

中国 L 波段探空湿度观测资料 的质量评估及偏差订正^{*1}

郝 民 龚建东 王瑞文 万晓敏 刘 艳

HAO Min GONG Jiandong WANG Ruiwen WAN Xiaomin LIU Yan

国家气象中心,中国气象局数值预报中心,北京,100081

*Numerical Weather Prediction Center, National Meteorological Center, China Meteorological Administration,
Beijing 100081, China*

2014-03-03 收稿,2014-08-04 改回.

郝民,龚建东,王瑞文,万晓敏,刘艳. 2015. 中国 L 波段探空湿度观测的质量评估及偏差订正. 气象学报, 73(1): 187-199
Hao Min, Gong Jiandong, Wang Ruiwen, Wan Xiaomin, Liu Yan. 2015. The quality assessment and correction of the radiosonde humidity data biases of L-band in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(1): 187-199

Abstract The radiosonde observation data of L-band has been one kind of the most basic and important data used in either the weather forecast or the numerical prediction, and its quality for humidity observations has a direct impact on the precipitation forecast. In this study, by calibrating the humidity data from the radiosonde observations with those derived from other type observations and comparing to the background fields based on the NCEP, GRAPES and EC modeling analyses, the qualities for the humidity data from radiosonde observation of L-band in China were assessed. So we could have a new understanding about the quality of the radiosonde observation, which would provide basis information for better use of the data. It was found that these sounding humidity tended to be drier than the analyses, thus the piecewise functions were applied for the humidity data correction. When the humidity was more than 60% in the background field, the deviation of the radiosonde observations for humidity would be significant, and the correction effect would become very prominent. The results of case studies and continuous experiments showed that the forecasting capabilities of precipitation intensity could be significantly improved after applying the bias correction for sounding humidity observations. Meanwhile, in term of precipitation forecast test score (TS) and forecasting bias (B), the humidity correction could obviously have positive effects on both the moderate and torrential rain forecasts.

Key words Radiosonde observation, Humidity drier than normal, Bias correction, Assimilation prediction

摘 要 L 波段探空观测资料无论在天气预报还是数值预报中均为最基本和最重要的一类数据,而其湿度观测资料的质量对同化分析及降水预报有直接影响。通过用 L 波段探空湿度观测资料与不同类型的其他观测反演的湿度资料互校及与 NCEP、GRAPES、EC 等不同模式分析场为背景的湿度场比较,评估中国 L 波段探空湿度观测资料的质量状况,对探空湿度资料的质量有了新的认识,为更好地使用该资料提供依据。研究发现中国 L 波段探空湿度观测资料存在偏干的现象,特别是当背景场湿度大于 60% 时,观测湿度偏低更加明显。通过分析其偏差特征,找出了适合中国 L 波段探空湿度观测资料偏差特点的分段函数订正方法。个例试验表明,对探空湿度观测资料的偏差订正后,观测偏差明显减小,订正效果非常显著;模式降水强度预报能力有一定的提高。从连续试验检验的降水预报评分(TS)和预报偏差(Bias)看,中雨和暴雨的预报在探空湿度观测偏差订正后都表现出正效果。

关键词 探空观测,湿度偏干,偏差订正,同化预报

中图法分类号 P413.2

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106008)、国家自然科学基金项目(41275105、41375107)。

作者简介:郝民,主要从事资料同化方面的研究。E-mail: haomin@cma.gov.cn

1 引言

无线电探空仪观测能获取高空温、压、湿资料,是了解天气预报、数值预报及气候变化极其重要的数据源之一。探空观测资料的准确性直接影响天气形势和天气系统的分析与预报。为了提高高空大气探测数据准确度,新一代 L 波段探空系统从 2000 年开始推广使用,目前已基本覆盖全中国。L 波段探空仪使用的湿度感应元件是参照美国同类设备研制的碳湿敏电阻,与之前探空仪使用的肠膜感应元件相比,灵敏度高,滞后小,在高空低温期间响应快,测量准确度高。此外,该元件校准线一致性好,无需逐一校准,节省了生产成本(姚雯等,2008)。新一代 L 波段探空仪系统数据精度相比过去 59 型探空仪温度观测误差减少了 3/4,而风和位势高度等大气要素的测量精度也都有明显的改进(陶士伟等,2006;王珣等,2011)。相比探空温度和风观测的精度分析研究,探空湿度观测的精度及其特点的研究相对较少(梁宏等,2012;郝民等,2014)。而湿度观测在天气分析和资料同化预报中起着重要作用,特别在强对流天气预报中是必不可少的参考资料之一。但目前可以用到的反映大气垂直层次上湿度变化的观测资料却很有限,如探空湿度廓线观测、全球定位系统(GPS)遥感大气可降水量、卫星及雷达反演水汽资料等。相比之下探空湿度资料是最为便捷可直接使用的湿度观测资料,而其资料测量精度将直接影响数值模式分析的精度和模式降水预报的效果。

早在 20 世纪 90 年代英国气象局就发现维萨拉 RS80 探空仪在探测近饱和大气时出现干观测偏差(Lorenc, et al, 1996; Wang, et al, 2002; Mathieu, et al, 2008),故对于探空湿度观测大于 80% 的资料进行一定加湿订正,这样在数值模式预报积分过程中预报降水率有提高,以解决由于湿度观测偏干造成的模式预报降水量偏小的问题。Wang 等(2008)在比较了 GPS 遥感大气可降水量与维萨拉 RS80、RS90 及 RS92 探测仪反演的可降水量后,发现维萨拉的探空仪都存在探测湿度偏干的现象,其中,维萨拉 RS80 探测湿度偏干的偏差最大。2009 年欧洲中心的试验研究发现,不同探空仪测量的湿度都出现湿度偏干 5%—30% 现象(Agustí-Panareda, et al, 2009),根据 GPS TCWV(total columnar water

vapour)资料对探空仪测量湿度资料加以订正后同化试验中降水预报得到显著改进。Miloshevich 等(2009)在分析探空仪的水汽测量时也发现有偏干问题。Ciesielski 等(2009)在 NAME(North American Monsoon Experiment)试验中发现高层探空观测在主要的季风区表现水汽值偏小(Faccami, et al, 2009),通过对湿度观测偏差订正后,湿度场的描述更加准确合理,同时一些反映对流的参数如可降水量、对流有效位能(CAPE)等预报都得到改进。2011 年美国大气研究中心研究表明(Wang, et al, 2013; Dai, et al, 2011),由于受白天太阳辐射的影响,维萨拉 RS92 的湿度探测有负的偏差(Vömel, et al, 2007; Kottayil, et al, 2012; Rowe, et al, 2008),而偏差订正根据不同气压、季节和时间订正值不同,订正值范围为 2%—8%。近年来,中国有研究发现在做资料同化的过程中,中国区域的探空相对湿度观测在水平空间上会出现大片的低值区,唐南军等(2014)研究发现,中国区域 L 波段无线电探空仪系统在对流层中下层会经常性出现成片相对湿度异常偏低的现象,其部分原因与探测仪湿度片的测湿性能差有关,也与探空仪穿云的特点有关。颜晓露等(2012a)比较了两种探空仪观测的湿度垂直分布,同样发现探空测量的相对湿度在高空偏低,特别是对于 6000 m 以上高云甄别能力很低。Bian 等(2011)比较了 GTS1(L 波段探空系统)、维萨拉 RS80 与 CFH(Cryogenic Frost-point Hygrometer)温湿传感器湿度偏差情况,二者都存在一定的负偏差,而 GTS1 与 CFH 的偏差要大于维萨拉 RS80 与 CFH 的偏差。世界气象组织(WMO)(2005)的观测方法指南中也指出,云中的无线电探空仪在高湿条件下相对湿度会产生负的系统误差,若这种误差不能补偿,会对数值天气预报分析产生负影响(Durre, et al, 2006; Flores, et al, 2013)。近年来,对于探空仪湿度观测偏干现象受到一定的关注,但对其偏差订正方法的研究很有限。针对这些问题,本研究试图采用探空湿度观测资料与其他不同类型的湿度观测资料互校的方法,及与不同模式的分析场为背景的湿度场进行比较,评估中国区域 L 波段探空湿度观测资料的质量状况,并借鉴英国气象局相关的探空湿度观测偏差订正方法,结合中国探空湿度观测的误差特点,寻求一种有效的、实用的针对探空湿度观测资料存在的偏差进行订正的方法(Sperka, et

al, 2011; Guichard, et al, 2000; Ciesielski, et al, 2010),以提高该资料的使用精度,改善探空湿度资料在数值预报中的应用效果,提高模式降水预报的准确度。

2 资料评估方法

无线电探空仪观测作为天气分析和数值预报最常用的资料数据,在实际应用中多被认为其误差较小,精度较高而作为最接近实际大气、反映大气运动变化的一类观测资料标准来检验、校验和订正天气预报和数值预报的结果。但任何一种观测资料都存在观测误差,不仅与观测仪器性能有关,也与观测手段及观测系统本身有关。故合理地评估探空资料的质量,并对其有正确的认识,同时对存在的偏差加以订正,使之在天气分析及数值预报中发挥最大的作用是资料使用中必不可少的工作。本研究采用与探空资料不同类型的其他资料如 GPS 遥感大气可降水量(PW)资料、掩星反演湿度廓线(Cosmic 的 2 级产品)WetPrf 资料的比较,以及在资料同化中不同模式背景场与相同探空湿度资料进行比较,试图达到对探空湿度观测质量有较全面的评估和认识。

2.1 与 GPS 遥感大气可降水量资料的互校比较

GPS 气象学是 20 世纪 80 年代发展起来的利用 GPS 主动遥感地球大气的科学技术,通过测量穿过大气层的 GPS 信号的延迟来获得大气折射率,进而从中得到温、压、湿等信息(万蓉等,2013; Benjamin, et al, 2010)。利用地基 GPS 接收机进行气象探测,可以获得站点上空准确、连续的大气可降水量,精度可达 2 mm,时间分辨率小于 1 h。而无线

电探空资料观测到的测站上空的湿度廓线资料,通过计算可以得到大气可降水量(曹云昌等,2005)。

大气可降水量是指从地面直到大气顶的单位截面积大气柱中所含水汽总量全部凝结降落到地面可以产生的降水量,并通常用在同面积容器中相当水量深度表示。

$$w_1 = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q(p) dp \quad (1)$$

式中, $q(p)$ 为比湿,随气压 p 而变; g 为重力加速度; p_0 为地面气压, w_1 为单位气柱中的水汽总量,尚未换算成水深。

$$w_2 = \sum_i \left(\frac{\bar{q} \Delta p}{g \rho_w} \right)_i \quad (2)$$

式中, w_2 代表已换算成水深的可降水量(单位: cm), 是将积分式(1)改变为相应的差分求和形式,再除以水的密度 ρ_w 而求得。

从 2013 年 7 月 00 时(世界时,下同)、12 时全中国的 GPS 遥感大气可降水量与相应站对应时间的探空观测计算的大气可降水量比较(图 1a)可以看出, GPS 遥感计算的大气可降水量多数都略大于探空观测计算的大气可降水量,而探空资料的可降水量是通过探空湿度计算而来,说明探空湿度观测值偏小。而从与图 1a 相匹配的全中国的 GPS 遥感与探空资料计算的大气可降水量点聚图(图 1b)可见,发散的点在对角线右侧略多于对角线左侧,且发散点偏向 GPS 大气可降水量一边值要略大于探空观测计算的大气可降水量值,这说明 GPS 遥感大气可降水量要大于探空资料计算的大气可降水量,即探空湿度观测偏低。

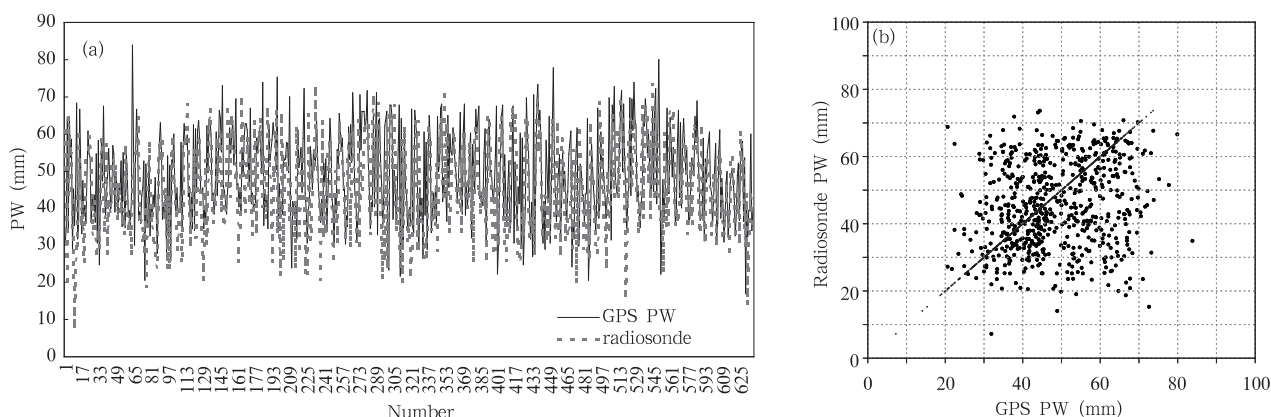


图 1 2013 年 7 月中国 GPS 遥感与探空资料计算的大气降水量的比较(a)及其散点分布(b)

Fig. 1 (a) Comparing GPS PW and the calculated PW from the radiosonde data in China, and (b) Scatter diagram of GPS PW and the calculated PW in China for July 2013

2.2 与掩星 COSMIC 反演湿度廓线资料的互校比较

2006 年 4 月 15 日, 美国与中国台湾地区合作发射了气象、电离层和气候观测星座 (Constellation Observation System of Meteorology, Ionosphere and Climate, COSMIC), 进行 GPS 掩星星座业务探测试验。COSMIC 星座由 6 颗 LEO (Low earth orbit satellite) 卫星组成, 当 GPS 卫星信号穿过地球大气层时, 电波射线因折射发生弯曲, LEO 卫星接收该信号, 根据几何光学原理得到 GPS 信号在各大气路径上的弯曲角, 处理得到大气各层折射率, 进而反演出全球大气温、压、湿和电离层廓线资料, 根据 COSMIC 数据分析和归档中心提供的 COSMIC 资料 2 级产品 WetPrf 湿度廓线资料通过时空匹配和插值得到相应时间与探空观测的数据比较 (王洪等, 2010), 唐南军等 (2014) 分析了探空湿度观测并与 COSMIC 的 WetPrf 湿度廓线资料和 EcPrf 湿度廓线资料的比较发现, 相对湿度异常偏干现象主要出现在对流层中低层, 经常出现在 650—500 hPa, 起始高度可以低到 900 hPa 以下 (图略)。

2.3 与不同背景场的比较

探空湿度观测与不同类型的其他湿度观测资料相比, 发现探空湿度观测相比其他类型反演的湿度场存在偏低现象。为了进一步评估探空湿度观测的质量及其湿度观测偏差的特点, 在资料同化试验中选取 2011 年 7 月 NCEP、EC (European Centre) 及 GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction System) 不同模式的分析场做背景场, 仅

使用探空观测资料进行资料同化试验, 即采用不同背景场和同化相同观测资料的 3 组试验。分析同化试验后得到的背景场与观测场的平均偏差 (Bias) 和均方根误差 (RMSE) 及不同模式分析背景场偏差表现的差异 (张诚忠等, 2012; 陈敏等, 2011)。为了能清楚看出探空湿度观测在不同区域的表现, 分中国、欧洲、北美 3 个区域分别计算背景场与观测场的偏差。

从以 NCEP 分析场为背景场统计 2011 年 7 月与探空湿度观测的垂直平均偏差场 (图 2) 可以看出, 偏差多为正值, 即背景场湿度高于观测湿度。图 2a 为在中国的统计偏差, 在 850—100 hPa 偏差为正值, 背景场湿度大, 观测湿度小; 偏差最大出现在 250—200 hPa, 偏差值为 25%—30%; 在 950—500 hPa, 偏差小于 5%。图 2b 为欧洲统计偏差, 在 600—150 hPa 偏差值为正; 偏差最大值也出现在 250—200 hPa, 最大值为 20%。图 2c 为北美统计偏差, 在 600—100 hPa 偏差为正; 偏差最大值出现在 250—200 hPa, 为 25%—30%。可见探空湿度观测与 NCEP 资料为背景场相比, 200 hPa 以下多为正偏差, 即探空湿度观测偏小, 500 hPa 之下偏差减小, 湿度偏差最大值出现在 250—200 hPa。

图 3 为以 GRAPES 分析场为背景场统计 2011 年 7 月与探空湿度观测的垂直平均偏差场。在中国 150 hPa 以下湿度偏差大于 0, 之上小于 0, 500 hPa 以下湿度偏差小于 5%, 偏差最大值在 250 hPa, 达 25% (图 3a)。欧洲 200 hPa 以下湿度偏差大于 0,

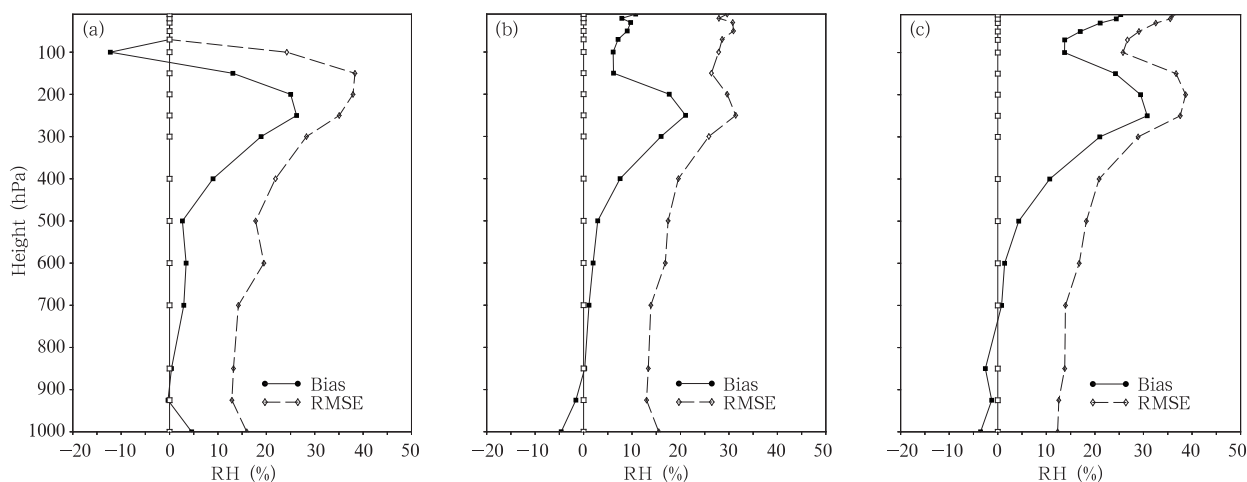


图 2 2011 年 7 月以 NCEP 的分析场为背景场与探空湿度观测的垂直偏差场 (a. 中国, b. 欧洲, c. 北美)

Fig. 2 Vertical deviation of the analysis of NCEP minus the radiosonde humidity observation for July 2011

(a. China, b. Europe, c. North American)

之上小于 0, 200—700 hPa 偏差最大值出现在 250 hPa, 达 13%, 200 hPa 以上湿度负偏差最大为 -6%, 700—950 hPa 偏差接近为 0 (图 3b)。北美 600 hPa 以下为负偏差, 小于 -5%, 60—150 hPa 为正偏差, 最大偏差值在 250 hPa, 小于 15%, 150 hPa 以上为负偏差, 最大偏差为 -13% (图 3c)。探空湿度观测与 GRAPES 为背景场比较仍表现为观测湿度偏干。

图 4 为以 EC 分析场为背景场统计 2011 年 7 月与探空湿度观测的垂直平均偏差场。在中国 200 hPa 以下湿度偏差大于 0, 但最大不超过 5%; 200 hPa 以上偏差小于 0, 最大为 -15%; 400 hPa 以

下, 偏差最大为 3% (图 4a)。欧洲 200—400 hPa 湿度偏差在 0—5%, 200 hPa 以上小于 0, 400 hPa 以下偏差接近 0 (图 4b)。北美跟欧洲结果接近, 400 hPa 以上偏差值更大些, 250 hPa 偏差最大达 10% (图 4c)。欧洲和北美的偏差在 400 hPa 以下都接近于 0, 而中国偏差小于 5%。

比较图 2—4 会发现在同化使用相同探空湿度观测条件下 (图 2a, 3a, 4a), NCEP、GRAPES、EC 等不同模式分析场为背景场的偏差, 无论是在中国、欧洲还是北美都是以 EC 模式分析场为背景的偏差最小, 即相比其他模式 EC 模式分析场最接近观测场。故其分析场参考意义也最好。在同一模式背景场条

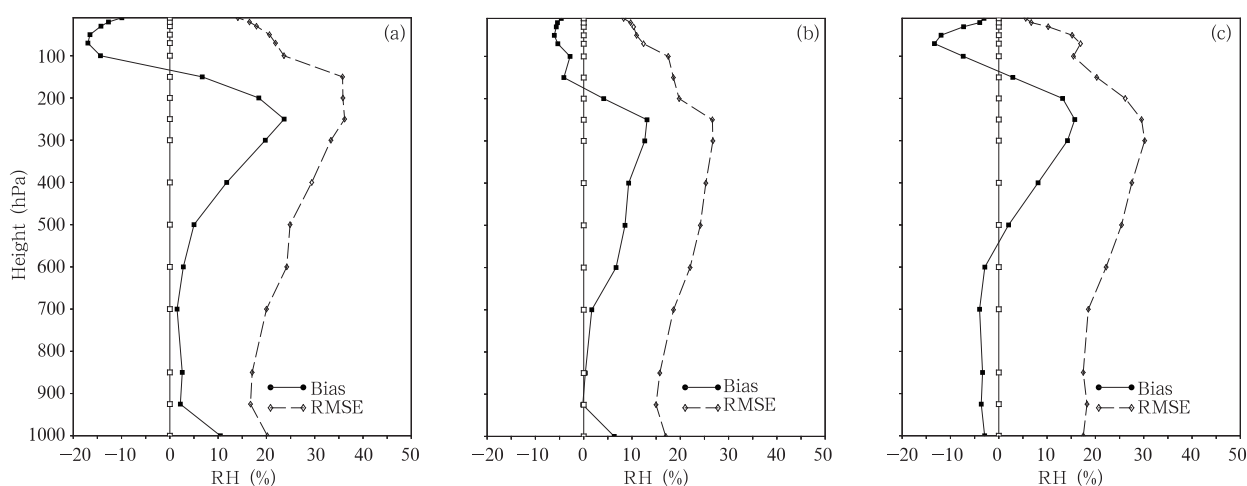


图 3 2011 年 7 月以 GRAPES 的分析场为背景场与探空湿度观测的垂直偏差场(a. 中国, b. 欧洲, c. 北美)

Fig. 3 As in Fig. 2 but for GRAPES minus the observation

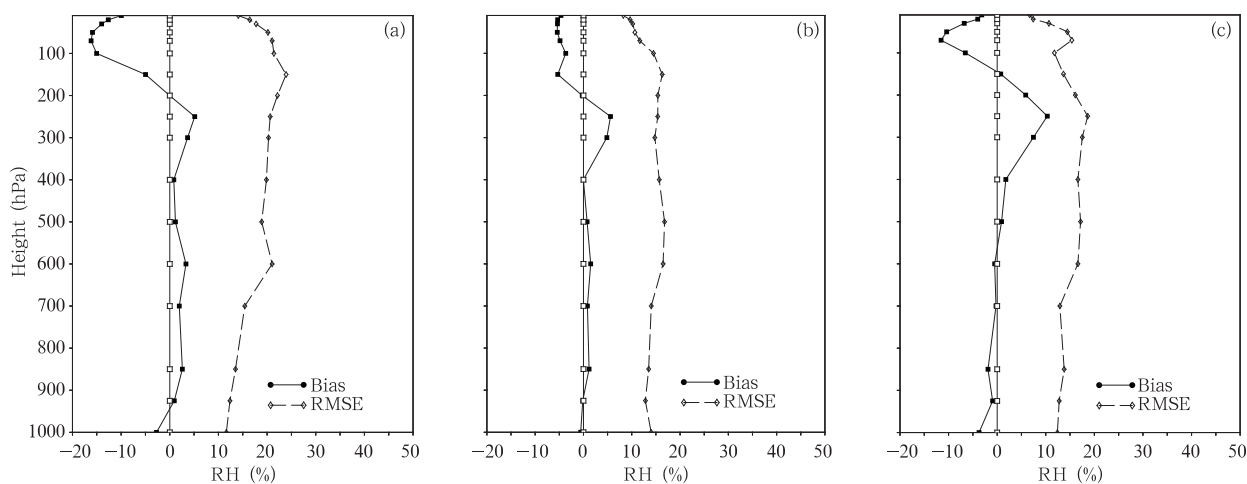


图 4 2011 年 7 月以 EC 的分析场为背景场与探空湿度观测的垂直偏差场(a. 中国, b. 欧洲, c. 北美)

Fig. 4 As in Fig. 2 but for EC minus the observation

件下(图 4a—c),以 EC 分析场为背景场时,欧洲与北美在 400 hPa 以下偏差都接近于 0,说明探空观测湿度与背景场值基本是一致的,而中国区域相比其他背景场偏差虽然减小,但正偏差仍然存在,这再次证实探空湿度观测有偏干现象存在。

3 探空湿度观测偏差的分析

为了能更清楚地深入了解探空湿度场相对于背景场偏差的分布,取背景场误差相对较小的 EC 分析场为背景场,比较探空湿度偏差在不同分段情况下的垂直和水平分布。

图 5 为以 EC 的分析场为背景场湿度高于 80% 与探空湿度观测的垂直偏差场及样本个数。在 550—950 hPa 湿度偏差均为 5% 左右,而 550 hPa 以上湿度偏差小些,约为 3% (图 5a)。从图 5b 的样本数上看,均为 500 以上,在 1000 hPa 最大样本数超过 1400,多数层次样本数在 1200 以上;400 hPa 的样本数达 500,而 400 hPa 以上样本数很小,没有偏差的统计意义。

图 6 为以 EC 分析场为背景场湿度在 (60%, 80%) 与探空湿度观测的垂直偏差场及样本个数。850—400 hPa 湿度偏差都稳定在 3.5% 左右,400 hPa 以上偏差逐渐增大,最大在 200 hPa,达 18%,850 hPa 之下偏差逐渐减小(图 6a)。500—

300 hPa 样本数均在 2200 以上,200 hPa 以上样本数减小,500 hPa 以下样本数多为 1000—2000,具有统计意义(图 6b)。

图 7 为以 EC 分析场为背景场湿度在 (20%, 60%) 与探空湿度观测的垂直偏差场及样本个数。400—800 hPa 湿度偏差由 5% 逐渐减小,850 hPa 以下湿度偏差为负偏差,负偏差也小于 -5%,说明背景场湿度在 (20%, 60%) 时观测与背景场值比较一致,偏差较小,而在低层表现观测湿度偏高,所以出现负偏差。高层 400 hPa 以上偏差较大,最大偏差值出现在 150 hPa,达到 15% (图 7a)。样本数在 700 hPa 以下为 1000 左右,样本数在 700—200 hPa 多为 2800—7200,200 hPa 以上样本数减少,虽然 200 hPa 以上偏差较大,由于样本数少,所以统计意义不大。

图 8 以 EC 分析场为背景场湿度在 (5%, 20%) 与探空湿度观测的垂直偏差场及样本个数。在 700—250 hPa 湿度偏差小于 3%,700 hPa 以下偏差为负偏差,最大偏差达 -8%,探空湿度观测相比背景场偏大。而高层湿度偏差较小,观测与背景场较一致(图 8a)。500—200 hPa 样本数为 1000—2500,500 hPa 以下除 900 hPa 样本数为 700 外,其他层次为 300 左右,200 hPa 以上由于样本数很少,统计意义也不大(图 8b)。

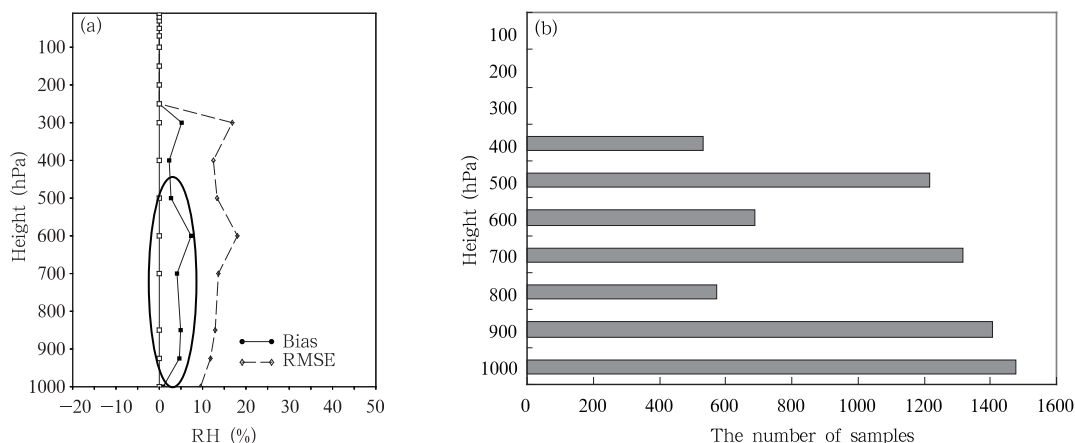


图 5 2011 年 7 月以 EC 分析为背景场湿度大于 80% 与探空湿度观测的垂直偏差场(a) 及其在各垂直层次上的样本数(b)

Fig. 5 (a) Vertical deviation in July 2011 with the EC analysis as the background field humidity (greater than 80%) to the radiosonde observation, and (b) the number of samples on each vertical level

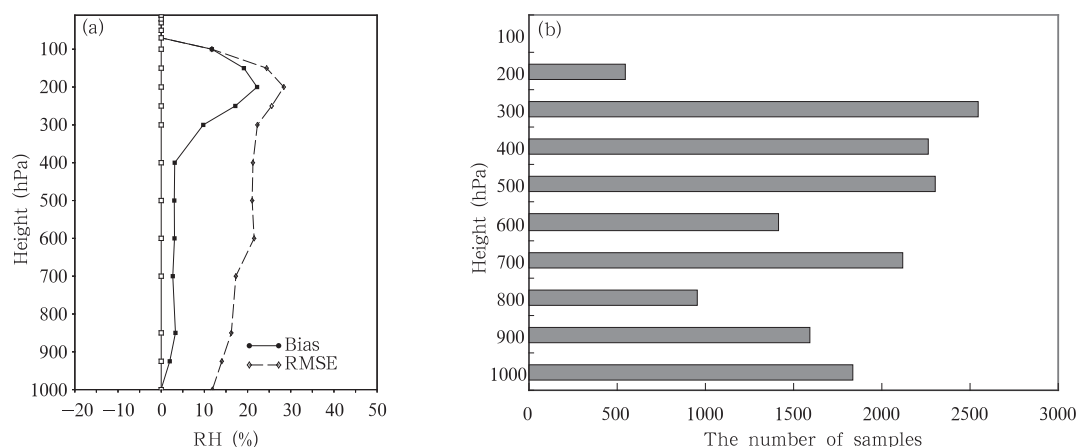


图 6 2011 年 7 月以 EC 分析为背景场湿度在(60%,80%]与探空湿度观测的垂直偏差场(a)及其在各垂直层次上的样本数(b)

Fig. 6 As in Fig. 5 but for the humidity between 60% and 80% (80% included)

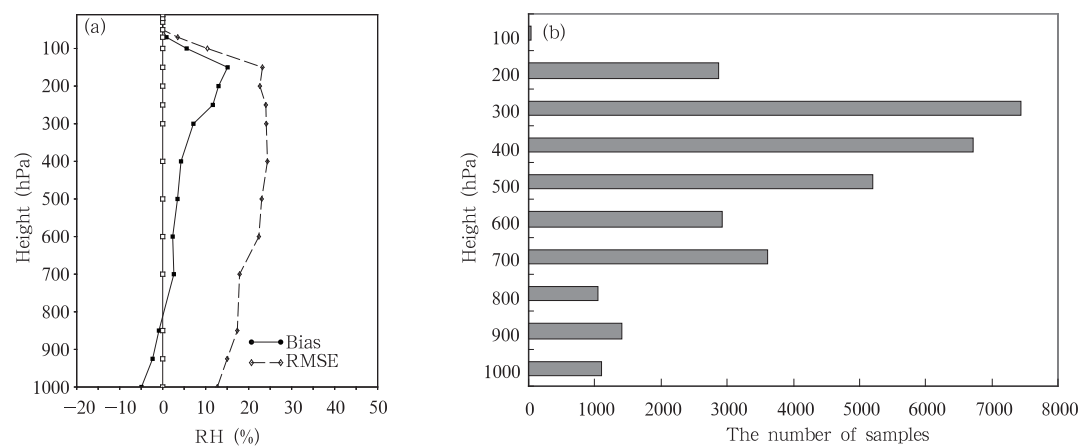


图 7 2011 年 7 月以 EC 分析为背景场湿度在(20%,60%]与探空湿度观测的垂直偏差场(a)及其在各垂直层次上的样本数(b)

Fig. 7 As in Fig. 5 but for the humidity between 20% and 60% (60% included)

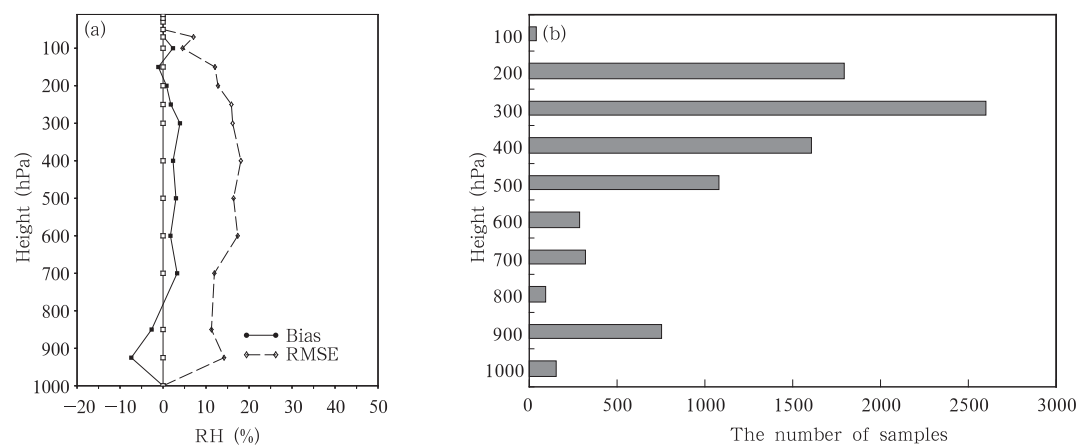


图 8 2011 年 7 月以 EC 分析为背景场湿度在(5%,20%]与探空湿度观测的垂直偏差场(a)及其在各垂直层次上的样本数(b)

Fig. 8 As in Fig. 5 but for the humidity between 5% and 20% (20% included)

由上述 EC 背景场与探空湿度观测偏差场垂直分段表现可见,当背景场湿度大于 60% 时,在 550—950 hPa 湿度偏差均为 5% 左右,探空观测偏干显著;背景场湿度在 (20%, 60%] 时偏差较小;背景场湿度小于 20% 则在 750 hPa 以下为负偏差,探空观测偏大,750 hPa 以上仍是正偏差,即探空湿度观测偏干。

对于以 EC 分析场为背景场与探空湿度观测偏差场水平分布,同样采用将湿度值分段比较,发现背景场与探空湿度观测偏差在水平方向上分布是比较均匀的,特别是对于背景场湿度大于 60% 的部分(图略),背景场与探空湿度观测正偏差大于负偏差,说明观测湿度偏干现象依然存在,但没有表现出明显的区域变化。而背景场湿度不高于 60% 的情况也类似。可见对于背景场湿度大于 60%,探空湿度观测偏干现象最为显著,需要进行偏差订正,以提高其使用的准确性。

4 探空湿度观测的偏差订正

通过对探空湿度偏差的比较与分析可以看出,探空湿度观测在大值区即湿度在 60% 以上时,观测湿度偏干现象较严重,必须对其偏差加以订正,使探空湿度观测准确性更高,更能反映真实大气的水汽分布,也更有利于数值预报中同化分析的使用。

4.1 探空湿度观测的偏差订正方法

英国气象局早在 1996 年研究发现,维萨拉 RS80 探空仪在探测水汽接近饱和时出现观测较低偏差,通过大量试验分析诊断探空观测与模式背景场(O-B)的偏差特点,给出相应的偏差订正分段线性函数,对观测湿度高于 80% 的值进行一定加湿订正,订正后对于预报模式的降水率有显著的提高。虽然中国目前使用的探空仪器是 L 波段的电子探空仪,不同于英国、美国等使用的维萨拉 RS80 探空仪,但根据 WMO 2004 年公布的探测仪测量精度表明:中国 L 波段电子探空仪测量精度比之前的 59 型机械电码式探空仪显著提高,与国际上使用的芬兰维萨拉公司的 RS80 探空仪测量偏差比较接近,精度相当(马舒庆等,2006;Li,2006;李伟等,2009),所以,在实际应用中借鉴英国气象局探空湿度偏差订正的方法,即对于观测湿度高于 80% 的观测采用分段线性函数订正方法:在观测湿度高于 80%、低于 92% 时,订正量由 0—3% 线性变化;观测值在

92%—96.5% 时,订正量为 3%;观测值在 96.5%—100% 时,订正量由 3% 线性减至 0。采用此方法订正后的观测湿度高于 80% 的偏差在垂直方向上各层次均有所减小,偏差最大值由订正前的 8% 降至 6% 左右(图略),虽然偏差相比之前有所减小,但探空观测湿度偏干现象依然存在。故在借鉴英国气象局方案的基础上,结合对中国探空观测湿度偏差的实际情况及特点的分析,将原订正方案加以改进,对观测湿度高于 60% 即开始订正,同时订正分段函数的系数做相应的调整。试验结果证明,使用改进后的偏差订正方案

$$\Delta f = \begin{cases} 0 & f_{ob} \leq 60 \\ \frac{f_{ob} - f_{crit}}{70 - f_{crit}} \times 3.0 & 60 < f_{ob} \leq 70 \\ \frac{f_{ob} - f_{crit}}{80 - f_{crit}} \times 6.0 & 70 < f_{ob} \leq 80 \\ \frac{f_{ob} - f_{crit}}{85 - f_{crit}} \times 7.5 & 80 < f_{ob} \leq 85 \\ 7.5 & 85 < f_{ob} \leq 95 \\ \frac{100 - f_{ob}}{100 - 95} \times 7.5 & 95 < f_{ob} < 100 \\ 0 & f_{ob} = 100 \end{cases} \quad (3)$$

偏差明显减小。式中, f 为(相对)湿度,湿度的阈值取 60%, 即 $f_{crit} = 60\%$, f_{ob} 为观测的湿度值。此分段函数与图 9 改进后偏差订正方案的分段函数图像是一一对应的。这里分段函数的取法借鉴了英国气象局对探空湿度观测的订正方法并结合前面对中国探空湿度观测偏差性能的分析,所以偏差的订正量

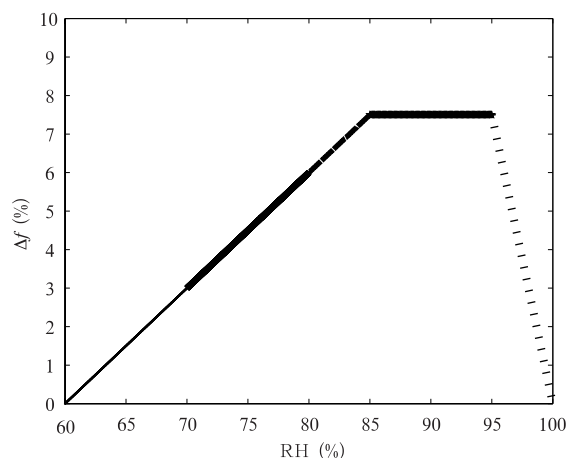


图 9 改进后偏差订正方案的分段函数图像

Fig. 9 Improved segmentation function image of the deviation correction scheme

相比之前的英国气象局方案要大。英国气象局方案最大订正值在 90%—95% 时达到 4.6%。改进后方案当探空观测湿度在 60%—80% 时,湿度的订正值是线性增大的,由 0 增大至最大 8%;当湿度观测在 80%—95% 时订正湿度为 8%;湿度观测高于 95% 后,则订正值逐渐减小至 0。整个订正最大值是在观测湿度为 80%—95% 时,订正量最大为 8%。

4.2 探空湿度观测的偏差订正结果分析

从采用改进偏差订正方案后探空湿度观测偏差垂直分布(图 10)可以看出,背景场湿度不低于 90% 时,探空湿度观测与其背景场的偏差在 400 hPa 以下

明显减小,400—850 hPa 的偏差由 8% 降至 0% 附近,均方根误差也由最大 18% 降至 13% (图 10a)。对于背景场湿度在 [80%, 90%), 探空湿度观测与其背景场的偏差在 400—850 hPa 由 6% 降至 0% 左右,偏差改进非常显著(图 10b)。背景场湿度在 [70%, 80%), 探空湿度观测与其背景场的偏差也有所减小(图 10c)。总之,通过探空湿度观测的偏差订正,在垂直层次各层上其偏差都有所减小,特别是背景场在 400—850 hPa 时改进更加显著,而相比之下 900 hPa 以下改进不明显。

图 11 为改进前后湿度场偏差的概率密度函数

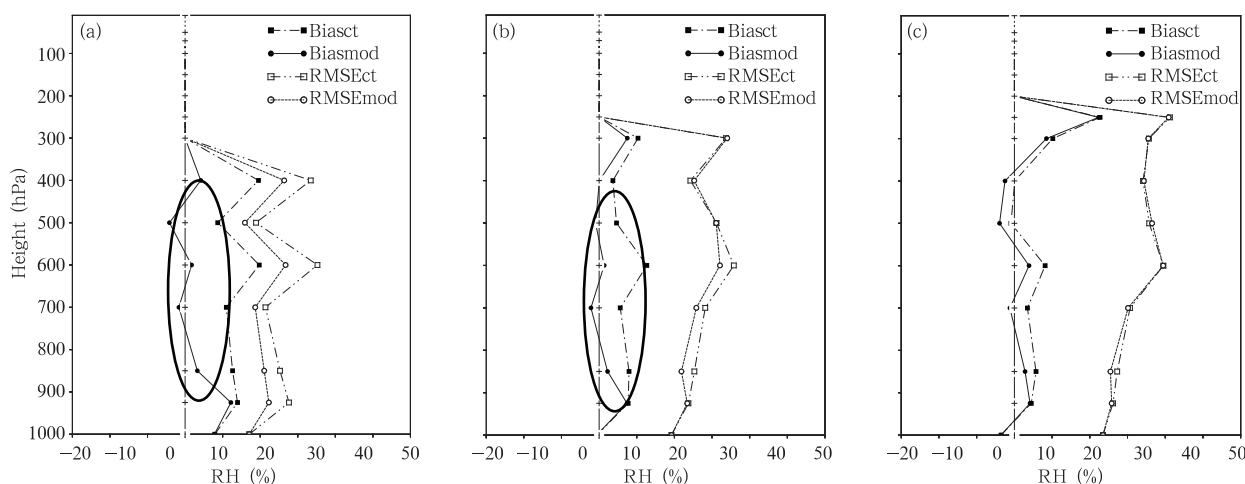


图 10 改进偏差订正方案后探空湿度观测与 EC 分析场为背景场的偏差垂直分布

(a. 背景场湿度不低于 90%, b. 背景场湿度在 [80%, 90%), c. 背景场湿度在 [70%, 80%))

Fig. 10 Vertical distribution bias with the EC analysis as the background field to the improved radiosonde humidity

(a. The humidity of background field is greater than or equal 90%, b. The humidity of background field is greater than or equal to 80% and less than 90%, c. The humidity of background field is greater than or equal to 70% and less than 80%)

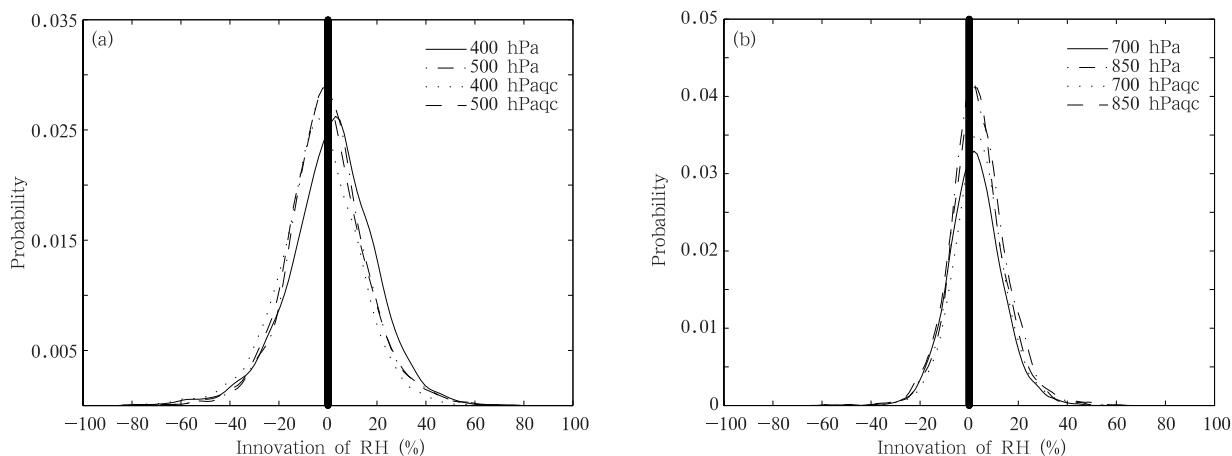


图 11 改进前后湿度场偏差的概率密度函数分布(a. 400、500 hPa 改进前后的对比, b. 700、850 hPa 改进前后的对比)

Fig. 11 Distributions of the probability density function before and after improving the humidity deviation

(a. 400 and 500 hPa, b. 700 and 850 hPa)

分布, 400—850 hPa 是湿度方案改进变化比较大的层次, 也是最为关注的几层。400 hPa 湿度场偏差的概率密度函数改进后较之前变窄, 更接近 0 线, 成正态分布; 而 500 hPa 变化较小, 但相比之前方案的偏差概率密度函数分布明显更窄更尖些(图 11a)。700 hPa 湿度场偏差的概率密度函数也是改进后较之前明显变尖变窄, 偏差值也变小, 850 hPa 变化不明显, 偏差值略微减小(图 11b)。总之通过湿度场偏差订正后观测的湿度与背景场偏差是减小了, 湿度场偏差的概率密度函数分布显示更加合理。

5 降水个例分析与连续试验

为了解探空湿度观测偏差订正后给资料同化分析与预报模式带来的影响, 采用 GRAPES 3Dvar 区域同化系统分别进行个例试验与连续试验。个例试验选取 2011 年 7 月 24 日 00 时常规观测资料, 包括探空、地面、飞机及船舶资料等。连续试验时段为 2011 年 7 月 1—31 日 1 个月, 其中, 试验 1 是未对探空湿度观测资料进行偏差订正, 试验 2 是对探空湿度观测资料进行偏差订正后的资料进行同化分析。

图 12 为 2011 年 7 月 24 日 00 时 24 h 降水实况

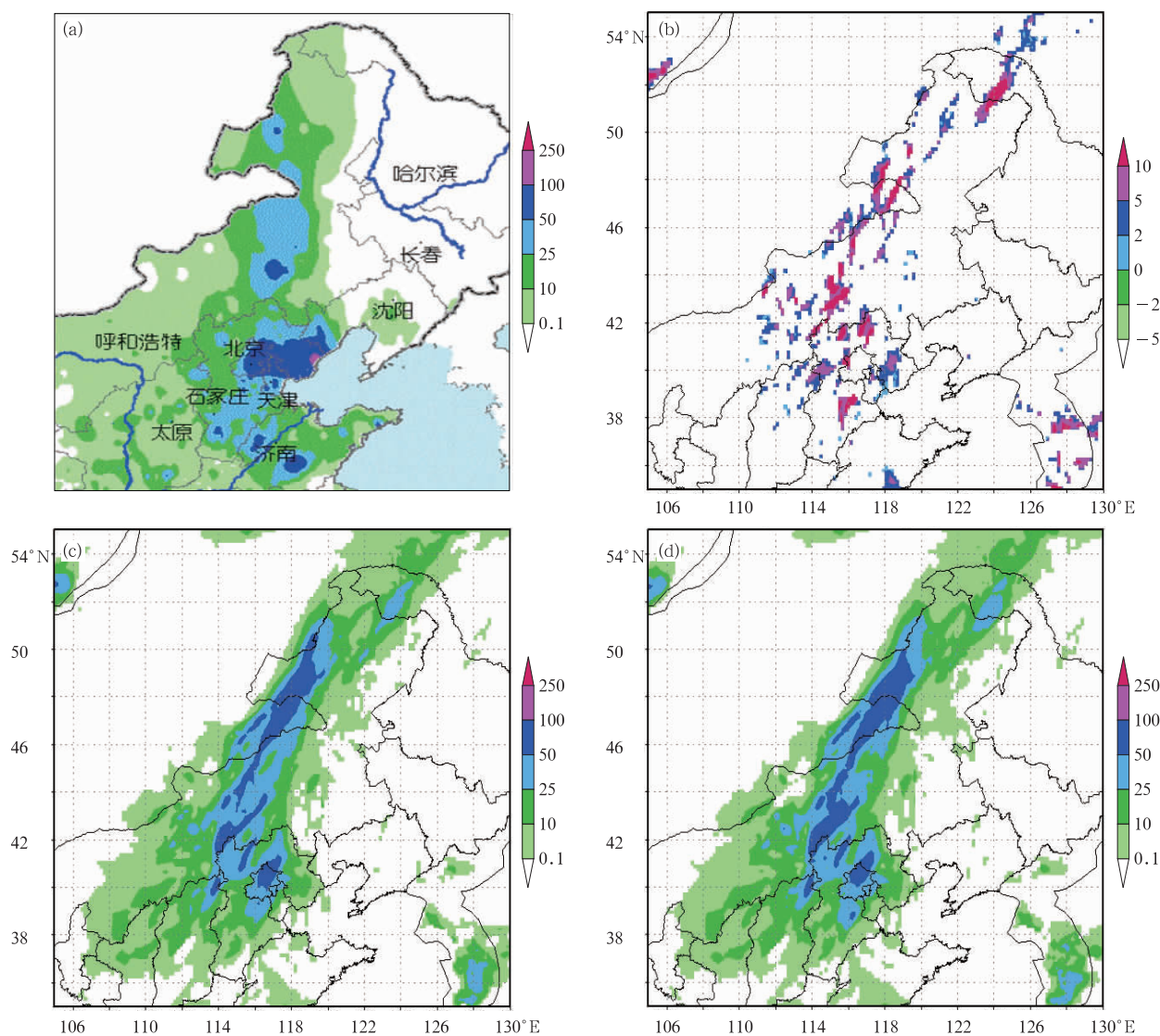


图 12 2011 年 7 月 24 日 00 时 24 h 降水分布(单位:mm)(a. 24 h 降水实况, b. 试验 1、2 的 24 h 降水预报差值, c. 试验 1 的 24 h 降水预报, d. 试验 2 的 24 h 降水预报)

Fig. 12 24 h accumulative rainfall over China at 00: 00 UTC 24 July 2011(unit: mm)

(a. 24 h real rainfall, b. Comparison of the forecast rainfall bias between the two experiments, c. 24 h forecast rainfall of the first experiment, d. 24-h forecast rainfall of the second experiment)

及试验 1、2 的 24 h 降水预报和两组试验的降水偏差分布。东北、华北北部地区有大面积的降水,其中,河北东北部和北京大部分地区有 50 mm 以上降水(图 12a)。两组试验对本次降水过程都有预报,但在降水的预报范围和强度上有差异,且都比实况降水偏弱,特别是对河北和北京等 50 mm 以上强降水中心,预报强度偏弱(图 12c、d)。可以看出,试验 2 与试验 1 的差均为正值,即试验 2 的预报降水量明显大于试验 1,说明经过对探空湿度观测资料的偏差订正后,反映在同化预报上降水量增强。特别是在强的降水中心北京、天津地区降水量显著增大 5—10 mm,相比试验 1 的预报,试验 2 的预报在降水强度上有所改进,更接近实况降水强度(图 12b)。

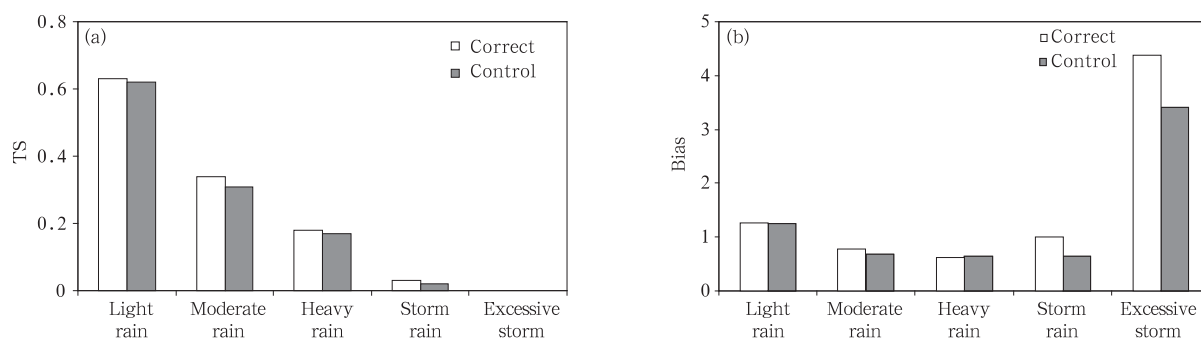


图 13 2011 年 7 月两组连续试验的降水检验

(a. 24 h 降水预报评分 TS, b. 模式预报偏差 Bias 值)

Fig. 13 Verification of the rainfall forecasts over China for July 2011 for the two experiments

(a. TS for 24 h rainfall forecast, b. Bias of forecast)

6 结论与讨论

通过将探空湿度观测资料与不同类型其他观测如 GPS 可降水量及 COSMIC 资料 2 级产品湿度廓线资料之间互校,并与和 NCEP、GRAPES、EC 等不同模式分析场为背景的湿度场进行比较,评估了中国区 L 波段探空湿度观测资料的质量状况;对探空湿度观测存在的湿度偏干现象加以订正;同时还进行了个例试验和连续试验,得到以下主要结论:

(1)探空湿度观测与 GPS 遥感计算的大气可降水量比较表明,探空湿度观测资料计算大气可降水量偏小,探空湿度观测存在偏干现象。探空湿度观测与 COSMIC 的 WetPrf 等湿度廓线资料比较发现相对湿度异常偏干现象主要出现在对流层中低层。

(2)同化探空湿度观测与以 NCEP、GRAPES、

图 13 是在 GRAPES 3Dvar 中使用未对探空湿度偏差订正和对探空湿度观测偏差订正两组试验同化分析后做 24 h 预报,连续 30 d 试验的降水检验结果。连续试验 24 h 降水预报 TS 评分,从小雨、中雨、大雨和暴雨预报评分的几个量级上看,试验 2 的预报评分明显优于试验 1 方案,说明探空湿度偏差订正方案是有正效果的(图 13a)。24 h 预报偏差在中雨、暴雨量级,试验 2 同样较试验 1 表现明显的优势,即中雨和暴雨量级试验 2 预报偏差比试验 1 都更接近 1,表示预报降水发生频率更接近实况降水发生频率,而小雨和大雨预报偏差变化不大(图 13b)。由此看出,对探空湿度观测偏差订正后对降水预报评分和偏差是有一定的改进效果。

EC 等不同模式分析场为背景场的试验结果发现:无论是在中国、欧洲还是北美探空湿度观测偏干现象普遍存在。当背景场质量较好时,其偏差较小。如用 EC 分析做背景场时,欧洲区与北美区在 400 hPa 以下偏差接近 0,说明探空观测湿度与背景场值基本一致,而在中国区偏差仍然为正值,表明中国区的探空湿度观测仍存在偏干现象。

(3)以 EC 分析为背景场与探空湿度观测偏差垂直分布看,当背景场相对湿度高于 60%,探空湿度观测偏差较大,观测偏干显著;背景场湿度为 (20%, 60%],偏差较小。采用分段函数对探空湿度观测偏差进行订正,订正后在 400—850 hPa 时 EC 分析为背景场与探空湿度观测偏差有显著改进,当背景场相对湿度不低于 80%时两者偏差接近 0,而相比之下 900 hPa 以下改进不明显。

(4)降水的个例试验及连续试验都表明:探空湿度观测偏差订正后对于降水预报强度偏弱的情况有改进,从连续试验的降水预报 TS 评分和预报偏差看,中雨和暴雨的预报能力有显著的提高。

总之,通过用探空湿度观测资料与不同类型的观测资料之间互校及与 NCEP、GRAPES、EC 等不同模式分析场为背景的湿度场进行比较,评估中国区 L 波段探空湿度观测资料的质量状况;发现中国区的探空湿度观测资料存在偏干现象,使人们对探空资料的质量有新的认识,为更好地使用该资料提供了依据。同时对探空湿度观测资料存在偏干加以订正,订正效果显著,对降水预报强度的改进起到积极的作用。由于目前诊断评估受资料时间长度的限制,试验结果分析只是初步的认识,可能还不够全面,尚需利用更多的资料进行更长时段的数值模拟分析与研究。

参考文献

- 曹云昌, 方宗义, 夏青. 2005. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析. 应用气象学报, 16(1): 54-59. Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q. 2005. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation. J Appl Meteor Sci, 16(1): 54-59 (in Chinese)
- 陈敏, 范水勇, 郑祚芳等. 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探. 气象学报, 69(1): 181-194. Chen M, Fan S Y, Zhen Z F, et al. 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast. Acta Meteor Sinica, 69(1): 181-194 (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. 气象, 40(2): 158-165. Hao M, Tian W H, Gong J D. 2014. Study of L-band second-level radiosonde Data application in the GRAPES assimilation system. Meteor Mon, 42(2): 158-165 (in Chinese)
- 梁宏, 张人禾, 刘晶森. 2012. 青藏高原大气水汽探测误差及其成因. 气象学报, 70(1): 155-164. Liang H, Zhang R H, Liu J M. 2012. Systematic errors in the precipitable water vapor measurements over the Tibetan Plateau and associated causes. Acta Meteor Sinica, 70(1): 155-164 (in Chinese)
- 马舒庆, 李峰, 邢毅. 2006. 从毛里求斯国际探空系统对比看全球探空技术的发展. 气象科技, 34(5): 606-609. Ma S Q, Li F, Xing Y. 2006. Overview of the global upper-air sounding technology Development based on the sounding system of Mauritius. Meteor Sci Technol, 34(4): 606-609 (in Chinese)
- 李伟, 李锋, 赵志强等. 2009. L 波段气象探测系统建设技术评估报告. 北京: 气象出版社, 95pp. Li W, Li F, Zhao Z Q, et al. 2009. L-Band Meteorological Sounding System Construction Technology Evaluation Report. Beijing: China Meteorological Press, 95pp (in Chinese)
- 世界气象组织. 2005. 《气象仪器和观测方法指南》(第六版). WMO. 2005. Meteorological Instruments and Observation Method Guide (The sixth edition). (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. 热带气象学报, 30(4): 643-653. Tang N J, Liu Y, Li G, et al. 2014. New problems in the low-level relative humidity sounding observation: A preliminary analysis of the anomalous dry observation by the Chinese L-band sounding system. J Trop Meteor, 30(4): 643-653 (in Chinese)
- 陶士伟, 陈晓红, 龚建东. 2006. L 波段探空仪温度资料误差分析. 气象, 32(10): 46-51. Tao S W, Chen X H, Gong J D. 2006. Error analyses for temperature of L band radiosonde. Meteor Mon, 32(10): 46-51 (in Chinese)
- 万蓉, 郑国光, 于胜杰等. 2013. 基于观测约束的地基 GPS 三维水汽层析技术研究. 气象学报, 71(2): 318-331. Wan R, Zhen G G, Yu S J. 2013. A study of the ground-based GPS 3D water vapor tomography with radiosonde vertical constraining. Acta Meteor Sinica, 71(2): 318-331 (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. 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. Meteor Mon, 36(9): 14-20 (in Chinese)
- 王珣, 李伟, 陈永清等. 2011. L 波段探空系统高空风平滑计算方法探讨. 气象, 37(1): 85-91. Wang M, Li W, Chen Y Q, et al. 2011. Investigation on the smoothing methods for upper-air wind measurements by L-band radar and radiosonde sounding system. Meteor Mon, 37(1): 85-91 (in Chinese)
- 颜晓露, 郑向东, 李蔚等. 2012. 两种探空仪观测湿度垂直分布及其应用比较. 应用气象学报, 23(4): 433-440. Yan X L, Zhen X D, Li W, et al. 2012. Inter-comparison and application of atmospheric humidity profiles measured by CFH and Vaisala RS80 radisondes. J Appl Meteor Sci, 23(4): 433-440 (in Chinese)
- 姚雯, 马颖, 徐文静. 2008. L 波段电子探空仪相对湿度误差研究及其应用. 应用气象学报, 19(3): 356-361. Yao W, Ma Y, Xu W J. 2008. Relative humidity observational error of the L-band electronic radiosonde and related applications. J Appl Meteor Sci, 19(3): 356-361 (in Chinese)
- 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. 气象学报, 70(1): 30-38. Zhang C Z, Wan Q L, Ding W Y, et al. 2012. An experiment in application of the dropsonde data to forecasting the track of Typhoon Morakot. Acta Meteor Sinica, 70(1): 30-38 (in Chinese)
- Agusti-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. Quart J Roy Meteor

- Soc, 135(640): 595-617
- Benjamin S G, Jamison B D, Moninger W R, et al. 2010. Relative short-range forecast impact from aircraft, profiler, radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and mesonet observations via the RUC hourly assimilation cycle. *Mon Wea Rev*, 138(4): 1319-1343
- Bian J C, Chen H B, Vömel H, et al. 2011. Intercomparison of humidity and temperature sensors: GTS1, Vaisala RS80 and CFH. *Adv Atmos Sci*, 28(1): 139-146
- Ciesielski P E, Johnson R H, Wang J H. 2009. Correction of humidity biases in Vaisala RS80-H sondes during NAME. *J Atmos Ocean Technol*, 26(9): 1763-1780
- Ciesielski P E, Chang W M, Huang S C, et al. 2010. Quality-controlled upper-air sounding dataset for TiMREX/SoWMEX: Development and corrections. *J Atmos Ocean Technol*, 27(11): 1802-1821
- Dai A G, Wang J H, Thorne P W, et al. 2011. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data. *J Climate*, 24(4): 965-991
- Durre I, Vose R S, Wuertz D B. 2006. Overview of the integrated global radiosonde archive. *J Climate*, 19(1): 53-68
- Faccami C, Rabier F, Fourrié N, et al. 2009. The impacts of AMMA radiosonde data on the French global assimilation and forecast system. *Wea Forecasting*, 24(5): 1268-1286
- Flores F, Rondanelli R, Díaz M, et al. 2013. The life cycle of a radiosonde. *Bull Amer Meteor Sci*, 94(2): 187-198
- Guichard F, Parsons D, Miller E. 2000. Thermodynamic and radiative impact of the correction of sounding humidity bias in the tropics. *J Climate*, 13(20): 3611-3624
- Kottayil A, Buehler S A, John V O, et al. 2012. On the importance of Vaisala RS92 radiosonde humidity corrections for a better agreement between measured and modeled satellite radiances. *J Atmos Ocean Technol*, 29(2): 248-259
- Li F. 2006. New Development with upper Air Sounding in China. Instruments and Observing Methods Report No. 94, WMO/TD No. 1354. Geneva: WMO
- Lorenc A C, Barker D, Bell R S, et al. 1996. On the use of radiosonde humidity observations in mid-latitude NWP. *Meteor Atmos Phys*, 60(1-3): 3-17
- Mathieu N, Lafore J P, Guichard F, et al. 2008. Correction of humidity bias for Vaisala RS80: A sondes during the AMMA 2006 Observing Period. *J Atmos Ocean Technol*, 25(11): 2152-2158
- Miloshevich L M, Vömel H, Whiteman D N, et al. 2009. Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements. *J Geophys Res*, 114: D11305, doi: 10.1029/2008JD011565
- Rowe P M, Miloshevich L M, Turner D D, et al. 2008. Dry bias in Vaisala RS90 radiosonde humidity profiles over Antarctica. *J Atmos Ocean Technol*, 25(9): 1529-1541
- Sperka S, Steinacker R. 2011. A quality-control and bias-correction method developed for irregularly spaced time series of observational pressure data. *J Atmos Ocean Technol*, 28(10): 1317-1323
- Vömel H, Selkirk H, Miloshevich L, et al. 2007. Radiation dry bias of the Vaisala RS92 humidity sensor. *J Atmos Ocean Technol*, 24(6): 953-963
- Wang J H, Cole H L, Carlson D J, et al. 2002. Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80 radiosonde: Application to TOGA COARE data. *J Atmos Ocean Technol*, 19(7): 981-1002
- Wang J H, Zhang L Y. 2008. Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. *J Climate*, 21(10): 2218-2238
- Wang J H, Zhang L Y, Dai A G, et al. 2013. Radiation dry bias correction of Vaisala RS92 humidity data and its impacts on historical radiosonde data. *J Atmos Ocean Technol*, 30(2): 197-214