

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.

L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究^{*}

郝 民 田伟红 龚建东

中国气象局数值预报中心, 北京 100081

提 要: 我国探空站的探空系统升级为 L 波段探空系统后, 可以获取全国 120 个站点连续自动测定的高空温、压、湿、风等高垂直分辨率秒级和分钟级探空廓线数据。为了分析高垂直分辨率探空秒级资料水平和垂直结构特征, 并将其应用于区域 GRAPES-3DVAR 变分同化预报系统中, 文章比较秒/分钟级探空与传统探空资料使用对资料同化预报带来的影响。试验中使用 2011 年 6—7 月资料进行分析, 结果发现: 秒级探空资料具有水平分布均匀, 垂直结构非常密集的特点; 在 850、500 hPa 等层次上高度分析比传统探空分析更接近 NCEP 分析, 显示出对分析场的改进效果; 同时风场在 200 hPa 以上的高层分析中改进显著, 表现出高分辨率资料使用在高层分析中对系统模拟更加准确的特征。由于模式预报初值的改进, 降水预报评分有所提高, 预报偏差明显变小。因此高垂直分辨率秒级探空资料的使用对数值模式分析初值及预报的改进有着积极的意义, 这为进一步开发利用秒级探空资料打下基础。

关键词: 秒级探空, GRAPES, 对比分析, 同化预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.003

Study of L-Band Second-Level Radiosonde Data Applied in GRAPES Assimilation System

HAO Min TIAN Weihong GONG Jiandong

CMA Numerical Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: After the radiosonde system of radiosonde station in China was upgraded to the L-band sounding system, the high-resolution vertical second-level or minute-level sounding data including temperature, pressure, humidity, wind profiles at 120 national stations can be continuously and automatically obtained. In this study, the high-resolution vertical second-level sounding profiling data are used to analyze the characteristics of their horizontal and vertical structures and to apply to GRAPES-3DVAR Regional Variational Assimilation Prediction System so as to compare the difference between the high-resolution vertical second/minute-level sounding profiling data and the traditional ones applied on the assimilation and prediction. The experiments using the data of June and July in the year of 2011 show encouraging results. The second-level sounding profiling data can lead to a uniform horizontal distribution with highly dense vertical structure. The analyses of height-field at 850 hPa and 500 hPa layers are closer to NCEP analyses than those with the traditional sounding data, which shows the improved effect for the analysis fields. Meanwhile, there is a significant improvement on the wind analysis fields for 200 hPa and higher layers, which shows the application of high-resolution data on the high-layer analysis can lead to more accurate system simulation. Furthermore, due to the improvement of the initial fields for the model prediction, the performance score for precipitation forecast increased and the forecast deviation obviously becomes smaller. Conclusive-

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106008)和国家自然科学基金项目(41275105、41375107)共同资助

2013 年 2 月 20 日收稿; 2013 年 7 月 15 日收修定稿

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

ly, the use of high-resolution vertical radiosonde data has a positive impact on the initial analysis and forecast improvements of numerical model, which can provide the necessary foundation for the further development and utilization of second-level radiosonde data.

Key words: second level radiosonde data, GRAPES, comparison analysis, assimilation prediction

引 言

近几年,我国探空站的探空系统已经由 59 型探空系统逐步升级为 L 波段探空系统。它的电子探空仪采用电子感应元件,采样可达到 1.2 s 的秒级周期,这大大提高了大气探测精度,且提供了密集的“秒级”数据,为获取高垂直分辨率廓线探空信息提供了很好的平台。全国 120 个站点可连续自动测定高空温、压、湿、风等气象要素值。按照 $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升速计算,秒数据探空数据垂直采样间隔约为 8 m,探测高度可达 10 hPa(杨湘婧等,2011;田广元等,2011)。与传统的探空资料相比,L 波段探空系统秒数据资料具有时间和空间的高分辨率、定位准确的特点,是目前唯一能对全国高空大气进行同时的、立体探测的系统,且探测数据可靠。

在 20 世纪 90 年代国外已经开始研究利用高垂直分辨率探空资料分析小尺度天气结构特征,以及对对流层高层和平流层低层的温度廓线进行谱分析(Hamilton et al,1995)。进入 21 世纪美国科学家利用平流层过程及其气候作用计划(Stratospheric Processes and their Role in Climate,SPARC)积累的高分辨率无线电探空资料(high vertical resolution radiosonde data,,HVRRD)(卞建春等,2004;彭冲等,2012)进行重力波的研究。SPARC 数据中心提供的高分辨率的探空资料(垂直分辨率约为 30 m),被用于研究分析重力波时空变化的谱特征,及热带对流系统质量通量和水汽收支的关系(Bell et al,2008)。2005 年起美国 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)可获取连续的秒级数据,相比 SPARC 垂直分辨率为 30 m,秒级数据垂直分辨率达到 5 m,该资料能更好地分析小尺度大气结构与特征。

目前,我国对 L 波段常规探测数据的使用大多数情况还多仅限于以往业务上使用的标准层与特性层资料,而对 L 波段探测“秒级”数据的开发应用分析仍存在很大的局限性,如“秒级”数据的时空分辨率都很高,而数值模式目前还尚未达到如此高的垂直分辨率,探空资料作为资料同化中资料质量较高、

性能稳定的非常重要的一类资料如何合理使用这些高垂直分辨率信息,为数值预报模式服务是有待探索解决的问题。

本文使用我国的 L 波段探空系统秒数据资料,分析其水平和垂直结构特征,并将其应用于我国区域 GRAPES 变分同化系统中,比较高垂直分辨率秒/分钟数据与传统探空数据使用对资料同化的影响,以便更好利用高分辨率探空资料,为提高数值预报的准确性打下基础。

1 秒/分钟资料特点

目前 L 波段探空秒级数据水平分布与传统探空分布是一致的,在中国区有 120 站点(如图 1),从图上看总的分布是比较均匀的,仅在高原地区略有稀疏。秒级探空数据采样时间频次周期为 1.2 s,分钟级采样周期是每 1 min 采样。而秒数据垂直间隔约 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,探测高度 10 hPa 以上,分钟探空 $400 \sim 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。秒资料垂直层次约 4000 层/站,分钟资料约 90 层/站,传统探空约 40 层/站,比较表 1 看出秒级探空数据不仅和传统探空一样可连续自动探测高空的温、压、湿等气象要素值,还可获取观测点的仰角、方位、距离等位移信息,为探空资料的准确定位带来了方便。图 2 是单站 2011 年 6 月 14 日 00 时秒级探空以及分钟探空的垂直廓线,其中包括了温度、气压及湿度观测量。比较两廓线图看出两者基本是一致的,相比分钟廓线,秒级数据垂直层次更加密集。

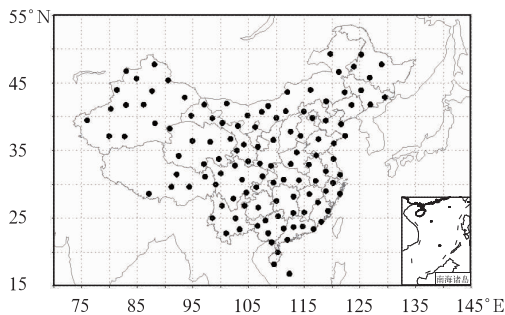


图 1 中国区探空站分布

Fig. 1 Distribution of radiosonde stations in China

表 1 秒级、分钟级和传统探空观测要素比较
Table 1 Comparison between observation factors of second/minute-level radiosonde and traditional radiosonde

秒级数据	分钟级数据	传统探空
相对时间	相对时间	气压
气温	气温	位势高度
气压	气压	气温
湿度	湿度	露点温度
仰角	风向	风向
方位	风速	风速
距离	高度	相对纬度偏差
纬度偏差	纬度偏差	相对经度偏差
经度偏差	经度偏差	
风向		
风速		
位势高度		

2 质量控制

秒级探空数据的质量控制目前仍采用与传统探空观测一致的质量控制方法。如极值检查、内部一致性检查、温度递减率检查、逆温检查、风切变检查等(陶士伟等,2006)。同时剔除在温度小于 -40°C 且相对湿度小于5%的湿度资料。图3分析2011年7月24日00时秒/分钟级探空数据及传统探空的 u 风场观测与模式背景场的散点分布,看出无论是观测值还是模式背景值都集中于对角线上,说明探空观测风场和预报模式背景场资料是非常接近的,没有明显的离群资料,探空风场资料质量较好。

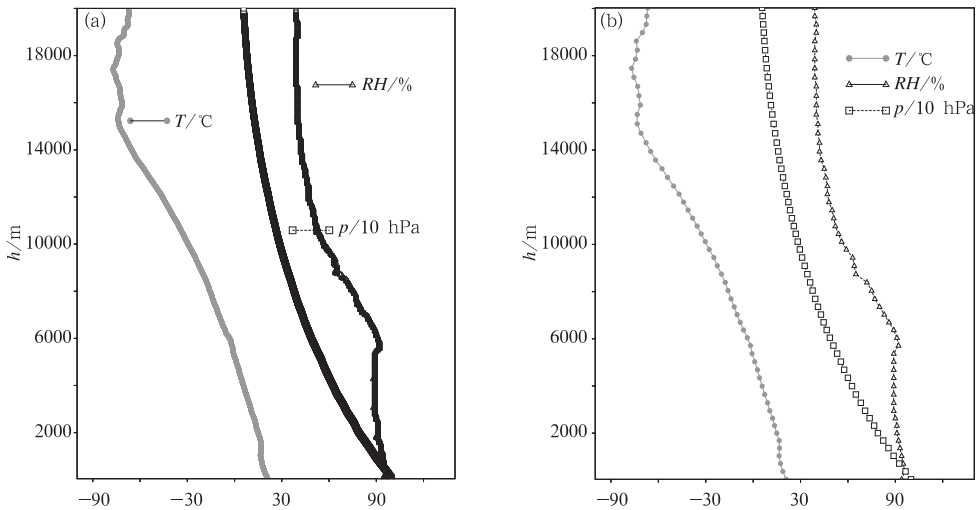


图 2 2011 年 6 月 14 日 00 时秒/分钟资料的单站廓线
(a) 秒级资料, (b) 分钟级资料

Fig. 2 Profile of second/minute level radiosonde data at 00 UTC 14 June 2011
(a) second-level radiosonde data, (b) minute-level radiosonde data

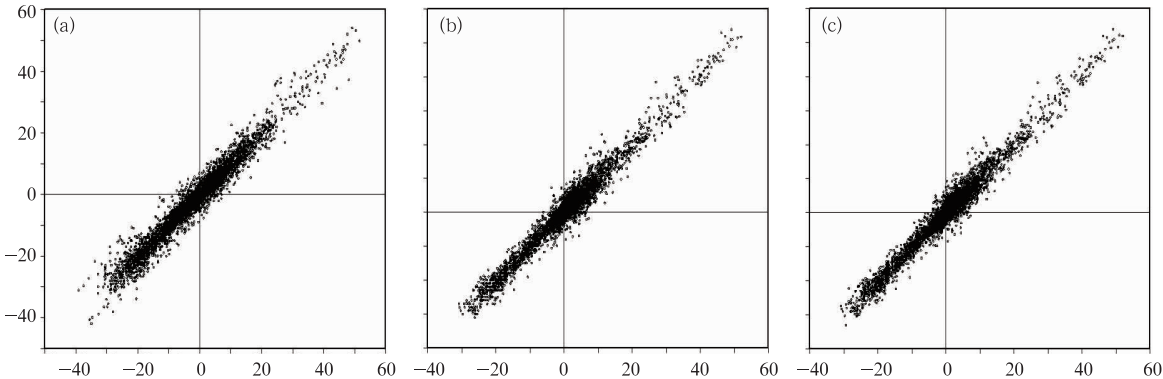


图 3 2011 年 7 月 24 日 00 时秒/分钟数据及传统探空风的 u 分量观测与模式背景场的散点分布
(a) 传统探空试验, (b) 秒级探空试验, (c) 分钟级探空试验
(X 坐标为模式背景场, Y 坐标为探空观测)

Fig. 3 Scatter distributing of u -wind of second/minute-level and tradition radiosonde at 00 UTC 24 July 2011
(a) traditional radiosonde, (b) second-level radiosonde, (c) minute-level radiosonde
(X and Y corrdinates represent model background field and radiosonde observation, respectively)

同样的温度场和气压场也有类似的结果(图略)。这对同化中探空资料的使用是非常有益的。

3 秒级探空的同化应用方法

秒级探空资料虽然垂直层次很密,但目前由于 GRAPES 模式的垂直分辨率还不是很高,仅有 31 层,故在实际应用中仍将秒级探空资料作为廓线资料来使用,采用将观测资料直接插值到模式面上,进行同化分析。即在已知模式面上找观测资料最接近模式层的观测值,插值到最近的模式层上,这样可尽量减少由于插值带来的误差(王緬等,2011)。图 4 是 2011 年 7 月 24 日 00 时(UTC)单站观测插值到模式面的秒级/分钟探空与传统探空的比较。从图

4a 和 4b 为 u 、 v 风场的垂直廓线看,秒级探空、分钟探空和传统探空比较在各个层次上差异不大,数值上基本是一致的;图 4c 为插值到模式面温度场,可以看出秒级/分钟探空与传统探空三条线几乎是完全重合的;而图 4d 湿度场秒级和分钟探空比较一致,而与传统探空相比在 850~500 hPa 与之差异较大。这可能与探空湿度观测系统本身误差较大有关。由于秒级/分钟级探空资料其垂直分辨率较高,它比传统探空更好地反映大气垂直状况,所以在观测误差大时,这种差异表现更加显著。探空湿度观测误差较大给同化分析结果带来负面影响,目前还是有待解决的一个难题,需要进一步的质量控制加以处理,使之更加合理地应用于同化预报中。

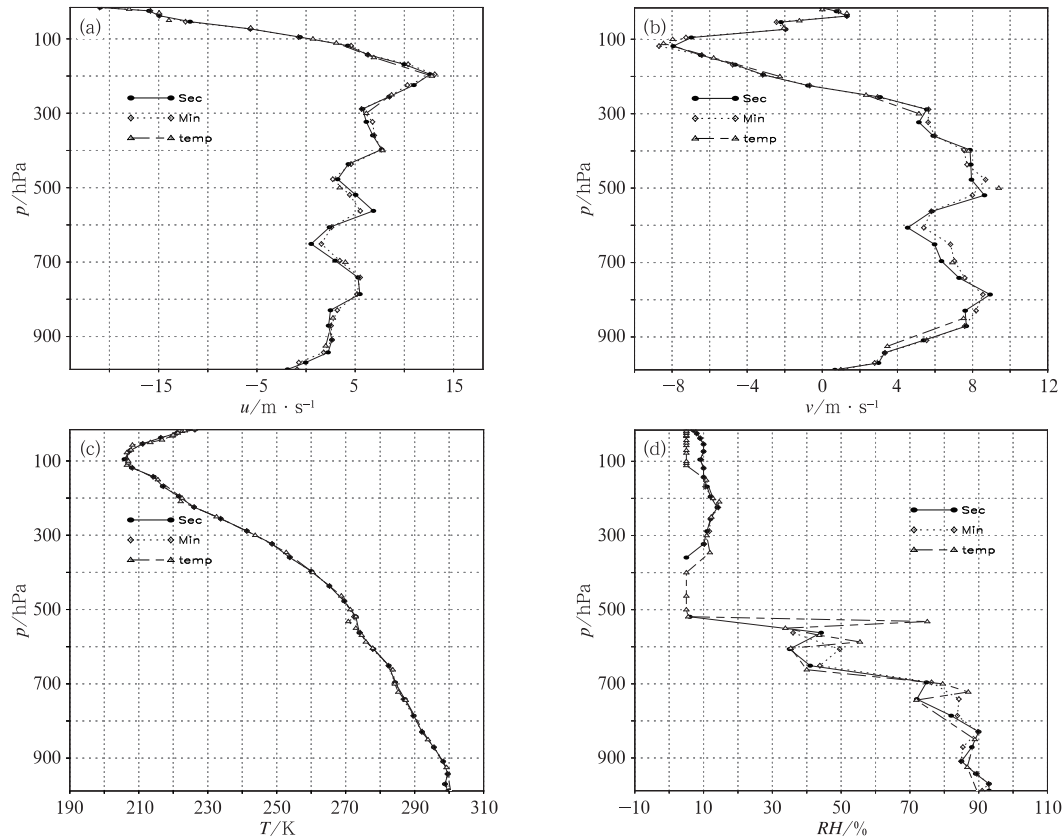


图 4 2011 年 7 月 24 日 00 时模式面的秒级(sec)/分钟(min)探空与传统探空(temp)的比较
(a) u 风场, (b) v 风场, (c) T 温度, (d) RH 相对湿度

Fig. 4 Comparison between second (sec)/minute-level (min) and traditional radiosonde(temp) data on model level at 00 UTC 24 July 2011
(a) u -wind, (b) v -wind, (c) T , (d) RH

4 一个例试验

为了解高分辨率秒/分钟级探空资料在 GRAPES 3DVAR 同化系统中应用对同化分析产生

的影响,选取 2011 年 7 月 24 日 00 时中国区域的秒级探空、分钟探空及传统探空资料在 GRAPES 3DVAR 同化分析系统中进行试验。7 月 24—25 日,受蒙古南下低涡切变系统影响,河套地区 500 hPa 低槽向南加深,此时副热带高压西脊线伸

至华南西部,西风带高压与副热带高压打通,同时 850 hPa 存在一条明显的西南急流带,强度达 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,冷暖空气在河套地区交汇,华北东部、黄淮发生强对流天气,这些地区伴有大范围短时强降水(张小雯等,2011;于超,2011;尹恒等,2012)。

试验采用中国气象局数值预报中心研发的区域 GRAPES 数值预报系统。模式采用全可压原始静力平衡与非静力平衡可选方案,半隐式、半拉格朗日动力框架,水平方向采用 Arakawa-C 跳点网格设计,垂直方向采用 Charney-Philips 跳层设计的地形高度追随坐标,取不等距 31 层(郝民等,2013;薛纪善等,2008;马旭林等,2009)。模式水平分辨率为 $0.15^{\circ}\times 0.15^{\circ}$,预报范围($15^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$),覆盖了整个中国区域,其同化为 GRAPES 3DVAR 三维变分同化系统。试验得到相应高度、温度场和风场分析结果与 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)分析场进行比较(郑祚芳等,

2013;刘君等,2013)。由于 NCEP 系统相对完善,分析场应用了较多的常规和非常规观测资料,使我们能得到的较好参照场。故设计 4 组对比试验见表 2,比较使用不同资料后的分析结果。

4.1 高度场分析

从图 5 的 500 hPa 高度场分析中可以看出试验二、三、四的结果很接近,与试验一 NCEP 分析的差异主要表现在东南沿海和青藏高原北部地区。其中高原地区试验二、三、四分析场要比 NCEP 分析略

表 2 对比试验方案

Table 2 Comparison of test schemes

试验	使用资料
一	NCEP 分析
二	传统探空资料
三	秒级探空资料
四	分钟级探空资料

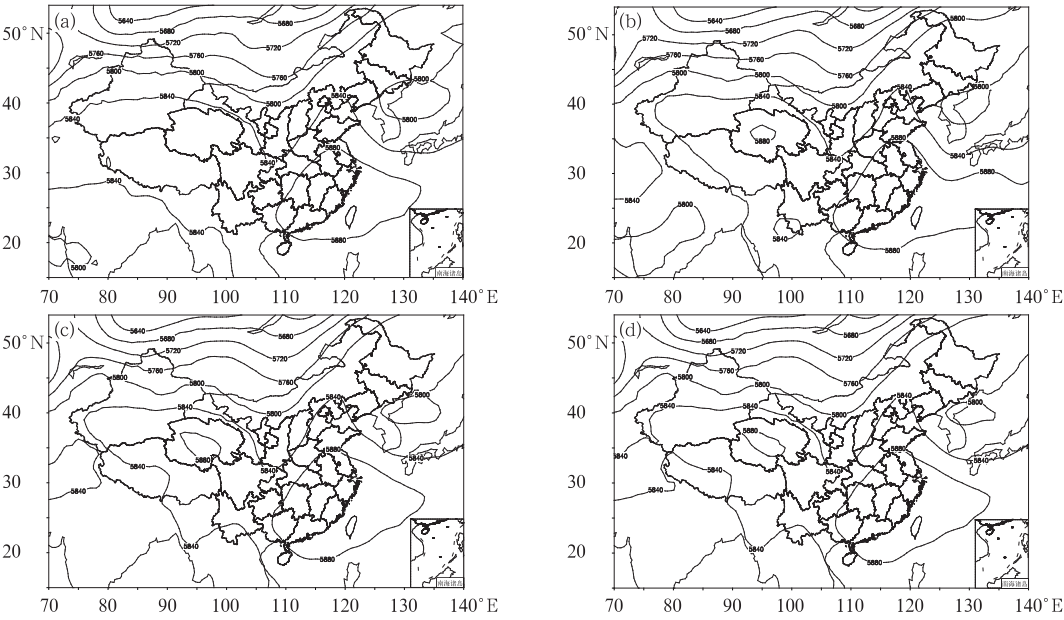


图 5 4 组试验的 500 hPa 高度场分析

(a) NCEP 分析场, (b) 传统探空分析场, (c) 秒级探空分析场, (d) 分钟级探空分析场

Fig. 5 500 hPa geopotential height analysis in the experiments for four schemes

(a) NCEP data analysis, (b) traditional radiosonde data analysis, (c) second-level radiosonde data analysis, (d) minute-level radiosonde data analysis

强,都有一闭合的高压出现,且这 3 组试验之间在高原上分析差异不大。而在东南部地区的分析,试验三、四与试验一在强度和位置上都更加接近,试验二与其他试验略有差异。图 6 是试验二、三、四与试验一在 500 hPa 高度场分析的偏差场,从图 6a 中可以更清楚看出试验二与试验一的偏差在新疆和青海等地区明显大于图 6b 和 6c 试验三、四与试验一的偏

差。即使用秒级探空数据的分析 500 hPa 高度场结果更接近 NCEP 分析,而使用传统探空资料的分析与 NCEP 分析比较偏差略大。同样比较 4 组试验在 850 和 250 hPa 的高度场分析(图略)可以得到相似的结果,说明高分辨率资料对于像资料稀少高原地区的分析改进是有正贡献的。

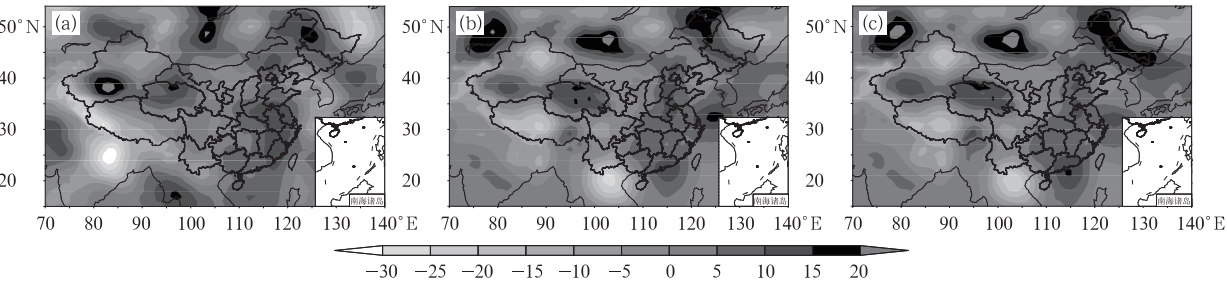


图 6 4 组试验 500 hPa 高度场分析偏差
(a) 传统探空与 NCEP 的偏差, (b) 秒级探空与 NCEP 的偏差, (c) 分钟级探空与 NCEP 的偏差

Fig. 6 The bias of 500 hPa geopotential height analysis in the experiments for four schemes
(a) comparison between traditional radiosonde and NCEP data analysis, (b) comparison between second-level radiosonde and NCEP data analysis, (c) comparison between minute-level radiosonde and NCEP data analysis

4.2 温度场分析

图 7 是 850 hPa 温度场试验二、三、四与试验一的分析结果偏差, 从中看出偏差最大在甘肃北部, 其中图 7a 试验二与试验一的偏差最大, 达到 2.5℃ 以上, 图 7b 是试验三与试验一的偏差为 1.5℃, 而图 7c 是试验四与试验一的偏差约为 1.0℃, 由此看出

秒级探空资料和分钟资料的分析偏差都小于传统探空的分析偏差, 即秒与分钟探空的分析明显优于传统探空的分析, 更接近 NCEP 的分析结果。

4.3 风场分析

图 8 是 500 hPa 风场分析偏差, 从图 8a 中看出风场偏差大的位置在高原北部地区, 试验二与试验

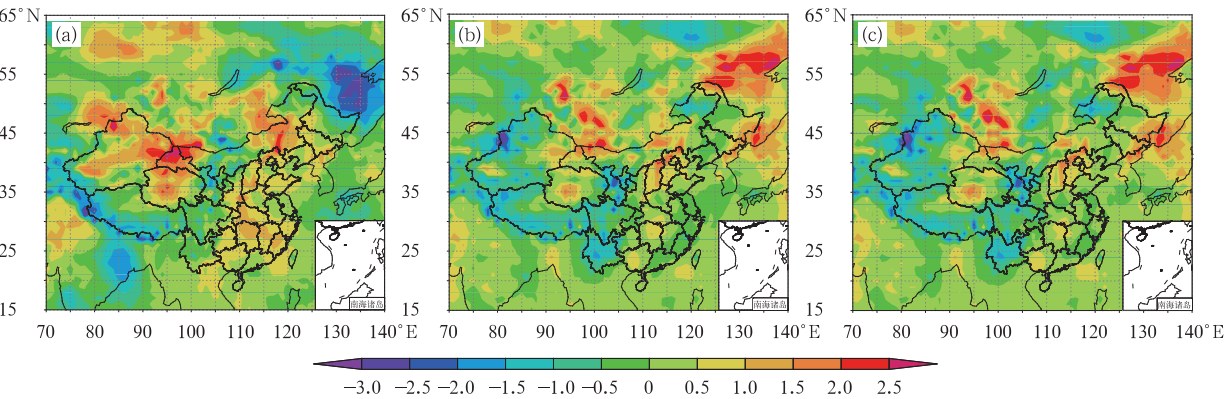


图 7 850 hPa 温度场分析结果偏差
(a) 传统探空与 NCEP 的偏差, (b) 秒级探空与 NCEP 的偏差, (c) 分钟级探空与 NCEP 的偏差

Fig. 7 Comparison of bias of 850 hPa temperature analysis
(a) comparison between traditional radiosonde and NCEP data analysis, (b) comparison between second-level radiosonde and NCEP data analysis, (c) comparison between minute-level radiosonde and NCEP data analysis

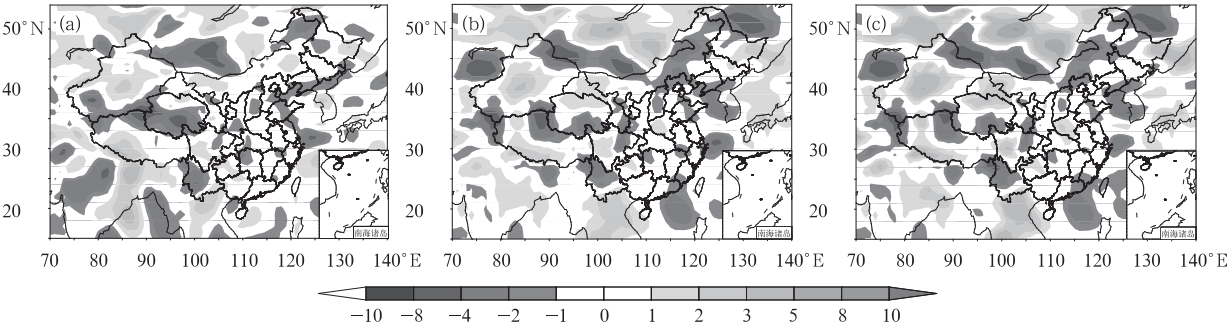


图 8 500 hPa 风场分析偏差
(a) NCEP 与传统探空的偏差, (b) 秒级探空与 NCEP 的偏差, (c) 分钟级探空与 NCEP 的偏差

Fig. 8 Comparison of bias of 500 hPa wind analysis
(a) comparison between traditional radiosonde and NCEP data analysis, (b) comparison between second-level radiosonde and NCEP data analysis, (c) comparison between minute-level radiosonde and NCEP data analysis

一的偏差为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而图 8b 试验三与试验一的偏差为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,图 8c 试验四与试验一的偏差也为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,但试验三、四与试验一的偏差比较,范围要小些。故使用秒级资料的分析结果要略优于分钟资料的分析,而秒级和分钟级探空分析又都优于传统探空的分析。

5 连续试验

选取 2011 年 6 月 1—30 日连续 30 d 的秒级探空、分钟探空和传统探空资料在 GRAPES 3DVAR 同化系统进行连续模拟试验。为了能更清楚比较秒级/分钟级探空和传统探空资料使用对模式预报的影响,试验中仅同化了探空资料,没有加入其他资料,并做 24 h 模式预报。比较试验二、三、四同化分

析结果与 NCEP 分析的风场均方根偏差以及 24 h 模式预报的降水预报评分,预报偏差等。

5.1 风场均方根偏差

图 9 是试验二、三、四与 NCEP 风场分析比较的均方根偏差,图 9a、9b 分别是 u 和 v 风场。从图中看出:使用高垂直分辨率的秒、分钟探空资料分析的风场偏差在绝大部分垂直层次上明显小于传统探空的偏差,特别是在高层 150 hPa 以上分析中,偏差的改进更加显著。风场 u 、 v 有同样的改进效果。说明使用高垂直分辨率探空资料对分析有一定的正效果。

5.2 24 h 降水预报评分

图 10 是在 GRAPES 3DVAR 中使用传统探空、秒级探空及分钟探空资料同化分析后做连续 30 d

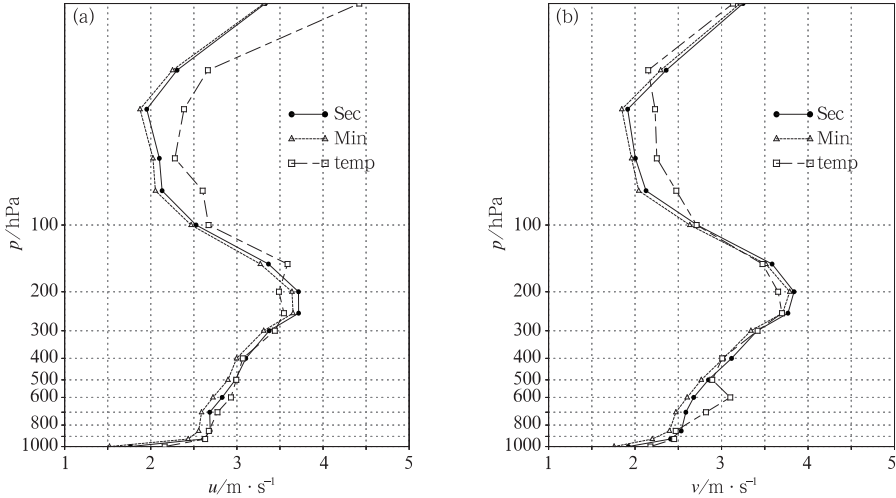


图 9 试验风场与 NCEP 比较的均方根偏差
(a) u 风场, (b) v 风场

Fig. 9 Comparison of root mean square errors of wind analysis with NCEP analysis
(a) u -wind, (b) v -wind

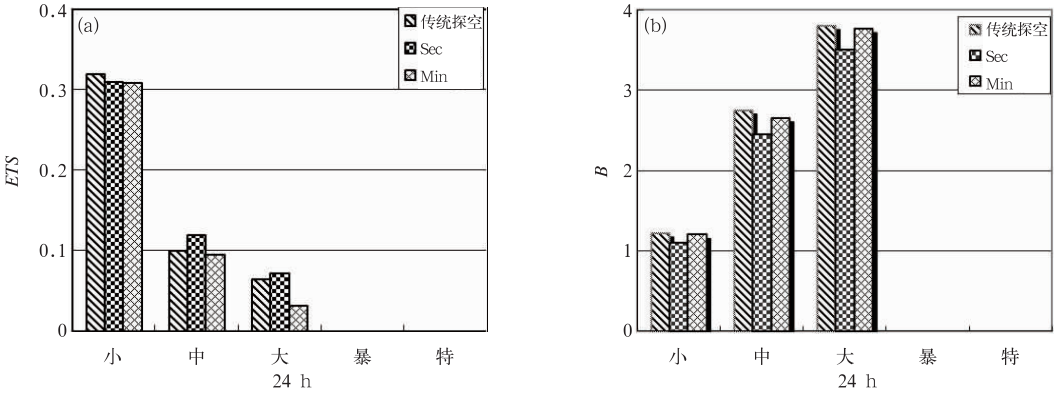


图 10 全国区域的降水预报检验

(a) 24 h 降水预报评分 ETS, (b) 模式预报偏差 B

Fig. 10 The verification of rainfall forecast over China

(a) ETS for 24-h rainfall forecast, (b) Bias of modeled forecast

模式预报试验的降水检验结果。图10a是连续试验24 h降水预报评分 ETS (Equitable Threat Score),从中雨和大雨预报评分看使用秒级探空资料的预报评分明显优于其他方案,而使用分钟探空资料未显示出优势。图10b为24 h预报偏差 B 值,秒级探空使用的试验同样表现明显的优势,在小雨、中雨和大雨量级秒级探空使用后其预报偏差相比其他方案都是最小的。相比之下分钟级探空和传统探空的使用其预报偏差在各个量级上基本上是相近的。由此看出高垂直分辨率的秒级探空资料丰富的垂直信息的利用对模式降水预报评分和偏差都有显著的改进效果,而分钟级探空使用对模式降水预报未显示出很强优势。

6 结 论

本文通过分析高垂直分辨率秒级、分钟级探空的水平、垂直分布特征,以及在GRAPES 3DVAR同化预报系统中应用,个例试验比较其分析场与NCEP分析的差异及30 d连续试验的降水评分和预报偏差发现:

(1) 秒级探空资料在我国其水平分布较均匀,垂直分辨率达到8 m,最上层能到10 hPa以上。秒探空观测资料有仰角、方位及距离以便更加准确定位。

(2) 通过比较秒级探空资料与模式背景场发现,风场观测与背景场值偏差较小,故其风场观测质量较好。

(3) 比较4组试验的高度、温度和风场分析结果证实秒级探空资料的使用较其他方案在850、500 hPa等层次上分析都更接近NCEP分析,显示对分析结果改进有明显正效果。分钟级探空资料使用后的结果与秒级探空使用结果相似。同时连续试验表明:风场在200 hPa以上的高层分析中改进尤其显著,在低层其分析场与传统探空分析是一致的。这也说明高分辨率资料使用在高层分析中对系统模拟准确性更有优势。故高垂直分辨率探空资料的使用对分析初值的改进有积极意义。

(4) 分析场的改善对降水预报的影响在预报评分和预报偏差上都有显著的改进。特别是秒级探空比分钟探空对降水预报的影响,偏差明显减小,评分增加,显示出改进效果。

目前L波段秒级探空资料作为一种高垂直分

辨率资料可以在实时业务中获取,本文通过一系列试验结果显示秒级探空资料在GRAPES 3DVAR同化分析和预报中应用都起到很好的改进作用,这为高分辨率的资料的进一步的开发利用奠定了基础。由于目前GRAPES模式同化系统垂直层次仅31层,垂直分辨率较低,高分辨率的秒资料还很难完全发挥其优势,随着数值模式分辨率的提高,同化技术的进步,秒级探空资料这种含有丰富时空信息的资料将有更广泛的应用前景。

参考文献

- 卞建春,陈洪滨,吕达仁. 2004. 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. 中国科学 D 辑地球科学, 34(8): 748-756.
- 郝民,张华,陶士伟,等. 2013. 变分质量控制 在区域 GRAPES-3DVAR 中的应用研究. 高原气象, 32(1): 122-132.
- 刘君,黄江平,董佩明,等. 2013. 卫星资料循环同化应用对区域数值预报效果影响分析. 气象, 39(2): 156-165.
- 马旭林,庄照容,薛纪善,等. 2009. GRAPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展. 气象学报, 67(1): 50-60.
- 彭冲,张祖强. 2012. 上对流层/下平流层 GPS 掩星资料与我国探空湿度对比. 气象, 38(9): 1033-1041.
- 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.
- 田广元,张鹏亮. 2011. 浅谈 L 波段探空秒数据资料在人工增雨中的应用. 安徽农业科学, 39(20): 12328-12329.
- 王玺,李伟,陈永清,等. 2011. L 波段探空系统高空风计算方法探讨. 气象, 37(1): 85-91.
- 薛纪善,陈德辉,等. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京: 科学出版社, 67-81.
- 杨湘婧,徐祥德,陈宏尧,等. 2011. L 波段探空高分辨廓线中近地层信息分析及相关模型. 气象, 37(12): 1504-1510.
- 尹恒,李易,徐远波. 2012. 2011 年 7 月下旬湖北雷雨大风天气过程分析. 天气预报技术总结专刊, 4(4): 27-33.
- 于超. 2011. 2011 年 7 月大气环流和天气分析. 气象, 37(10): 1314-1319.
- 张小雯,郑永光,湛芸. 2011. 2011 年 7 月对流天气分布特征. 天气预报技术总结专刊, 3(6): 58-64.
- 郑祚芳,高华,李青春. 2013. 城市化对北京一次极端降水过程影响的数值分析. 气象, 39(3): 340-346.
- Kevin Hamilton and Robert A Vincent. 1995. High-resolution radiosonde data offer new prospects for Research. EOS, 76(49): 609-616.
- Shaun W. Bell and Marvin A. Geller. 2008. Tropopause inversion layer: Seasonal and latitudinal variations and representation in standard radiosonde data and global models. J G R, 113, D05109.