.8\text{ K}$,边界目标为6 K。对比往返探空的误差统计值(表3)可以得出,往返探空各个阶段的夜间温度观测均达到了WMO规定的温度突破目标,其中上升段和下降段探空中对流层以下温度探测精度较高,误差低于1 K,达到了理想目标;白天的温度观测除了平漂段探测外,误差都小

于2.8 K,达到了突破目标;平漂段探空的白天温度观测接近边界目标6 K。此外,从平均偏差特征来看,下降段白天的温度观测正偏差较上升段更为明显,其中对流层中低层偏差在1 K以内,高层150 hPa左右达到2 K,20 hPa以上超过3 K,这主要是因为下降段的日间探测对应于午后时段,而午后太阳辐射影响更为显著。

图12为往返探空观测的湿度OMB的标准差和偏差的垂直分布,因为对流层顶以上以及平漂段中湿度一直处于僵值状态,认为探测湿度可疑,因此只统计上升段和下降段对流层顶以下的湿度场观测信息。从图可知,上升段和下降段的湿度场分布具有很强的一致性,表现为500 hPa以下相对于背景场有5%的正偏差,500 hPa以上到对流层顶附近相对于背景场异常偏干。造成湿度探测偏干的可能原因在于湿度传感器在低温、低压情况下与大气之间的水分子交换困难,同时湿度传感器在低温环境下易冻结造成响应变慢(WMO, 2019)。WMO规定湿度探测在对流层以下的突破目标为16%,往返探空上升段湿度探测达到突破目标、下降段观测接近突破目标,两者都远高于边界目标40%,但是距离2%~4%的理想目标还有不小的差距(见表3)。

在气压探测方面(图13),往返探空各个阶段探测的OMB标准差均小于1 hPa,气压观测误差达到了WMO规定的理想目标1 hPa,表明往返探空配备的气压探测计具有较高的准确度,但是存在系统性负偏差,这可能与压力传感器选用材质的抗热冲击性有关。

为了进一步佐证往返探空观测资料的质量,表4给出了同站址的常规业务探空和对应往返探空上升段数据的偏差和标准差的计算结果。总体来看,与常规业务探空相比,往返探空上升段的观测质量

表3 往返探空观测数据集的纬向风、经向风、温度、相对湿度、气压相对于模式背景场的标准差

Table 3 Standard deviations of zonal wind, meridional wind, temperature, relative humidity, pressure between return radiosonde data set and GRAPES model background field

探测阶段	垂直层次	OMB标准差					
		纬向风/ m s^{-1}	经向风/ m s^{-1}	日间温度/K	夜间温度/K	相对湿度	气压/hPa
上升段	对流层顶以下	2.42	2.84	1.03	0.92	15.58%	0.63
上升段	对流层顶以上	3.01	3.56	1.87	1.47	—	0.54
平漂段	对流层顶以上	3.13	3.30	6.03	1.54	—	0.49
下降段	对流层顶以下	2.50	2.74	1.16	0.80	16.48%	0.75
下降段	对流层顶以上	2.81	3.23	2.33	1.45	—	0.61

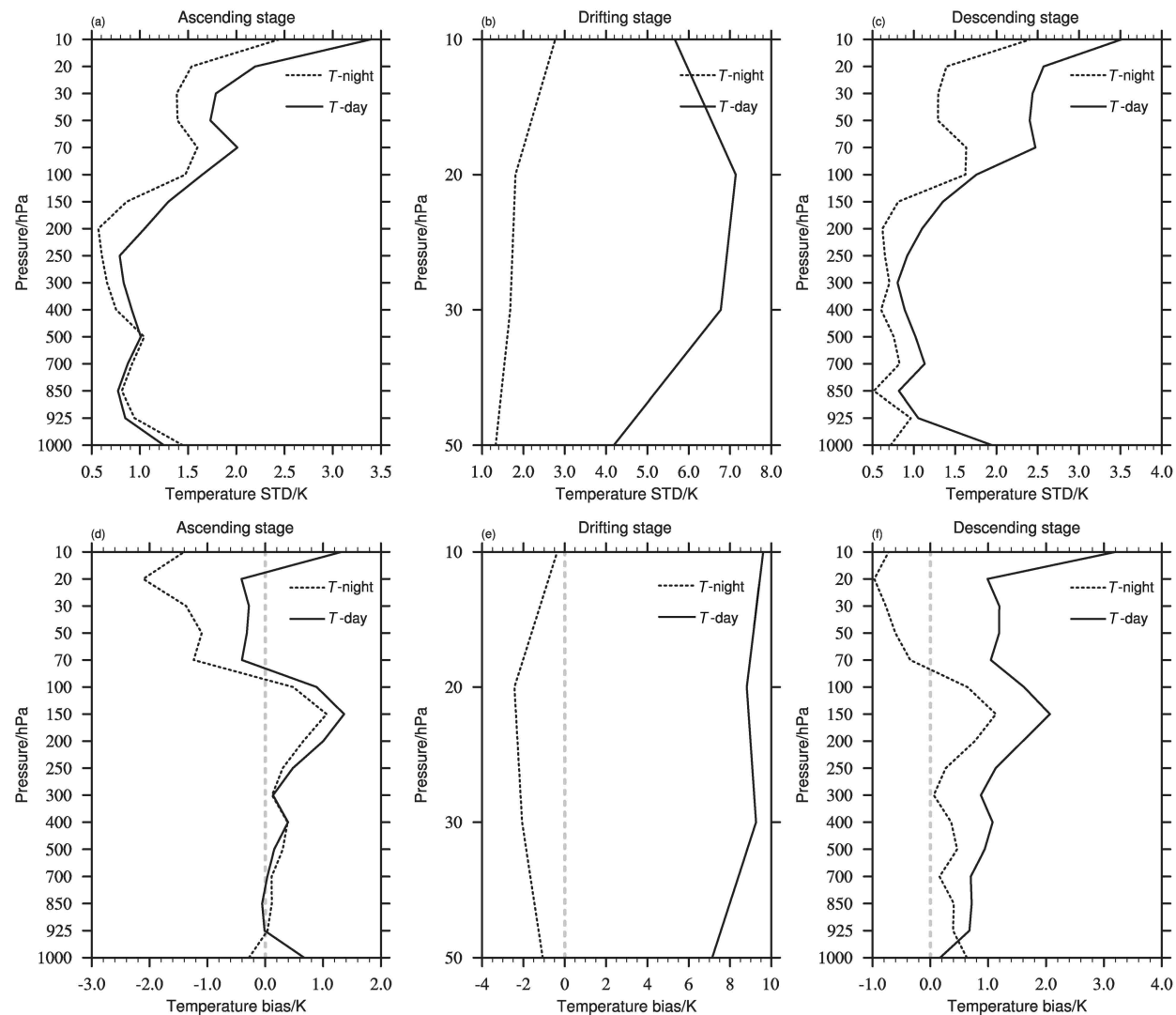


图 11 同图 10，但为温度的标准差和偏差的垂直分布
Fig. 11 As in Fig. 10, but for vertical distribution of STD and bias for temperature

表 4 往返探空观测数据集上升段观测相对于同站址业务探空的标准差和偏差			
Table 4 Standard deviations and biases between return radiosonde data set and operational radiosonde at the same site			
探测要素	垂直层次	标准差	偏差
纬向风	对流层顶以下	3.24 m s ⁻¹	-0.44 m s ⁻¹
	对流层顶以上	3.14 m s ⁻¹	0.50 m s ⁻¹
经向风	对流层顶以下	3.59 m s ⁻¹	0.30 m s ⁻¹
	对流层顶以上	3.37 m s ⁻¹	-0.96 m s ⁻¹
温度	对流层顶以下	1.38 K	0.42 K
	对流层顶以上	2.73 K	0.12 K
气压	对流层顶以下	0.90 hPa	-0.76 hPa
	对流层顶以上	0.64 hPa	-1.82 hPa
相对湿度	对流层顶以下	16.28%	5.51%

基本满足 WMO 的突破目标要求，气压观测更是达到了理想目标，这与以数值预报作为参考场的计算结论是一致的。其中，风场差异相对较大，一方面

可能由于两探空采用的定位方式不同（GPS 定位和雷达定位），另一方面两探空的施放时间并不严格意义上同步，所以造成上述差异。

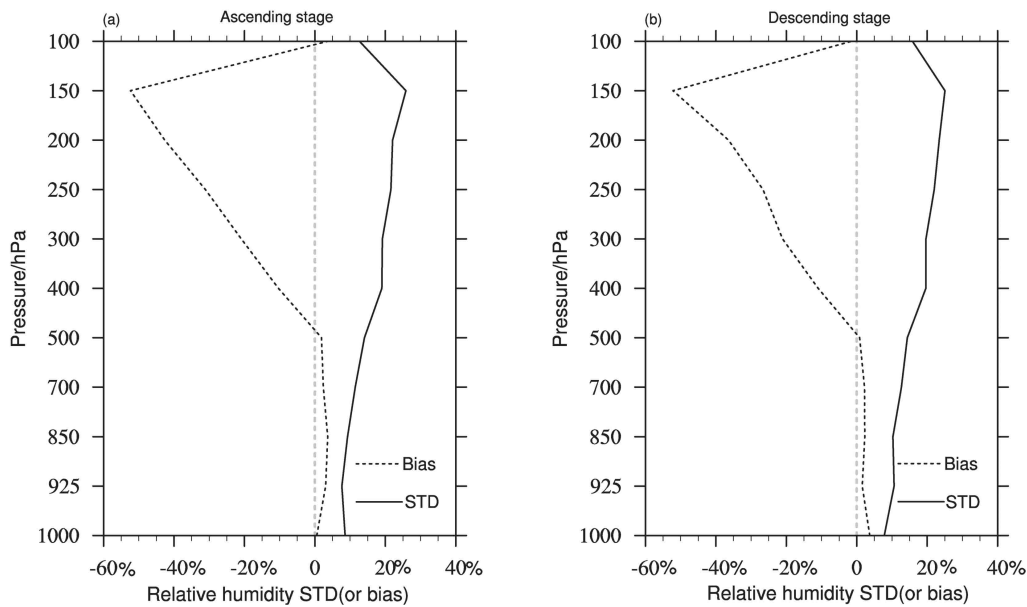


图 12 同图 10, 但为相对湿度的标准差和偏差的垂直分布

Fig. 12 As in Fig. 10, but for vertical distribution of STD and bias for relative humidity

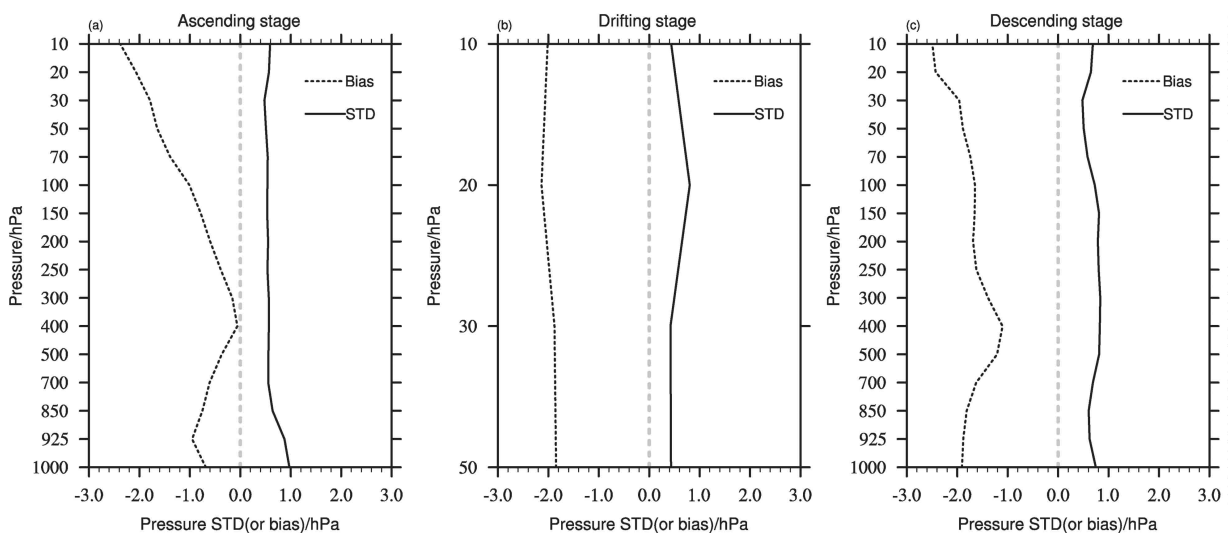


图 13 同图 10, 但为气压的标准差和偏差的垂直分布

Fig. 13 As in Fig. 10, but for vertical distribution of STD and bias for pressure

综合上述, 往返探空的水平风、温度、湿度和气压测量的不确定度基本达到了 WMO 规定的突破目标, 远优于边界目标, 部分观测要素甚至实现了理想目标。从探测层面上, 认为往返探空资料可信, 具有可用性。从数值同化层面上, 往返探空是否具有可同化性? 变分同化系统要求观测背景差 OMB 尽量满足无偏和高斯分布, 图 14 给出了往返探空探测要素的 OMB 的概率分布图。从图可知, 往返探空各个阶段风场观测基本满足正态无偏, 符合变分同化系统对于观测的基本假定。温度传感器由于

太阳辐射影响, 日间存在正系统偏差, 特别是平漂阶段, 系统偏差达到 8.73 K; 夜间系统性偏差较小, 能满足同化要求。气压测量和湿度测量均为系统性负偏差, 偏差均值分别为 -1.56 hPa 和 -10.4%。总的来说, 往返探空风场观测和夜间温度观测可直接同化, 湿度等系统性偏差较大的观测要素在同化前最好进行偏差订正来提高资料的应用效果。

5 总结和讨论

基于 2018 年国内首次往返式探空野外观测试

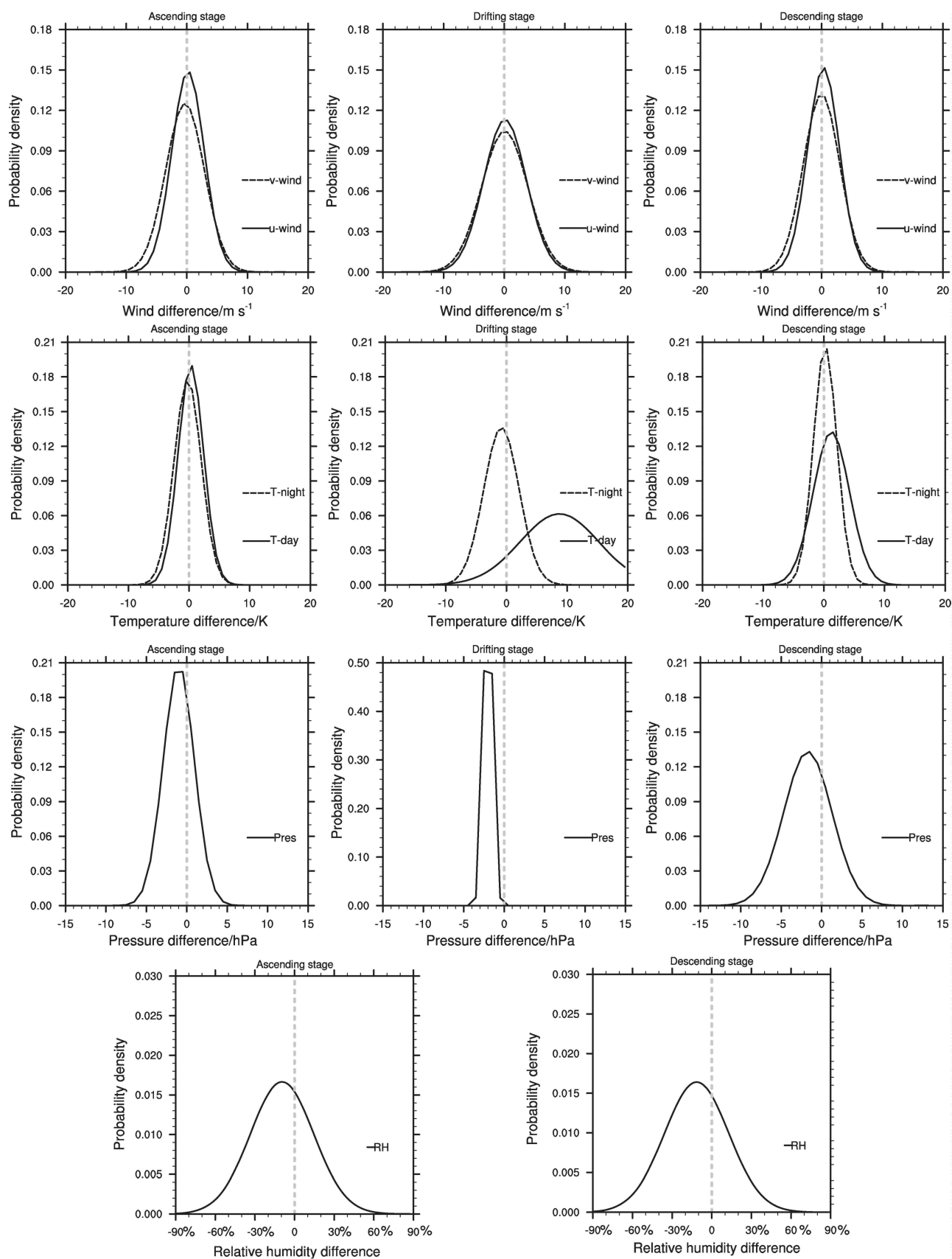


图 14 往返探空观测资料集与 GRAPES 模式背景场差值的概率密度分布

Fig. 14 Probability density distribution (PDF) of differences between return radiosonde data set and GRAPES model background field

验取得的夏季 1 个月的观测资料, 本文首先建立了面向业务化应用的往返式探空质量控制方案, 并对质量控制方案的合理性进行论证; 进而基于我国自主研发的 GRAPES-4Dvar 同化系统开展质量控制后全观测时段资料的不确定性分析, 同时结合常规业务探空来进一步佐证观测资料质量是否满足 WMO 提出的探测准确度要求; 最后分析了观测资料的偏差特征来探讨数值预报的可同化性。主要结论如下:

(1) 面向业务化应用的往返探空质量控制算法针对上升段、平漂段、下降段探测资料的不同特性, 采取不同的质量控制参数(如风切变阈值、Z 阈值等)来分阶段质量控制资料。每阶段质量控制包含了近 10 种检查步骤, 采用综合决策算法对观测要素给予最终质量标记。对质量控制前后的观测资料集进行百分位抽样检查和一致性指标统计, 无论从定性分析还是定量化角度都证明了本文的质量控制算法是合理有效的。

(2) 利用数值天气预报高时间分辨率的模式预报场和同站址常规业务探空对往返探空质量控制后的数据进行精细化评估, 结果表明往返探空资料是可信、可用的。它的测风不存在系统性偏差, 不确定度达到了 WMO 规定的突破目标, 远优于边界目标; 温度观测表现为昼夜差异明显, 夜间温度观测系统性偏差小, 不确定度满足 WMO 规定的突破目标, 但是日间观测系统性偏差大, 特别是平漂段观测, 受太阳辐射影响极为明显, 后期使用中需对日间温度加以辐射偏差订正; 气压观测准确度较高, 不确定度小于 1 hPa, 达到了 WMO 的理想目标; 在湿度探测方面, 湿度测量的不确定度接近 WMO 规定的突破目标, 但是负偏差明显, 未来需要提高我国探空湿度传感器的探测性能。

(3) 变分资料同化要求观测基本无偏, 从这一假定出发可以得到: 往返探空的风场观测和夜间温度观测系统性偏差接近于零, 满足变分同化系统对于观测性质的高斯、无偏假定, 可直接用于同化系统。日间温度、气压和湿度观测相较于数值模式背景场系统性偏差明显, 在资料同化前需要进一步开展偏差订正工作, 从而更有效的发挥资料价值。

本文的研究工作为以后开展往返式探空在数值模式中的同化应用积累了经验, 未来的研究工作包括:

(1) 质量控制算法进一步优化和普适性验证。秒级探空测风数据存在“钟摆效应”, 导致观测数

据中实际包含了噪音, 需要开展频谱分析技术对风场进行滤波来提高数据的观测代表性。其次, 本文质量控制算法中采用的阈值参数是基于观测样本后验统计得到的, 具有的一定的经验性, 需要收集更多的往返观测外场数据进行质量控制算法效果的普适性检验。此外, 未来需充分考虑探测变量间的物理关系来联合判断数据质量, 最终形成更为完善的综合质量控制方案。

(2) 开展与独立观测资料的交叉比对研究。需要积累更多的往返探空观测资料来完成与其他类型观测资料(如掩星资料、飞机报资料等)的样本匹配和交叉比对工作, 从而确定往返探空的观测误差, 为数值模式变分同化系统提供参考值。

致谢 中国气象科学研究院阮征研究员、国家气象中心陶士伟正研级高工以及国家气象信息中心远芳高级工程师对本文给予了宝贵建议和帮助, 谨此致谢!

参考文献 (References)

- Allen S J, Vincent R A. 1995. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations [J]. *J. Geophys. Res.*, 100(D1): 1327–1350. doi:10.1029/94JD02688
- Anderson E, Järvinen H. 1999. Variational quality control [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125(554): 697–722. doi:10.1002/qj.49712555416
- 卞建春, 陈洪滨, 吕达仁. 2005. 用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特性 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 48(9): 1548–1558. Bian Jianchun, Chen Hongbin, Lü Daren. 2005. Statistics of gravity waves in the lower stratosphere over Beijing based on high vertical resolution radiosonde [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(9): 1548–1558. doi:10.1360/03yd0512
- 陈磊, 卞建春, 刘毅, 等. 2017. 可业务化应用的 L 波段探空系统高空风改进算法 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 11(1): 22–27. Chen Lei, Bian Jianchun, Liu Yi, et al. 2017. An improved upper-air wind measurement algorithm for L-band radiosonde sounding system [J]. *Desert and Oasis Meteorology (in Chinese)*, 11(1): 22–27. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2017.01.003
- Choi Y, Ha J C, Lim G H. 2015. Investigation of the effects of considering balloon drift information on radiosonde data assimilation using the four-dimensional variational method [J]. *Wea. Forecasting*, 30(3): 809–826. doi:10.1175/WAF-D-14-00161.1
- Collins W G. 2001. The operational complex quality control of radiosonde heights and temperatures at the national centers for environmental prediction. Part I: Description of the method [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40(2): 137–151. doi:10.1175/1520-0450(2001)040<0137:TOCQCO>2.0.CO;2
- Durre I, Vose R S, Wuertz D B. 2008. Robust automated quality assurance of radiosonde temperatures [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(8): 2081–2095. doi:10.1175/

- 2008JAMC1809.1
- Faccani C, Rabier F, Fourrié N. 2009. The impacts of AMMA radiosonde data on the French global assimilation and forecast system [J]. *Wea. Forecasting*, 24(5): 1268–1286. doi:10.1175/2009WAF2222237.1
- 傅新姝, 谈建国. 2017. 地基微波辐射计探测资料质量控制方法 [J]. *应用气象学报*, 28(2): 209–217. Fu Xinshu, Tan Jianguo. 2017. Quality control of temperature and humidity profile retrievals from ground-based microwave radiometer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 28(2): 209–217. doi:10.11898/1001-7313.20170208
- 郭艳君, 李庆祥, 丁一汇. 2009. 探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响 [J]. *大气科学*, 33(6): 1309–1318. Guo Yanjun, Li Qingxiang, Ding Yihui. 2009. The effect of artificial bias on free air temperature trend derived from historical radiosonde data in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(6): 1309–1318. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.16
- Hamilton K, Vincent R A. 1995. High-resolution radiosonde data offer new prospects for research [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 76(49): 497–506. doi:10.1029/95EO00308
- 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 Min, Tian Weihong, Gong Jiandong. 2014. Study of L band second level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 40(2): 158–165. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.003
- 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. doi:10.1175/JTECH-D-14-00160.1
- Ingleby B. 2017. An assessment of different radiosonde types 2015/2016 [R]. Technical Memorandum NO. 807.
- Ingleby B, Edwards D. 2015. Changes to radiosonde reports and their processing for numerical weather prediction [J]. *Atmospheric Science Letters*, 16(1): 44–49. doi:10.1002/asl2.518
- Ingleby B, Pauley P, Kats A, et al. 2016. Progress toward high-resolution, real-time radiosonde reports [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97(11): 2149–2161. doi:10.1175/BAMS-D-15-00169.1
- Langland R H, Toth Z, Gelaro R, et al. 1999. The North Pacific Experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80(7): 1363–1384. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<1363:TNPENT>2.0.CO;2
- Laroche S, Sarrazin R. 2013. Impact of radiosonde balloon drift on numerical weather prediction and verification [J]. *Wea. Forecasting*, 28(3): 772–782. doi:10.1175/WAF-D-12-00114.1
- 李柏, 李伟. 2011. 阳江第八届国际探空系统比对试验综述 [J]. *气象科技进展*, 1(3): 6–13. Li Bai, Li Wei. 2011. A review of Yangjiang 8th international radiosonde intercomparison [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 1(3): 6–13.
- 李伟, 郭启云, 赵培涛. 2010. L 波段电子探空仪测量结果不确定度分析 [C]//经济发展方式转变与自主创新——第十二届中国科学技术协会年会 (第二卷). 福州: 中国科学技术协会学会, 福建省人民政府. Li Wei, Guo Qiyun, Zhao Peitao. 2010. The measurement data uncertainty analysis for L band electronic rawinsonde [C]//Transformation of Economic Development Mode and Independent Innovation—The 12th Annual Meeting of China Association of Science and Technology (Volume II) (in Chinese). Fuzhou: China Association of Science and Technology, Fujian Provincial People's Government.
- 李跃清, 赵兴炳, 张利红, 等. 2012. 2012 年夏季西南涡加密观测科学试验 [J]. *高原山地气象研究*, 32(4): 1–8. Li Yueqing, Zhao Xingbing, Zhang Lihong, et al. 2012. The intensive observation scientific experiment of Southwest China vortex in the summer of 2012 [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 32(4): 1–8. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2012.04.001
- 廖菲, 邓华, 李旭. 2017. 基于风廓线雷达的广东登陆台风边界层高度特征研究 [J]. *大气科学*, 41(5): 949–959. Liao Fei, Deng Hua, Li Xu. 2017. A study on boundary layer height characteristics of landing typhoons by wind profilers in Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(5): 949–959. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16208
- 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. doi:10.1007/s00376-014-4030-6
- 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 Jie, Zhou Zijiang. 2018. Quality control of the global conventional meteorological observations: Progresses and prospects [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 8(1): 56–63. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.006
- 刘寅. 2014. FY-3A 气象卫星臭氧总量数据的质量控制方案及其在台风 Tembin (2012) 和 Isaac (2012) 中的应用 [J]. *大气科学*, 38(6): 1066–1078. Liu Yin. 2014. Quality control of FY-3A total column ozone and its application in typhoons Tembin (2012) and Isaac (2012) [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38(6): 1066–1078. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13224
- 刘雨佳, 陈洪滨, 金德镇, 等. 2014. 加密自动气象站雨量计资料的质量控制及其相关关系的研究 [J]. *大气科学*, 38(1): 159–170. Liu Yujia, Chen Hongbin, Jin Dezhen, et al. 2014. Quality control and representativeness of automatic weather station rain gauge data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38(1): 159–170. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13116
- 刘永柱, 龚建东, 张林, 等. 2019. 线性化物理过程对 GRAPES 4DVAR 同化的影响 [J]. *气象学报*, 77(2): 196–209. Liu Yongzhu, Gong Jiandong, Zhang Lin, et al. 2019. Influence of linearized physical processes on the GRAPES 4DVAR [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 77(2): 196–209.
- Loehrer S M, Edmands T A, Moore J A. 1996. TOGA COARE upper-air sounding data archive: Development and quality control procedures [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(11): 2651–2672. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<2651:TCUASD>2.0.CO;2
- 马颖, 姚雯, 黄炳勋. 2011. 用初估场对比中芬探空仪温度和位势高

- 度记录 [J]. *应用气象学报*, 22(3): 336–345. Ma Ying, Yao Wen, Huang Bingxun. 2011. Comparison of temperature and geopotential height records between L-Band and RS90/92 radiosonde systems using first-guess field [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 22(3): 336–345. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2011.03.010
- Norris B. 1990. Preprocessing and general data checking and validation [R]. M1.4-3.
- 舒守娟, 王元, 宋金杰. 2011. 西北太平洋台风“海棠”结构的 GPS 下投式探空仪观测分析 [J]. *气象学报*, 69(6): 933–944. Shu Shoujuan, Wang Yuan, Song Jinjie. 2011. Observational analysis of the structure of typhoon Haitang (0505) over the western North Pacific by using the GPS dropsonde data [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 69(6): 933–944.
- 孙丽, 赵姝慧. 2018. 探空仪湿度测量误差研究现状及其对云识别的影响 [J]. *地球科学进展*, 33(1): 85–92. Sun Li, Zhao Shuhui. 2018. Research on humidity measurement error of radiosonde and its influence on cloud recognition [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 33(1): 85–92. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.01.0085
- 王金成, 龚建东, 赵滨. 2015. 一种新的 COSMIC 大气折射率资料观测误差估计方法及在 GRAPES 全球三维变分同化中的应用 [J]. *气象学报*, 73(1): 142–158. Wang Jincheng, Gong Jiandong, Zhao Bin. 2015. A new method for estimating observation error of the COSMIC refractivity data and its impacts on GRAPES-GFS model weather forecasts [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 73(1): 142–158.
- Wang L, Geller M A. 2003. Morphology of gravity-wave energy as observed from 4 years (1998–2001) of high vertical resolution U.S. radiosonde data [J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D16): 4489. doi:10.1029/2002JD002786
- 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 Liji, Yang Cheng. 2018. Separation of planetary and gravity waves in the tropical stratosphere with multi-station radiosonde data [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 76(1): 62–77.
- WMO. 2019 Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No.8) [EB/OL]. <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/IMOP-home.html>. [2019-12-03]
- 姚爽, 陈敏, 王建捷. 2015. L 波段分钟数据在 WRF 模式中的变分同化应用试验 [J]. *气象*, 41(6): 695–706. Yao Shuang, Chen Min, Wang Jianjie. 2015. Variational assimilation experiment of L-band minute-level sounding data with WRF model [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 41(6): 695–706. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.06.004
- 姚雯, 马颖. 2015. 秒级探空数据随机误差评估 [J]. *应用气象学报*, 26(5): 600–609. Yao Wen, Ma Ying. 2015. Evaluation on the random error of second level sounding data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 26(5): 600–609. doi:10.11898/1001-7313.20150509
- 翟盘茂. 1997. 中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题 [J]. *气象学报*, 55(5): 563–572. Zhai Panmao. 1997. Some gross errors and biases in China's historical radiosonde data [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 55(5): 563–572.
- 张诚忠, 万齐林, 丁伟钰, 等. 2012. 下投探空资料在台风莫拉克路径预报的应用试验 [J]. *气象学报*, 70(1): 30–38. Zhang Chengzhong, Wan Qilin, Ding Weiyu, et al. 2012. An experiment in application of the dropsonde data to forecasting the track of typhoon Morakot [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70(1): 30–38.
- 张金龙, 阮新. 2017. 气象探空资料质量控制系统的实现 [J]. *信息技术与信息化* (11): 55–57. Zhang Jinlong, Ruan Xin. 2017. Realization of quality control system for meteorological radiosonde data [J]. *Information Technology & Informatization (in Chinese)* (11): 55–57. doi:10.3969/j.issn.1672-9528.2017.11.013
- 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. Standard for Operational Upper Air Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Zou X, Zeng Z. 2006. A quality control procedure for GPS radio occultation data [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D2): D02112. doi:10.1029/2005JD005846