

郝民,王瑞春,陆慧娟,等,2019. Vaisala RS92/90 探测仪的湿度观测偏差订正初步试验[J]. 气象,45(12):1727-1735. Hao M, Wang R C, Lu H J, et al, 2019. A preliminary test for the correction of the humidity observation deviation of the Vaisala RS92/90 detector[J]. Meteor Mon, 45(12):1727-1735(in Chinese).

Vaisala RS92/90 探测仪的湿度观测 偏差订正初步试验^{*}

郝 民 王瑞春 陆慧娟 龚建东

中国气象局数值预报中心, 北京 100081

提 要: 探空观测资料无论在天气预报还是数值预报中都是最基本和最重要的一类资料来源。Vaisala RS92/90 探测仪资料又在这类观测中占比很大,其湿度观测资料质量的好坏直接影响同化分析和降水预报,故需要对该资料进行质量评估与偏差订正。通过与 NCEP 和 EC 再分析的湿度场比较,发现 Vaisala RS92/90 探测仪的湿度观测偏差,借鉴 Yoneyama et al(2008)对该仪器湿度观测的偏差订正方案,从几种订正方案中优选出对分析改进最为显著、考虑太阳辐射等因素影响的订正方案,并将该方案应用到 GRAPES-GFS 准业务试验中。试验结果表明:Vaisala RS92/90 探空湿度观测偏差订正后,同化分析与预报有中性偏正效果。连续试验中订正后预报距平相关在东亚与热带有改进,预报评分显示热带、北半球评分略有提高。该订正方案在实际业务中有其应用价值。

关键词: Vaisala RS92,湿度观测,偏差订正,同化预报

中图分类号: P413, P414

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.010

A Preliminary Test for the Correction of the Humidity Observation Deviation of the Vaisala RS92/90 Detector

HAO Min WANG Ruichun LU Huijuan GONG Jiandong

CMA Numerical Weather Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: Sounding observation data are the most basic and important data source in weather forecast and numerical weather prediction. Vaisala Radiosonde 92/90 data account for a large proportion of this kind of observation. The quality of the humidity observation data directly affects the assimilation analysis and model forecast, so it is necessary to evaluate the quality of the data and correct the deviation. The humidity observation deviation of RS92/90 detector is found by comparing the humidity field of NCEP with EC reanalysis. Based on the deviation correction scheme of Yoneyama et al (2008) for the humidity observation of the instrument, the revised scheme, which is the most significant for the analysis and improvement and takes into account the influence of solar radiation and other factors, is selected from the comparison of several revised schemes. The scheme is applied to GRAPES-GFS test. The experimental results show that after the deviation of humidity observation for the RS92/90 sounding is corrected, the assimilation analysis and prediction have neutral effect. After the correction of prediction anomaly correlation in continuous experiments, there is an improvement in East Asia and the Tropics. The forecast score is slightly improved in these areas, so the correction scheme of humidity observation deviation of RS92/90 sounding instrument

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506003)和国家自然科学基金项目(41375107)共同资助

2018 年 1 月 18 日收稿; 2019 年 7 月 31 日收修定稿

第一作者:郝民,主要从事资料同化研究. Email:haomin@cma.gov.cn

has its application value in practical operation.

Key words: Vaisala RS92, humidity observation, deviation correction, data assimilation and forecast

引 言

数值预报的发展,观测技术的日新月异,使得通过各种卫星和 GPS 等观测手段获取的大气观测数据越来越多,但探空观测资料仍在气象研究和应用中起着非常重要的作用(姚爽等,2015;郝民等,2016)。在数值预报的科学研究及业务同化应用中,无线电探空观测数据因为能够完整描述大气三维结构而成为极其重要的大气信息来源(Faccani et al, 2009),也是改善数值模式初始场质量、提高模式预报水平不可缺少的基础资料之一。

目前全球探空观测站有五百多个,其中使用 Vaisala 探空仪占比最大,达到 43%。芬兰 Vaisala 公司于 20 世纪 30 年代发明了第 1 台机电式探空仪,20 世纪 80 年代生产了模拟电子探空仪 RS80 型,之后又推出 RS90 型,2001 年推出数字式探空仪 RS92,这标志着 Vaisala 的探空仪技术发展到了新的水平,探空系统和探空仪完全实现了数字化(赵世军等,2012)。RS92 型探空仪为全数字调频式探空仪,抗干扰能力强,每 2 s 采集和发送一组气压、温度和湿度数据,垂直分辨率高,全数字技术也简化了地面接收设备。21 世纪 RS92 型探测仪得到广泛的应用,而 RS90、RS80 型仅有个别观测站仍在使用的。根据 2010 年世界气象组织对多种探空仪的对比验证结果表明:Vaisala RS92 型探空仪是当前国际上应用广泛、气象要素测量精度较高的一种探空仪*。

虽然在天气预报和数值预报的科研与业务中常常会把 Vaisala RS92 探测仪数据作为其他观测数据校验的依据,但近年来国外有研究发现:RS92 探空仪的湿度观测与冷镜式露点/霜点仪比较,随着高度增加有明显的干偏差(Yoneyama et al, 2008);其观测值与低温霜点湿度计水汽测量相比,在对流层低层有 5% 的干偏差;对流层中高层则达到 10%~20% (Agustí-Panareda et al, 2009; Bian et al, 2011),这些误差影响主要包含三方面:观测时间滞后、测量误差、辐射误差。其中前两个多与仪器性能有关,而辐射误差主要考虑太阳辐射对探空仪器的

加热造成的偏差,对于该偏差的订正采用与气压、高度的相关函数等方法(Vömel et al, 2007)加以订正。张思齐等(2018)比较探空观测与再分析的大气湿度资料发现也有偏低现象存在。这些研究成果需要我们重新认识 RS92 探空仪的湿度观测性能,以便在科研和业务中更好地使用它,改进同化分析与模式预报效果。本文基于上述想法,通过将 RS92 探空仪的湿度观测与 NCEP 和 EC 再分析的湿度场比较,了解 RS92/90 探测仪的湿度观测偏差状况,并采用偏差订正方案,从而提高该资料的使用精度,改善其在同化预报中的使用效率。

1 不同型号探测仪器的分布

全球探空观测站有 570 多个,使用的主要探空仪器有 30 多种,其中使用 Vaisala 探空仪有 243 个测站,占比达到 43%。中国区的探空站 120 个,主要是三个国产厂家生产的 L 波段探空仪(郝民等, 2014),其他还有些探空仪器使用测站数量较少。图 1 是全球不同探测仪器的分布,不同颜色不同编码代表不同厂家的仪器。其中 Vaisala RS 92/90 探空仪仪器编码主要集中在 78~81,仪器分布在欧洲大陆,美洲和大洋洲,共约有 212 个站,占总测站数的 37%,相比其他仪器,RS92/90 探空仪占比数最大(主要是 RS92 仪器,RS90 只有个别几个站),所以分析评估 RS 92/90 仪器观测数据质量的好坏,可了解认识该仪器资料在全球数值预报模式同化的应用效果。

2 Vaisala RS92/90 探测数据偏差分析

由于 Vaisala 探测仪器使用广泛,仪器的性能、测量精度对全球数值模式的同化分析有直接的影响,所以我们必须对其性能偏差有所了解。因 RS92/90 型探空仪为使用占比最大的一类仪器,故选其为代表,研究其偏差特点。由图 1 看出,其在欧洲区分布密集,故重点分析欧洲区该仪器的湿度观

* <http://www.vaisala.com/en/products/sounding-System sand radiosondes/radiosondes/Pages/RS92.aspx>[2010-12-20]

测偏差状况。

在资料同化试验中分别与 2013 年 7 月逐日 00 时(世界时,下同)、12 时欧洲区 NCEP、EC 再分析资料比较,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直层次为 17 层(夏静雯和傅云飞,2016;王瑞文等,2016;于翡等,2018)。以这两种再分析资料为背景场,同化探空资料,试验中比较相应时间、相应层次两者湿度的垂直平均偏差和均方根偏差(刘佩廷等,2017;万晓敏等,2017;陈明轩等,2017;陈志雄等,2017)。前人比较试验证实:EC 再分析场较 NCEP 再分析场与相同观测和背景场条件下,在湿度分析上偏差较小、且有更高的精度,因此本文与此两种再分析资料比较是有积极的参考意义的(朱彦良等,2012;郝民等,2015;唐南军等,2014)。由图 2 分析看出无论是平均偏差还是均方根偏差,在 100 hPa 以下多为正值,即背景湿度场大于观测湿度值(郝民等,2018)。以 NCEP 再分析为背景场与探空湿度观测的偏差明显大于以 EC 再分析为背景场与探空湿度观测的偏差,说明 EC 再分析湿度场比 NCEP 再分析湿度场更接近探空观测湿度值。NCEP 再分析偏差在 300 hPa 以下多为 20% 左右的正平均偏差(图 2a, 2b),均方根偏差大于 30%,即 NCEP 再分析数据大于探空观测湿度值,EC 再分析湿度平均偏差在 500 hPa 以下都小于 5%,且 00 时 500 hPa 以下平均偏差在 0 线附近(图 2c, 2d),说明探空湿度观测与 EC 再分析场基本接近一致。相比之下,12 时偏差明显要大于 00 时。这与太阳辐射加热有关。平均偏差和均方根偏差最大基本都在 250 hPa 附近,其中平均偏差最大到 30%。由此看出低层偏差小,高层偏差大。在 500 hPa 以下 EC 再分析湿度场与探空观测数据接近,在该层以上探空湿度观测小于 EC 再分析场,说明探空湿度观测有偏干的现象。根据 Vömel et al(2007)研究这种干偏差与太阳辐射加热等因素有关。

为了更深入分析 EC 再分析湿度场与探空湿度观测偏差,图 3 给出 2013 年 7 月 12 时欧洲区以 EC 再分析为背景场湿度与探空湿度观测的分段平均偏差和均方根偏差的垂直分布。由分段偏差图可以看出:当 EC 再分析湿度大于 60% 时,湿度偏差较大(图 3a, 3b);当湿度小于 60% 时,偏差明显减小(图 3c, 3d)。平均偏差和均方根偏差在 600 hPa 以上比 600 hPa 以下大得多(图 3a, 3b),600 hPa 以下都在 5% 以内。图 3b~3d 中 600 hPa 以下偏差很

小接近于 0。EC 再分析湿度小于 20% 时,300 hPa 以下偏差接近于 0(图 3d)。由此看出探空湿度观测偏差大是在湿度大于 60% 的部分,并且在 600 hPa 以上的层次上。低于 600 hPa 以下偏差很小,说明探空湿度观测与 EC 再分析湿度在低层基本是一致的。对于湿度偏差大的高层,探测仪器表现的偏干在图 3a, 3b 中尤为显著。为了减小这种偏差,必须对其进行探空湿度观测的偏差订正,以提高该资料使用的精度和准确性。

3 偏差订正方案

Yoneyama et al(2008)发现 RS92 探空仪器存在明显的湿度观测的干偏差,并且白天的干偏差大于晚上,所以考虑太阳辐射的关系,对 RS92 探测湿度观测进行偏差订正。主要针对太阳辐射带来的偏差,考虑探测仪器的探测观测与气压、高度的函数关系,进行相应的湿度偏差订正。订正前后的湿度场通过与冷镜式露点/霜点仪观测的湿度比较,其偏差明显减小;此外还与 GPS PW 可降水观测资料反演的湿度场进行互校,发现其经过订正后偏差明显减小,订正效果非常显著。同时分析湿度偏差订正发现:订正主要表现在 60% 以上的湿度大值区,这部分订正值占到 5% 以上;其他部分湿度场有 3% 需要订正。在低层的湿度偏差较小,而高层 150 hPa 偏差达到 30%,所以湿度偏差订正主要是订正高层观测和湿度的大值区。

下文借鉴该方法对 RS92 探空仪器湿度观测数据进行相应的偏差订正,考虑到测站探测仪器受太阳辐射的影响,计算时考虑太阳高度角、气压等因素,湿度观测偏差订正方案为:

$$RH_{\text{dif}} = -5.61(\ln P)^2 + 88.17(\ln P) - 341.51 \quad (1)$$

$$C = \cos\theta / \cos\theta_m \quad (2)$$

$$RH_{\text{cor}} = [100 / (100 + C \times RH_{\text{dif}})] \times RH_{\text{obs}} \quad (3)$$

式中, C 是订正廓线的多重系数,它根据式(2)计算得到,晚上该系数为零; RH_{dif} 是探测仪器观测的偏差值,与气压有关; m 是测站太阳高度角平均值,与观测时间和测站位置有关。由式(3)看出 RH_{cor} 只有白天有订正值,晚上时即为 RH_{obs} 。

4 试验方案及结果分析

为了解采用该方案对 RS92 探空仪器湿度观测

偏差订正后对资料同化分析与模式预报带来的影响,利用 GRAPES(Global Regional Assimilation Prediction)3DVAR(Three Dimensional Variational Data Assimilation)全球同化系统进行两个时间段的连续试验(万晓敏等,2019)。首先选取 2013 年 7 月 1—25 日资料,仅使用探空观测资料进行同化分析试验,并与 EC 再分析的湿度场进行比较;此外还选取 2016 年 6 月 1—30 日资料进行连续试验,同化全部 GRAPES 业务同化预报中使用的观测资料。通过比较 GRAPES-GFS(Global Forecast System)全球分析预报结果,分析探空湿度观测偏差订正的效果。

4.1 试验方案

根据 Yoneyama et al(2008)对 RS92/RS90 探测仪器湿度观测的偏差订正公式,结合 GRAPES 试验中用到观测资料,对其公式的应用进行相应的修改与调整。试验共分四组:试验一为控制试验(ctl),试验二到试验四都是依据式(1)~(3),但在太阳高度角的计算、观测湿度订正层次和订正值范围量值上有差异区别。其中:试验二(yone_zen_all)根据观测站位置计算太阳高度角,订正层次和订正值范围不做限制即 Yoneyama et al(2008)湿度观测偏差订正方案;试验三(yone_zen60_400)太阳高度角计算同试验二,但湿度观测偏差订正限制在 400 hPa 以上且观测湿度值在 60%以上的大值;试验四(yone_zen_400)在试验二基础上只订正 400 hPa 以上的观测值。

4.2 试验结果分析

4.2.1 偏差垂直分布

四组试验连续 25 d 的 GRAPES 3DVAR 全球同化分析,由观测比湿场与 EC 再分析比湿场的平均偏差和均方根偏差的垂直分布(图 4)看:无论是平均偏差还是均方根偏差,试验二较其他试验偏差都小;试验一、三、四比湿偏差非常接近;垂直方向偏差在 850 hPa 以下是随着高度增加逐渐增加,以上则随着高度增加逐渐减小,偏差最大出现在 850 hPa 层次上,在 250 hPa 附近接近 0。从偏差数值上看,北半球偏差(图 4a,4c)要大于南半球(图 4b,4d)。由此看出试验二的改进效果显著且较其他方案更优。

4.2.2 偏差水平日变化

由于偏差最大在 850 hPa 层次附近(图 4),故

统计分析 850 hPa 层次四组试验 GRAPES 同化分析 25 d 连续试验比湿场与 EC 再分析比湿日平均偏差与均方根偏差日变化(图 5),进一步分析比较几种湿度偏差订正方案的订正效果。

由图 5 可见随着同化天数增加,偏差场逐渐增大。同样是试验二方案偏差明显小于其他方案,并且随着同化天数增加,偏差差异越大,订正效果更加显著。其他三种方案均方根偏差和平均偏差都非常接近;偏差场试验三小于试验四,但大于试验二,南半球比北半球表现更显著。南北半球偏差比较,北半球偏差大于南半球偏差,这与图 4 结果是一致的。

本节试验结果分析发现:无论是比湿偏差垂直分布还是偏差的日变化曲线都表现出试验二方案的订正效果相比其他方案最优,采用该方案使偏差减小显著,故选择试验二的订正方案在全球 GRAPES-GFS 同化预报版本中加以应用。

5 探空湿度偏差订正对同化预报系统的影响

5.1 对同化分析的影响

采用 2016 年 6 月一个月控制试验与试验二加探空湿度观测偏差订正方案比较,图 6 为 GRAPES-GFS 全球同化试验分析比湿场与 EC 再分析比湿平均偏差和均方根偏差的垂直分布,全球被分为北半球、南半球、热带、东亚四个区域,由图可见北半球和东亚的均方根偏差试验二都要略小于控制试验,其他区域订正前后变化差异不大,说明采用探空湿度观测偏差订正后对全球同化中湿度分析影响是中性略偏正。由于同化的观测资料种类较多,影响湿度分析的因素随之增加,探空湿度观测偏差订正值又很小,在多种观测资料同化中,其偏差订正效果相比仅同化探空观测一种资料不显著,这个结果也是合理的。

5.2 对模式预报的影响

比较 GRAPES-GFS 全球同化预报模式控制试验与采用 RS92 探空湿度观测偏差订正方案试验 24 h 与 72 h 模式预报降水评分和预报偏差(图 7),加探空湿度偏差订正的 24 h 评分略高于控制试验,预报偏差评分几乎是一致的(图 7a,7b)。72 h 模式预报评分略高于控制试验,偏差评分略小于控制试

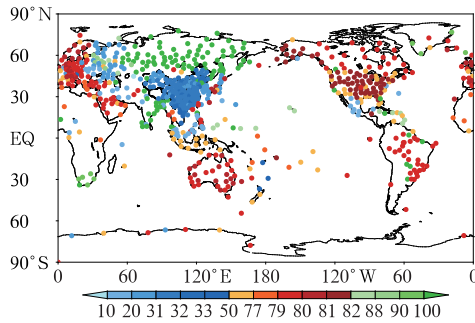


图 1 全球不同探测仪器分布
(不同颜色代表不同仪器编码)

Fig. 1 Distribution map for radiosonde instrument
(Different colors represent different instrument codes)

验(图 7c, 7d), 可见探空湿度观测偏差订正方案试验使模式预报偏差减小, 同时使模式预报评分得到一定的改进。

图 8 为 GRAPES-GFS 全球同化模式预报的高度、温度、风场变量 24~96 h 在东亚、北半球、南半球、热带等四个区域、三个层次的控制试验与试验二比较评分卡, 图中给出了两组试验与 EC 再分析场比较的距平相关和均方根偏差结果。从中看出北半球和热带区域有探空湿度观测偏差订正的方案要明显优于控制方案, 尤其是热带区域的风场和高度场表现最优, 东亚区域两组试验评分相当或略好, 南半球两组试验基本评分相当。由此看来探空湿度偏差订正试验加入对模式预报有积极的改进正效果。

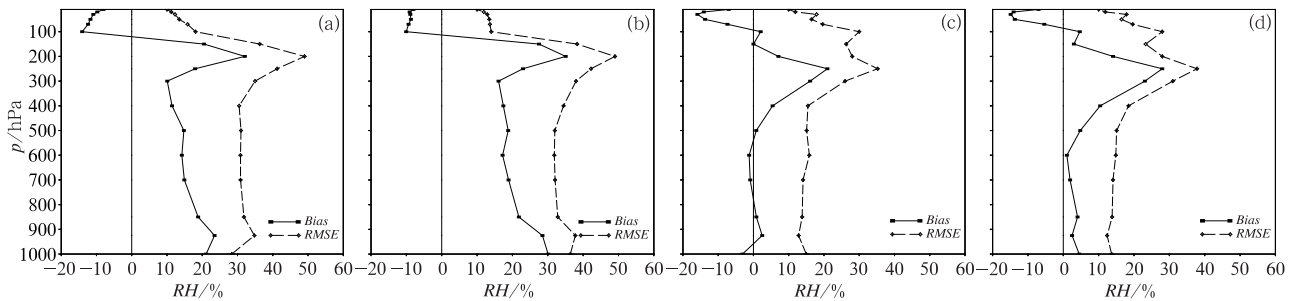


图 2 2013 年 7 月欧洲区 NCEP(a, b)、EC(c, d)再分析湿度资料

与探空湿度观测的 00 时(a, c), 12 时(b, d)平均偏差和均方根偏差

Fig. 2 Vertical deviation of the NCEP reanalysis (a, b), EC (c, d) reanalysis and the mean deviation and root mean square error of the radiosonde humidity observation of 0000 UTC (a, c) and 1200 UTC (b, d) in July 2013

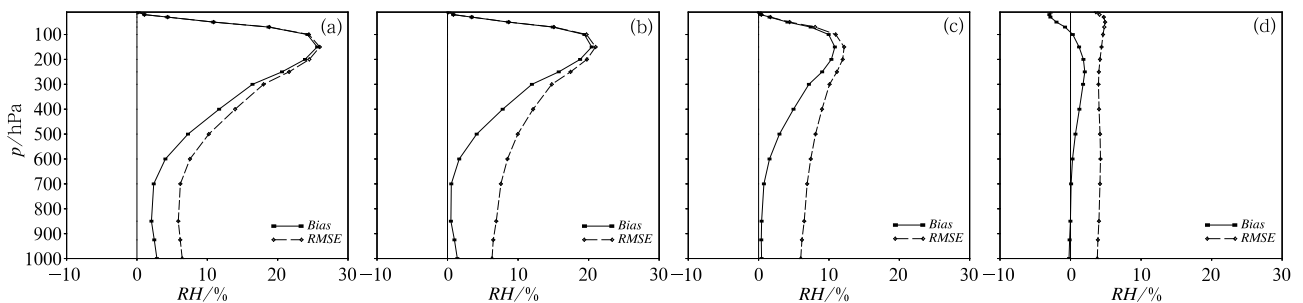


图 3 2013 年 7 月 12 h 欧洲区 EC 再分析资料与探空湿度的平均偏差和均方根偏差

(a) EC 湿度 $\geq 80\%$, (b) $60\% \leq$ EC 湿度 $< 80\%$, (c) $20\% \leq$ EC 湿度 $< 60\%$,

(d) $5\% \leq$ EC 湿度 $< 20\%$

Fig. 3 Mean bias and root mean square error of EC reanalysis humidity data from sounding humidity in Europe for July 2013

(a) vertical deviation with the EC analysis as the background field humidity ($\geq 80\%$) to the radiosonde observation, (b) as in Fig. 3a but for the humidity $\geq 60\%$ and $< 80\%$, (c) as in Fig. 3a but for the humidity $\geq 20\%$ and $< 60\%$, (d) as in Fig. 3a but for the humidity $\geq 5\%$ and $< 20\%$

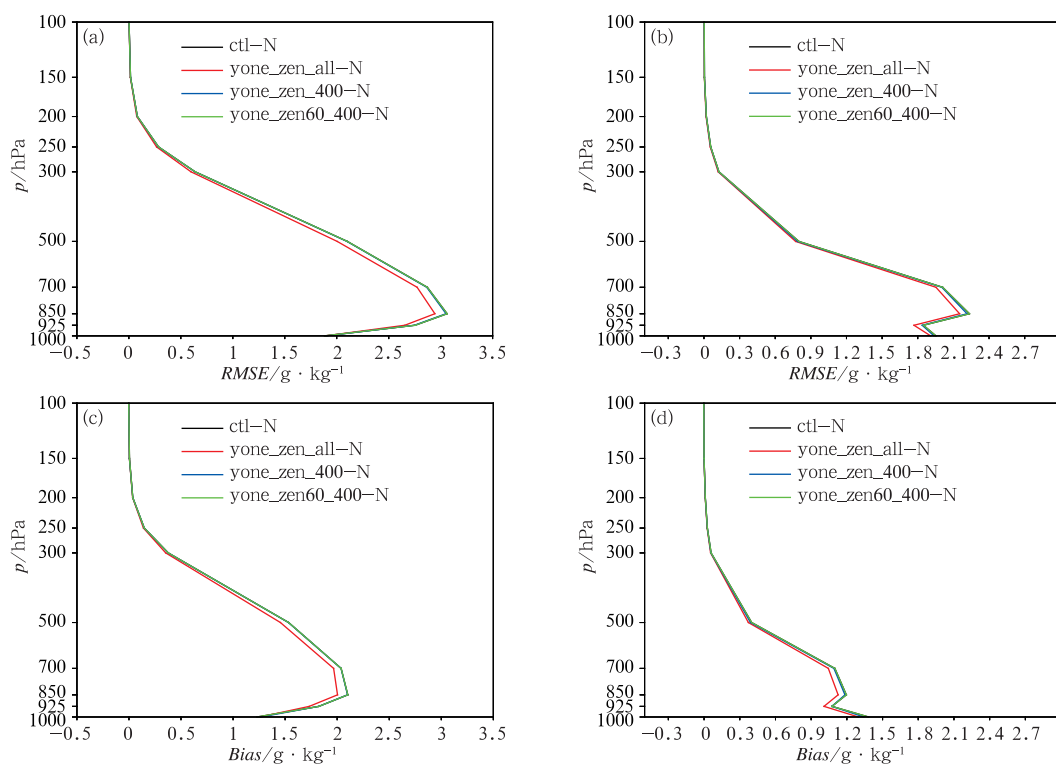


图 4 四组试验 GRAPES 全球分析比湿与 EC 再分析比湿的均方根偏差(a,b)和平均偏差(c,d)的垂直分布
(a,c)北半球, (b,d)南半球

Fig. 4 Vertical distribution of mean bias (c, d) and root mean square error (a, b) for GRAPES-GFS global analysis and EC reanalysis of specific humidity
(a, c) Northern Hemisphere, (b, d) Southern Hemisphere

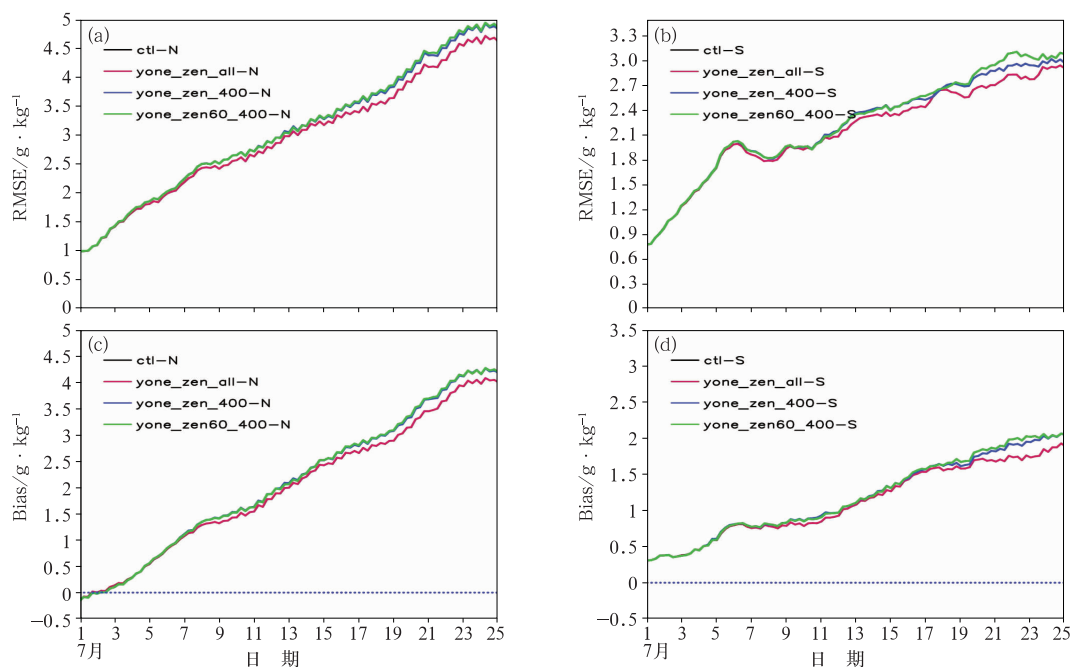


图 5 四组试验 GRAPES 全球分析比湿场与 EC 再分析比湿的均方根偏差(a,b)和平均偏差(c,d)25 d 850 hPa 层次的日变化
(a,c)北半球, (b,d)南半球

Fig. 5 Daily variation of mean bias (a, b) and root mean square error (c, d) over 25 d at 850 hPa for GRAPES analysis and EC reanalysis of specific humidity field
(a, c) Northern Hemisphere, (b, d) Southern Hemisphere

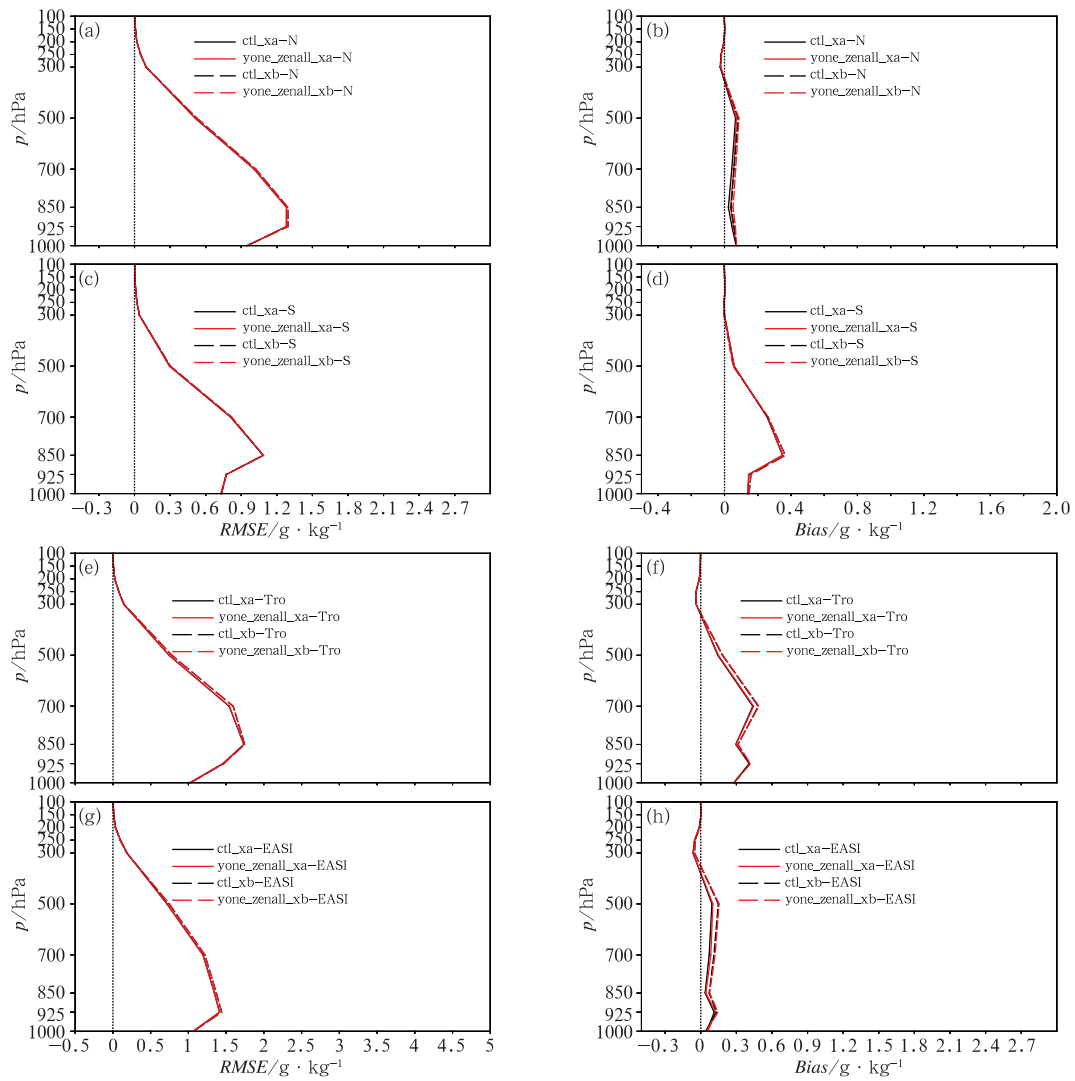


图 6 GRAPES-GFS 全球同化分析比湿和背景场比湿与 EC 再分析比湿
均方根偏差(a,c,e,g)和平均偏差(b,d,f,h)的垂直分布
(a,b)北半球, (c,d)南半球, (e,f)东亚, (g,h)热带

Fig. 6 Vertical distribution of mean bias (b, d, f, h) and root mean square error (a, c, e, g) for GRAPES-GFS global assimilation analysis and background field and EC reanalysis specific humidity
(a, b) Northern Hemisphere, (c, d) Southern Hemisphere,
(e, f) East Asia, (g, h) Tropical Region

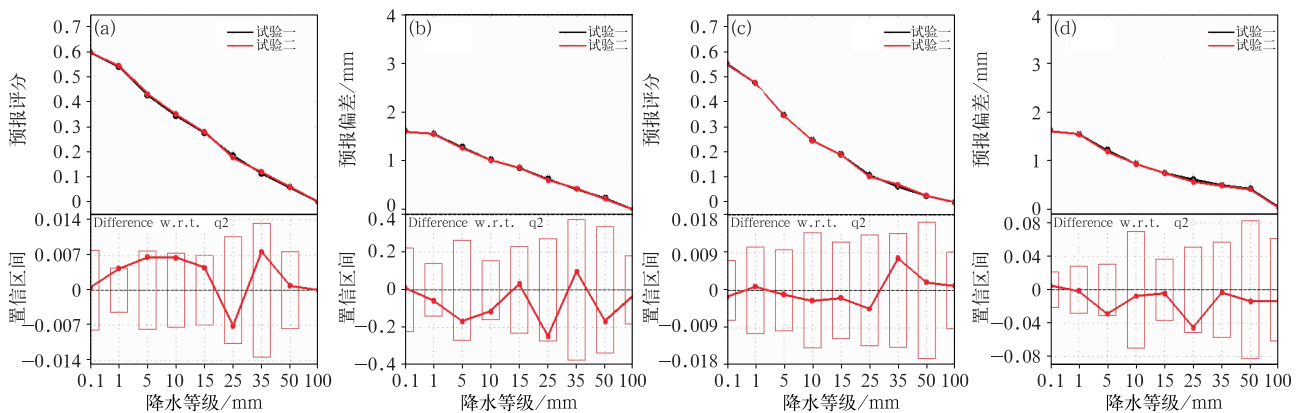


图 7 24 h(a,b)与 72 h(c,d)模式预报降水评分(a,c)和预报偏差(b,d)

Fig. 7 Rainfall score (a, c) and prediction deviation (b, d) of 24 h (a, b) and 72 h (c, d) model forecast

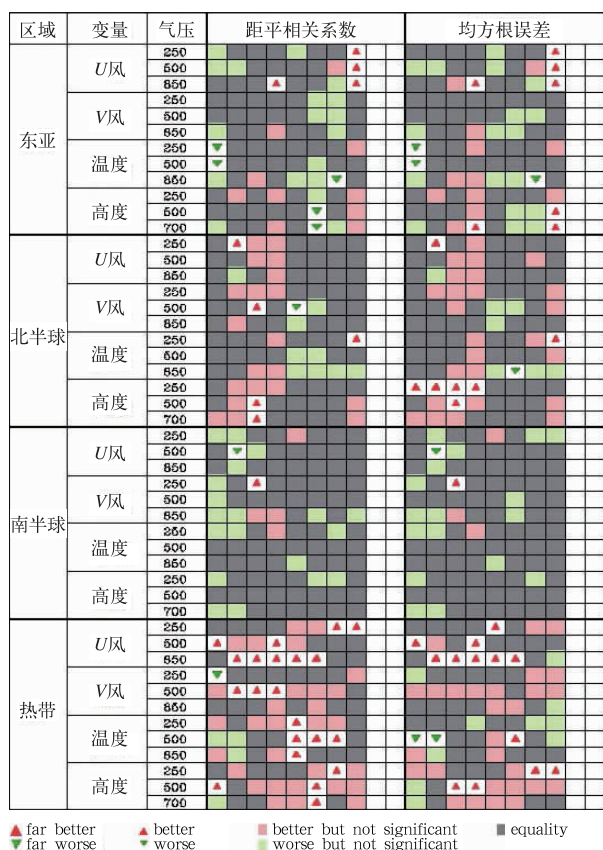


图 8 模式预报变量评分卡
(红色:改进,绿色:变差,灰色:相当)

Fig. 8 Model prediction variable score card
(red: better; green: worse; grey: equality)

6 结论与讨论

通过对 Vaisala RS92/90 探空仪器湿度与欧洲区 NCEP 和 EC 再分析湿度场偏差的比较发现,与前者偏差明显大于与后者偏差,说明 EC 再分析湿度资料与 NCEP 再分析湿度相比更接近探空观测数据。探空湿度观测与再分析湿度场偏差比较可见,12 时偏差明显要大于 00 时。偏差最大在 250 hPa 附近,达到 30%;由此看出低层偏差较小,高层偏差偏大。在 400 hPa 以下 EC 再分析湿度场与探空观测数据接近;偏差场为正,探空湿度观测小于 EC 再分析场湿度值,探空湿度观测有偏干现象。

考虑太阳辐射对探测仪器的影响,借鉴 Yoneyama et al (2008) 的偏差订正方法,在全球 GRAPES 3DVAR 同化系统对 RS92 探空仪器资料进行相应的偏差订正。通过几种订正方案的比

较,优选出对分析改进最为显著的偏差订正方案,并将该方案应用到全球 GRAPES-GFS 准业务试验中,试验结果表明:

(1) RS92/90 探测仪器湿度偏差几种订正方案比较,在仅同化探空资料时,试验二的偏差订正方案较其他方案偏差小,对同化分析有显著的改进效果。

(2) 在 GRAPES-GFS 全球同化试验中,同化更多观测资料时,采用探空湿度订正方案同化分析结果基本是中性结果,差异不显著。

(3) 从一个月连续试验模式预报结果看:同化分析的水平与垂直偏差改进前后差异不大;模式预报距平相关东亚与热带略有差异,热带略好。而预报评分热带、北半球略好,其他区域结果相当。

本文通过对 Vaisala RS92/90 探空仪器湿度偏差订正方案在全球 GRAPES-GFS 同化分析预报系统中应用的分析看出该方案取得了正的分析与预报效果,有一定的应用前景。但由于目前受诊断评估比较资料种类、时间、范围等因素的限制,试验结果分析仅是初步的认识,还有待进一步全面分析诊断和研究。

参考文献

- 陈明轩,肖现,高峰,2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J]. 大气科学,41(5):897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F, 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5):897-917(in Chinese).
- 陈志雄,郝秀书,田野,等,2017. 云分辨尺度下一种综合调整水物质含量的闪电资料同化方法[J]. 气象学报,75(3):442-459. Chen Z X, Qie X S, Tian Y, et al, 2017. Assimilation of lightning data through comprehensively nudging water contents at the cloud-resolving scale[J]. Acta Meteor Sin, 75(3):442-459(in Chinese).
- 郝民,龚建东,田伟红,等,2018. L 波段探空仪湿度资料偏差订正及同化试验[J]. 应用气象学报,29(5):559-570. Hao M, Gong J D, Tian W H, et al, 2018. Deviation correction and assimilation experiment on L-band radiosonde humidity data[J]. J Appl Meteor Sci, 29(5):559-570(in Chinese).
- 郝民,龚建东,徐枝芳,2016. 地面报中高山站资料的应用分析[J]. 气象,42(4):424-435. Hao M, Gong J D, Xu Z F, 2016. Application and analysis on the mountain observatory of surface observational data[J]. Meteor Mon, 42(4):424-435(in Chinese).
- 郝民,龚建东,王瑞文,等,2015. 中国 L 波段探空湿度观测资料的质量评估及偏差订正[J]. 气象学报,73(1):187-199. Hao M, Gong J D, Wang R W, et al, 2015. The quality assessment and correction of the radiosonde humidity data biases of L-band in China

- [J]. *Acta Meteor Sin*, 73(1): 187-199 (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).
- 刘佩廷, 徐枝芳, 朱克云, 等, 2017. 地面气压同化递进式 OMB 质量控制方法研究[J]. *气象*, 43(9): 1138-1151. Liu P T, Xu Z F, Zhu K Y, et al, 2017. Study of surface progressive OMB pressure quality control for data assimilation[J]. *Meteor Mon*, 43(9): 1138-1151 (in Chinese).
- 唐南军, 刘艳, 李刚, 等, 2014. 中低空探空相对湿度观测数据的新问题——基于中国 L 波段探空系统湿度观测异常偏干现象的初步分析[J]. *热带气象学报*, 30(4): 643-653. Tang N J, Liu Y, Li G, et al, 2014. New issue of relative humidity observations in the middle and low troposphere: preliminary analysis on abnormally dry phenomena of the Chinese L-band radiosonde system[J]. *J Trop Meteor*, 30(4): 643-653 (in Chinese).
- 万晓敏, 龚建东, 韩威, 等, 2019. FY-4A 云导风在 GRAPES-RAFS 中的同化应用评估[J]. *气象*, 45(4): 458-468. Wan X M, Gong J D, Han W, et al, 2019. The evaluation of FY-4A AMVs in GRAPES-RAFS[J]. *Meteor Mon*, 45(4): 458-468 (in Chinese).
- 万晓敏, 田伟红, 韩威, 等, 2017. FY-2E 云导风的算法改进及其在 GRAPES 中的同化应用研究[J]. *气象*, 43(1): 1-10. Wan X M, Tian W H, Han W, et al, 2017. The evaluation of FY-2E reprocessed IR AMVs in GRAPES[J]. *Meteor Mon*, 43(1): 1-10 (in Chinese).
- 王瑞文, 万晓敏, 田伟红, 等, 2016. AMDAR 温度观测的误差统计特征分析[J]. *气象*, 42(3): 330-338. Wang R W, Wan X M, Tian W H, et al, 2016. Statistical characteristics analysis for AMDAR temperature observation error[J]. *Meteor Mon*, 42(3): 330-338 (in Chinese).
- 夏静雯, 傅云飞, 2016. 东亚与南亚雨季对流和层云降水云内的温湿结构特征分析[J]. *大气科学*, 40(3): 563-580. Xia J W, Fu Y F, 2016. The vertical characteristics of temperature and humidity inside convective and stratiform precipitating clouds in the east Asian summer monsoon region and Indian summer monsoon region[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(3): 563-580 (in Chinese).
- 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 S, Chen M, Wang J J, 2015. Variational assimilation experiment of L-band minute-level sounding data with WRF model[J]. *Meteor Mon*, 41(6): 695-706 (in Chinese).
- 于翥, 黄丽萍, 邓莲堂, 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J]. *大气科学*, 42(5): 1146-1156. Yu F, Huang L P, Deng L T, 2018. Impacts of different GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(5): 1146-1156 (in Chinese).
- 张思齐, 郭艳君, 王国复, 2018. 中国探空观测与第 3 代再分析大气湿度资料的对比研究[J]. *气象学报*, 76(2): 289-303. Zhang S Q, Guo Y J, Wang G F, 2018. A comparative study of atmospheric humidity over China between radiosonde and the third generation reanalysis datasets[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(2): 289-303 (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).
- 朱彦良, 凌超, 陈洪滨, 等, 2012. 两种再分析资料与 RS92 探空资料的比较分析[J]. *气候与环境研究*, 17(3): 381-391. Zhu Y L, Ling C, Chen H B, et al, 2012. Comparison of two reanalysis data with the RS92 radiosonde data[J]. *Clim Environ Res*, 17(3): 381-391 (in Chinese).
- Agustí-Panareda A, Vasiljevic D, Beljaars A, et al, 2009. Radiosonde humidity bias correction over the west African region for the special AMMA reanalysis at ECMWF[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135(640): 595-617.
- Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al, 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80, and CFH[J]. *Adv Atmos Sci*, 28(1): 139-146.
- Faccani C, Rabier F, Fourrié N, et al, 2009. The Impacts of AMMA radiosonde data on the French global assimilation and forecast system[J]. *Wea Forecasting*, 24(5): 1268-1286.
- Vömel H, Selkirk H, Miloshevich L, et al, 2007. Radiation dry bias of the vaisala RS92 humidity sensor[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 24(6): 953-963.
- Yoneyama K, Fujita M, Sato N, et al, 2008. Correction for radiation dry bias found in RS92 radiosonde data during the MISMO field experiment[J]. *SOLA*, 4: 13-16.