

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. 气象, 41(6):695-706.

# L 波段分钟数据在 WRF 模式中的 变分同化应用试验<sup>\*</sup>

姚 爽<sup>1</sup> 陈 敏<sup>2</sup> 王建捷<sup>3</sup>

1 中国气象科学研究院,北京 100081  
2 中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089  
3 中国气象局数值预报中心,北京 100081

**提 要:** 为探讨蕴含气球漂移信息的高垂直分辨率 L 波段分钟探空数据在同化预报中的应用及影响,在初步讨论其基本特征的基础上,采用廓线和逐点两种同化方式,开展单站、降水个例及批量分钟探空同化试验,并与常规探空同化试验对比,得到以下主要结论:分钟数据可补充常规探空无法解析的垂直信息并提供气球漂移精确定位数据;同化分钟探空可有效增加观测在分析中的权重,使分析场更接近实况,逐点较廓线同化的结果差异主要在对流层上层;同化整个预报区域的分钟数据对模式的分析和预报性能有一定影响,漂移造成的风场同化差异在 200 hPa 及我国北方高空急流位置更明显;整体而言同化分钟数据可一定程度提升模式初始场(高层风场和低层水汽场)品质,主要改善对流层高空风和大量级降水预报性能。

**关键词:** 分钟探空, 廓线, 漂移, 同化预报

**中图分类号:** P456,P412      **文献标志码:** A      **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 06. 004

## Variational Assimilation Experiment of L-Band Minute-Level Sounding Data with WRF Model

YAO Shuang<sup>1</sup> CHEN Min<sup>2</sup> WANG Jianjie<sup>3</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081  
2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089  
3 Numerical Weather Prediction Center of CMA, Beijing 100081

**Abstract:** To investigate the application and impact of L-band high vertical resolution minute-level sounding data which include balloon's accurate drifting information at each level on data assimilation and numerical prediction, basic features of these data were preliminarily analyzed in this paper. On this basis, experiment of single station, precipitation case study and batch assimilation tests of the whole simulated domain were conducted using minute-level sounding data via the two assimilating methods of profile and point-by-point, then compared with the assimilation test using conventional sounding data. It was concluded that: (1) the vertical resolution of L-band minutely sounding data can better match the vertical layers in the model. It can provide additional vertical observation information and precise location data that the conventional sounding data cannot achieve. (2) One-station assimilation test indicates that assimilating minutely sounding data can efficiently increase the weight of observations in the analysis, thus leading to the analysis field more similar to the observations, and differences of analysis field calculated by point-by-point assimilation method and profile way mainly remain in the upper troposphere. (3) The case study and batch

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430100)资助  
2014 年 4 月 30 日收稿; 2015 年 3 月 31 日收修定稿  
第一作者:姚爽,主要从事区域模式资料同化研究. Email:shuangy96@163.com  
通信作者:陈敏,主要从事数值预报方向研究. Email:mchen@ium.cn

tests assimilating the minutely sounding data in the whole forecast region can affect the final analysis and forecast accuracy, and the difference of wind assimilation caused by the balloon's advection drift mainly exists in the positions at 200 hPa, and the upper-level jet stream over northern China. (4) The initial field in the model is overall improved by assimilating L-band minutly sounding data, which mainly positively affect the forecast of winds in the upper troposphere and intense precipitation in larger scales.

**Key words:** minute-level sounding, profile, drift, data assimilation and prediction

## 引言

一直以来,尽管基于卫星和 GPS 等各种观测手段获得的大气观测数据越来越多,探空观测在气象研究中的关键角色仍然无法被取代。在全球及区域数值预报的科学研究及业务同化应用中,无线电探空观测因能够完整描述大气三维结构而成为极其重要的陆地大气信息来源(Faccani et al, 2009),是用以改善模式初始场质量、提高模式预报水平不可或缺的最为基础的资料之一。研究表明在观测资料稀缺地区,加入适应性观测外场试验加密的探空观测,可减少初始场的不确定性,改善同化分析结果(Agustí-Panareda et al, 2010; Amstrup et al, 1999)。张朝林等(2005)利用观测系统数值试验,对“00.7”北京特大暴雨过程中各种气象监测资料的同化作用进行了评估,提出在三维变分同化方案下,常规探空是对改进预报结果影响最大的资料之一。对探空观测资料在西南暴雨中的同化试验,张利红等(2009)指出同化探空资料能够改善背景场质量,且同化资料条数愈多,对背景场的改善作用愈突出。探空资料在西南区域新版数值预报业务系统 BJ-RUC 中的应用效果研究(张利红等,2013)显示,其垂直信息丰富,对初猜场各层误差减小均有贡献,单独同化试验表明探空资料的同化有助于降水预报改进。此外,近年来探空资料在诊断大气垂直温度结构、研究行星边界层大尺度长期变化特征等方面的应用也受到了越来越多的关注(de la Torre et al, 1997; Durre et al, 2008; 陈龙虎等, 2009)。

长期以来,对探空观测数据的收集存档普遍局限于规定等压面层及特性层,相应的数值预报同化应用也仅围绕这些特定层次上的探空观测展开,因此在目前探空观测资料的同化应用中不可避免地存在下列问题:

(1) 常规探空观测资料的垂直分辨率小于中尺度模式垂直分辨率。随着计算能力的不断飞跃,数

值预报在垂直方向的分辨率不断提升,例如通常在 2000 m 以下大气边界层内中尺度模式垂直层次往往可以达到十几层,而相应业务探空观测资料常规等压面层仅有 925 和 850 hPa 两层,加上特性层也不过 5、6 层左右,其在垂直方向上提供的信息较为有限。

(2) 探空资料的业务同化应用未考虑气球水平漂移信息。无线电探空气球以约  $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  的升速上升,上升过程大约持续 90 min,气球可上升至 30~40 km 高度。在此过程中,气球受高空气流影响发生水平漂移而偏离地面测站上空,一般偏移距离为几十千米,最大可超过 100 km 甚至可达 200 km(刘红亚等, 2005; 陈哲, 2010)。因此随着数值预报模式分辨率的提高,气球的水平漂移距离实际上已经大大超过了模式网格距。针对这一问题,国内学者已开展了一定研究。如刘红亚等(2005)、嵇磊等(2008)的研究均指出探空气球随高度的漂移对高分辨率模式有影响,位置订正前后分析场差异低层小、高层大,位置订正可在一定程度上提高初始场质量,改善降水预报效果。但目前业务上的同化分析并没有考虑探空气球水平漂移信息,而是将探空观测视为测站正上空的垂直廓线信息进行同化,故在探空气球发生明显漂移的情况下,模式吸收的观测信息实际上已经存在水平位置误差,对中小尺度天气系统来说这一影响可能更为突出。

对包含精确空间位置信息的高垂直分辨率探空数据开展同化应用为解决上述问题提供了一个途径。数值气候模拟、资料同化及数值天气预报分析均可受益于高垂直分辨率探空数据的获取和应用(Hamilton et al, 1995),观测系统越密,它对分析精确度的贡献越大,这个事实在水平和垂直方向都成立(Kalnay, 2005)。

我国于 2011 年全面完成由 59-701 型探空系统向 L 波段高空气象探测系统的更新换代,共 120 站,该系统可获取时空密度更大、精度更高的秒级和分钟级采样频次的探空观测,其在天气学研究中发

挥了很大的作用(苑跃等,2014;杨湘婧等,2011)。刘梦娟等(2014)利用 L 波段探空秒数据垂直分辨率、精度均较高的特点,以其为实况,对 BJ-RUC 系统分析和预报边界层性能进行了初步评估。赵桂香等(2013)将 L 波段秒探空用于研究大暴雨过程的云团及环境场特征,以解释不同云团形成的环境场差异,提炼更多的暴雨中尺度信息和先兆信号。蔡森等(2014)利用 L 波段探空资料,通过相对湿度阈值法判断云区位置,得到一套适合于 L 波段秒探空数据的云垂直结构判别方法。石春娥等(2014)利用高分辨率探空资料,从大气层结及近地层输送条件等方面探讨了 2013 年 1 月安徽霾天气频发的原因。但是目前针对高分辨率探空观测的同化应用研究仍然有限,尤其是秒探空的应用,因其采样时间短、具有极高的垂直分辨率,在同化应用时需要通过稀疏化手段来解决观测之间垂直相关过大的问题;此外在资料的代表性及质量控制方面仍然需要继续深入研究。最近郝民等(2014)形成了一种稀疏化方案,即将秒级和分钟探空观测插值到模式面后以廓线形式进行同化,取得了较好的效果。但是仍然存在问题有待考虑,一是插值过程本身会形成误差,其二对于分钟探空观测而言,其垂直分辨率几乎与当前的区域模式相当,因此可以尝试在无需稀疏化的条件下开展同化应用。此外,研究中并没有考虑气球漂移对同化分析的影响。

结合当前模式垂直层次分布,相对于以往探空数据的应用研究,L 波段分钟探空数据具备垂直分辨率高、包含探空气球水平漂移信息等优势。因此本文将尝试采用不同的同化分析方案,探讨 L 波段分钟探空数据在同化中的恰当应用,以期充分发挥其垂直加密及加入气球水平漂移信息的优势,有效改善同化分析、预报效果,并为其后进一步开展秒级探空观测的同化应用积累经验。

1 L 波段分钟探空观测资料的特征

L 波段分钟探空由 L 波段秒级探空在时间上进行稀疏化后形成,同时达到了垂直方向上观测空间稀疏化的目的,但其垂直分辨率仍然高于传统气压层探空观测。分钟探空不仅包含了常规气象要素观测值,而且包含了探空气球上升过程中精确的定位信息。

对 2013 年 7 月 1 日 00 时至 31 日 12 时(UTC)每日 00 和 12 时,共 62 时次的常规及分钟探空数据

进行统计,分析 L 波段分钟探空资料相对于常规探空资料的垂直加密特征及气球漂移特征。

垂直层次方面,50 hPa 以下分钟探空数据的温度、相对湿度、风三要素垂直层数全场平均约为 56 层,而常规探空各要素垂直平均约为 20 层,前者明显多于后者。统计两套资料三种要素垂直层数与不同层次间的差异,可知分钟探空较常规探空垂直层次的加密主要表现在 500 hPa 以上,且加密的层数随高度增加而增大。气球漂移特征方面,以 35°N 为界,统计中国南、北方 50 hPa 以下探空气球夏季漂移特征(如图 1 所示)。其中分别利用纬偏、经偏指示气球南北、东西向漂移。由图 1 知,气球在 850 hPa 以上开始表现出一定漂移特征。我国北方地区,经向漂移明显,500 hPa 以上,经度偏差迅速增加,200 hPa 达到 0.3°,100 hPa 以上可超过 0.5°,而纬向漂移较小,这与我国北方地区夏季对流层中盛行西风,最大风速中心约位于 40°N、200 hPa 高度附近有关。而南方地区,经向漂移与纬向漂移平均而言均较弱,这与我国南方地区,各层风速普遍较北方小,且受对流层中层副热带高压及对流层上层南亚高压两个盛行风向不同的系统支配,使得气球漂移路经常出现折转有关,因此由气球漂移导致的经纬偏差较小。

由此可知,相对于传统常规探空,L 波段分钟探空观测垂直层次更加密集,且包含的气球漂移信息具有较好的指示意义,在一定程度上不容忽视。

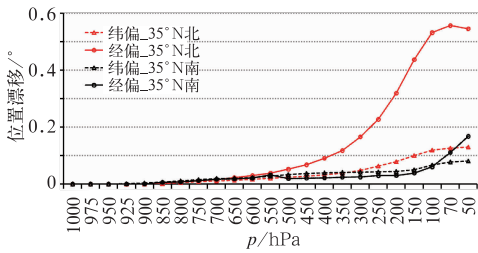


图 1 探空气球位置漂移随高度变化  
Fig. 1 Changes of drifting location of sounding balloon with height

2 L 波段分钟探空观测的三维变分同化试验

2.1 试验方案

L 波段分钟观测资料一方面仍然可以与常规探

空一样,视为探空测站正上方的垂直廓线进行同化,但较常规探空可以引入更多垂直方向上的观测信息;另一方面,由于 L 波段探空观测系统包含了探空气球上升过程中相对于测站地理位置的水平经纬度漂移信息,且精确到了  $0.01^{\circ}$ ,因此可以将每个空间位置上的分钟观测均看作一个独立的探空站观测进行同化,这样不仅纳入垂直方向上更为密集的观测信息,而且相对于廓线方式,能够在正确空间位置、而不是近似的测站地理位置反映实际观测信息。因此设计同化方案如下。

表 1 试验方案  
Table 1 Experiment scheme

| 试验名称 | 同化资料 | 同化方式 | 同化要素    |
|------|------|------|---------|
| CONV | 常规探空 | 廓线同化 | U/V/T/Q |
| PROF | 分钟探空 | 廓线同化 |         |
| INDV | 分钟探空 | 逐点同化 |         |

本文采用中国气象局北京城市气象研究所基于 WRF 模式和 WRFDA 资料同化系统研发的 BJRUCv2.0 系统(范水勇等,2013;陈敏等,2011)的 9 km 区域进行试验,该区域水平网格点数分别为  $400 \times 649$ ,垂直方向 38 层。本文采用 NCEP GFS 的 12 h 预报场作为模式同化初猜场进行资料同化,然后进行 24 h 预报。

2.2 单个探空站的同化试验

首先对 2013 年 7 月 1 日 00 时单个探空站(北京观象台,站号:54511)按上述三种不同方案进行同化试验,以获得对考虑垂直层次加密及探空气球漂移情况的探空观测同化效果的初步认识。

试验用以对比的常规探空观测来自当时业务用同化观测数据集,从地面到 50 hPa 模式层顶,其温度、湿度和风分别有 12、9、11 个观测,除常规气压层和地面层外,仅有一个特性层观测位于 134 hPa。而分钟探空温、湿、风三要素分别有 63 层,远高于常规探空资料的垂直密度。此外,由图 2 所示的 54511 站分钟观测空间位置变化可知,探空气球一直维持向下风方向漂移的趋势,且因通常纬向风  $U$  分量大于经向风  $V$  分量,气球的東西向偏移最远漂移了 0.6 个经度,明显大于南北向偏移。试验中所有层次上的观测均被同化吸收形成了有效的分析增量。

图 3 给出 54511 站所在位置各预报要素的同化初猜场(bckg)、各试验同化后形成的模式层分析场

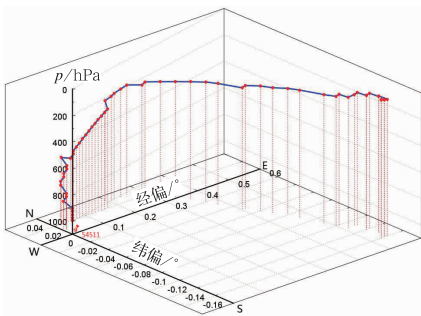


图 2 2013 年 7 月 1 日 00 时北京观象台站(站号 54511)逐分钟探空观测空间位置  
Fig. 2 Spacial location of minutely sounding observations of Beijing Station (ID 54511) at 00:00 UTC 1 July 2013

(ana)以及常规和分钟观测(obs)的垂直廓线分布。可以看出,分钟探空比常规探空在垂直方向上分布更为密集,且与模式垂直层次匹配均匀。

分析各个要素的垂直分布可知, $U$  分量在 400 ~ 925 hPa 之间的模式同化初猜场明显较探空实况偏弱,而常规探空仅能在有限的气压层(500、700 和 850 hPa)上反映该特征(图 3a),因此同化分钟探空的方案在 500 ~ 800 hPa 层之间的分析增量最终较控制试验 CONV 方案大  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右(图 4a),即分钟探空同化后的分析场具有更强的西风分量,更加接近于观测实况。对于  $V$  分量(图 3b),分钟探空亦揭示了更多常规探空无法反映的关键变化信息,例如在 600 和 350 hPa 附近分别为弱北风和极值达  $7.96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的南风。常规探空的  $V$  分量从 400 hPa 的弱北风直接转为 300 hPa 的偏南风,但分钟探空在两层之间的 6 个观测则揭示了更多风场垂直变化的细节,初猜场在这两个气压层之间均为北风分量,因此 PROF 比 CONV 形成了更大的分析增量(图 4b),600 hPa 层也有类似的情形。

分钟探空反映的温湿度垂直变化基本趋势与常规探空是一致的(图 3c,3d),两种探空的有效观测差异主要表现在 850 hPa 以下,因此同化这两种探空观测形成的温湿度(特别是湿度)分析增量差异在 850 hPa 以下层次较为明显(图 4c,4d)。从这个例子来看,较之同化常规探空,同化分钟探空后 54511 测站的边界层及对流层低层更为暖湿。

由之可见,同化垂直层次更为密集的分钟探空确实较常规探空能够更大程度地修正模式初猜场,使之更加接近实际观测。与此同时,对比图 3~4 中

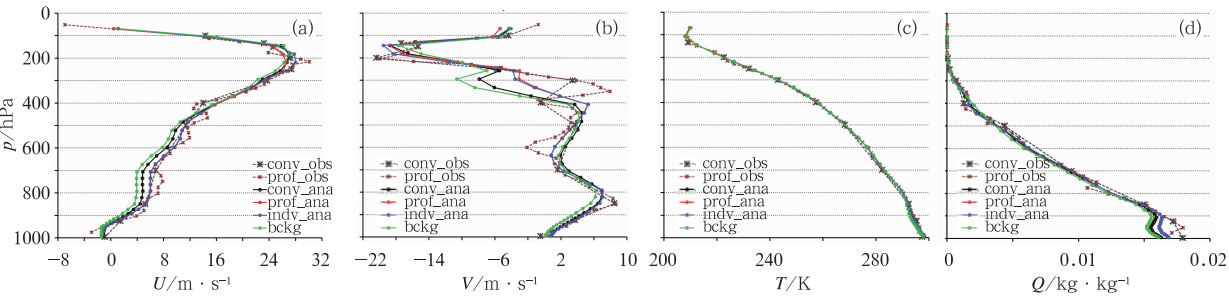


图 3 2013 年 7 月 1 日 00 时 54511 站所在位置的(a)U、(b)V、(c)T 和(d)Q 的同化初猜场(bckg)、CONV、PROF 和 INDV 三个试验同化后形成的模式层分析(conv\_ana, prof\_ana, indv\_ana)以及常规和分钟观测(conv\_obs, prof\_obs)垂直廓线分布

Fig. 3 Vertical distributions of background (bckg), analysis of CONV/PROF/INDV at model levels (conv\_ana, prof\_ana, indv\_ana) as well as conventional and minutely observations (conv\_obs, prof\_obs) for (a) U, (b) V, (c) T, (d) Q at Beijing Station (ID 54511), 00:00 UTC 1 July 2013

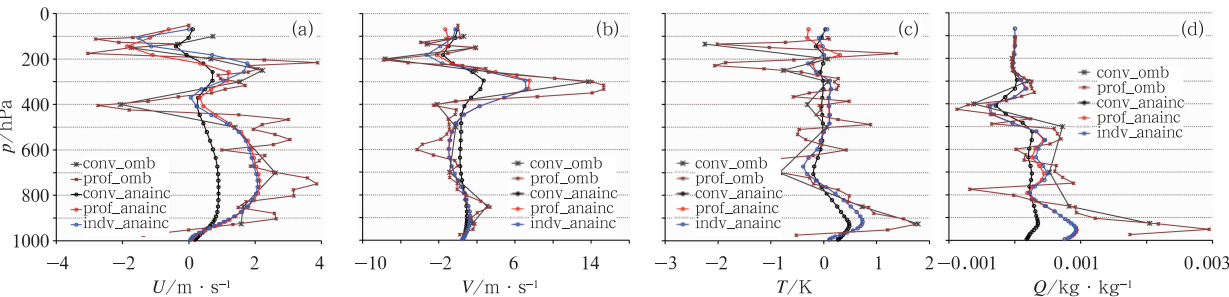


图 4 2013 年 7 月 1 日 00 时 54511 站所在位置的(a)U、(b)V、(c)T 和(d)Q 经 CONV、PROF 和 INDV 三个试验同化后形成的模式层分析增量(conv\_anainc, prof\_anainc, indv\_anainc)以及常规和分钟观测新息向量(conv\_omb, prof\_omb)的垂直廓线分布

Fig. 4 Vertical distributions of analysis increments achieved from CONV/PROF/INDV (conv\_anainc, prof\_anainc, indv\_anainc) as well as conventional and minutely observation innovations (conv\_omb, prof\_omb) for (a) U, (b) V, (c) T, (d) Q at Beijing Station (ID 54511), 00:00 UTC 1 July 2013

给出的以两种不同方式同化分钟探空得到的分析和分析增量垂直廓线,可以看出,INDV 试验与 PROF 试验到 300 hPa 层以上开始有明显差异,而 300 hPa 层以下几乎完全一致,反映了在同化过程中探空气球水平漂移位置对同化结果的影响在对流层高层才会变得显著。

分析三种同化方案的差异,可以客观认定探空观测在垂直层次上加密、考虑探空气球精确位置对垂直方向上同化结果的独立影响,分别采用 PROF-CONV、INDV-PROF 和 INDV-CONV 来表示。

图 5 给出了三种同化方案形成的 U、V、T 要素沿探空站所在位置东西方向垂直剖面上的分析增量差值,PROF-CONV 表示以相同廓线方式同化垂直层次更密的分钟探空和常规探空后分析增量的差异,反映了探空观测垂直加密的作用。如图 5a 所

示,PROF 在 925~400 hPa 之间形成了更大的 U 分析增量,而在 200~100 hPa 层内 U 分析增量小于 CONV,且在水平方向的传播尺度可达 500 km。如前文所述,这是由于分钟探空比常规探空能够在更为密集的垂直层次上反映 U 观测值在 400~925 hPa 之间大于初猜场、在 100~200 hPa 之间小于初猜场的特征。PROF-CONV 的 V 分量在 350 和 600 hPa 分别出现了正负分析增量差极值中心(图 5d),这与前文所述的 V 的 OMB 和分析增量(图 4b)的分布一致。但是探空观测在垂直方向的加密并未对温度同化结果形成大的影响(图 5g)。

INDV-PROF 反映了考虑探空气球水平漂移后造成的同化结果差异。从图 2 来看,因为探空气球在 300 hPa 以上高度向下游的水平漂移更为显著,可以预计这种影响主要集中在模式上层。由图 5e

知,探空气球漂移位置对同化结果的影响主要体现在  $V$  分量上,其分析增量差异在 200 hPa 形成极值中心,反映了在高层水平方向上下游  $V$  分量具有更为明显的局地变化特征,对  $U$  分量和温度场的同化效果并没有形成显著影响(图 5b,5h)。

INDV-CONV 表现了以逐点方式同化分钟探空与同化常规探空的分析结果差异,反映了在同化过程中同时考虑垂直观测加密和观测实际空间位置

的综合影响。通过对比发现,其中起到主导作用的仍然是垂直观测的加密,仅  $V$  分量可以看出探空气球漂移对高层同化结果的影响(图 5f)。

因此,仅根据本例中单站探空观测的同化结果知,相对于常规探空观测,垂直层次上更为密集的分钟探空观测能够补充的主要是风场信息。而两种探空的温湿度观测垂直廓线差异主要集中在对流层低层(图 3c,3d),主要的分析增量差异也低于 700 hPa。

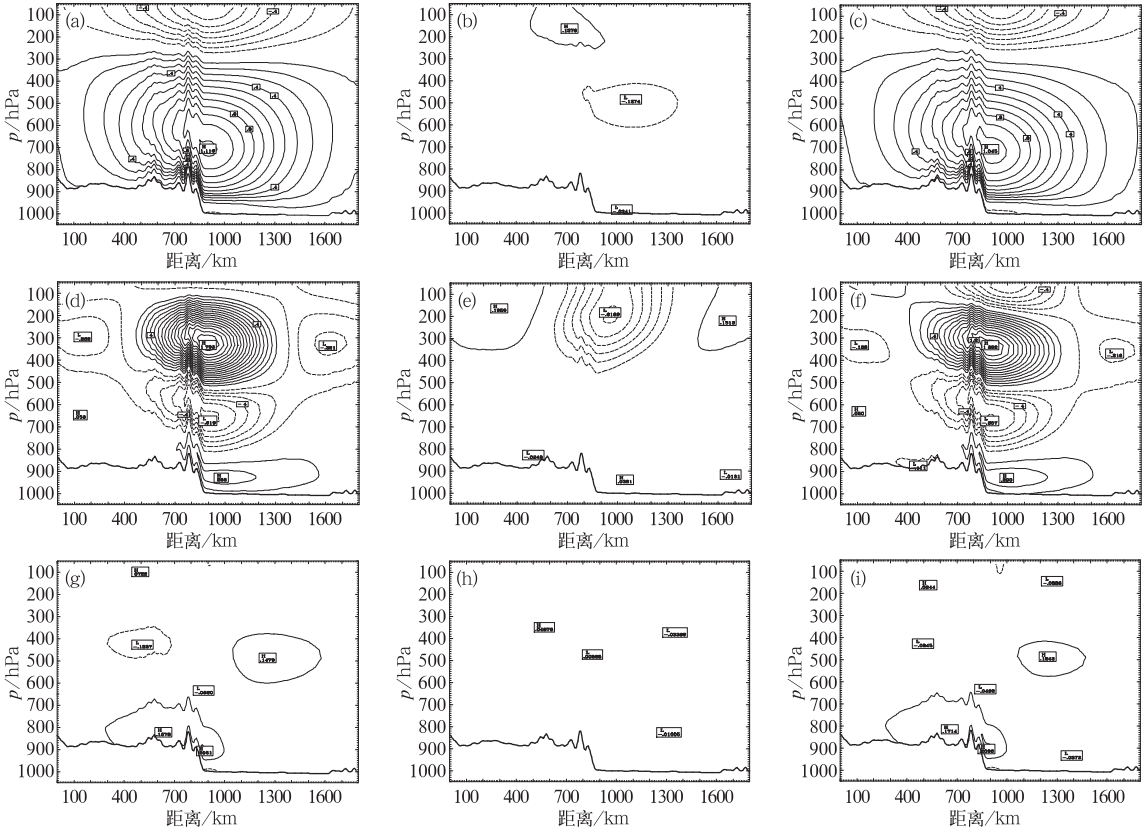


图 5 三种同化方案形成的  $U$ (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $V$ (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和  $T$ (单位:  $\text{K}$ ) 在沿 54511 站所在纬度 ( $39.8^\circ\text{N}$ ) 自西向东 1800 km (900 km 处为 54511 站所在位置, 细实线为地形) 垂直剖面上的分析增量分布之差 (a, d, g) PROF-CONV; (b, e, h) INDV-PROF; (c, f, i) INDV-CONV, 其中 (a, b, c) 为  $U$  (等值线间隔:  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 虚线代表负值); (d, e, f) 为  $V$  (等值线间隔:  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 虚线代表负值); (g, h, i) 为  $T$  (等值线间隔:  $0.1 \text{ K}$ , 虚线代表负值)

Fig. 5 Vertical distribution of differences of analysis increments along latitudinal direction for (a, b, c)  $U$ , (d, e, f)  $V$ , and (g, h, i)  $T$  component achieved from the three assimilation schemes at 54511 ( $39.8^\circ\text{N}$ ) (a, d, g) PROF-CONV, (b, e, h) INDV-PROF, (c, f, i) INDV-CONV (Contour interval is 0.1, dashed line represents negative value)

2.3 个例及连续试验

选取 2013 年 7 月 1—20 日连续 20 d, 在 BJRUCv2.0 系统的 9 km 区域内采用上述三种方案开展连续模拟同化预报试验。三个试验仅同化 L 波段分钟及常规探空资料, 预报范围内(图 6 扇形区

域)可同化的测站数约为 107 个(图 6 所有彩色站点)。通过三种试验方案的对比, 定量分析分钟探空更为丰富的垂直观测信息、及精确的探空气球漂移位置信息对模式同化和预报性能的影响。

2.3.1 个例试验分析

仍然以 2013 年 7 月 1 日 00 时起始的预报为

例,较为细致地对比分钟探空观测与常规探空观测的同化效果。

首先分析个例试验中全国各站点同化的业务常规探空及分钟探空观测层次特征。对于分钟探空数据, $U$ 、 $V$ 、 $T$ 、 $Q$  四要素同化层数均为 53 层左右,而常规探空  $U$ 、 $V$  约 31 层, $T$  约 23 层, $Q$  约 19 层。反映出个例试验中,模式区域内各站点常规探空数据虽同时包含常规气压层及特性层,但其各要素可同化的垂直观测数仍然少于垂直密度较高的分钟数据。分析显示,总体而言,分钟数据较常规探空加密的层次数在高层更多,相应的高层可同化层数亦更多,特别是 300~100 hPa 各要素可同化层数差异较其他层次显著。图 6 给出了该个例全国分钟探空与常规探空  $U$ 、 $V$ 、 $T$ 、 $Q$  变量同化垂直层次差异的空间分布情况,对于  $U$ 、 $V$  变量(图 6a),绝大多数站点分

钟探空较常规探空多 12 层以上,特别是我国东部及北方地区,相差可超过 18 层。 $T$  变量(图 6b),多数站点分钟探空较常规探空数据多 16 层以上,其中很大一部分多于 24 层。对于  $Q$  变量(图 6c),主要对比 500 hPa 以下分钟数据与常规数据的差异,发现多数相差 10 层到 20 层。诊断三种试验方案的风场、温湿场分析增量情况,发现各方案形成的分析增量总体分布非常相似,但分析增量的大小仍有不同(图略),这从一个侧面反映出,作为同源数据,常规、分钟探空观测层次上的差异不会带来气象形势场分析上的明显差别,但因分钟数据垂直层次信息更丰富,故两种探空同化后的分析增量在整个模式预报区域内仍然有一定程度的差异。结合图 7a、7b 和图 6 可以看出,常规与分钟探空同化层数差异较大区域,通常分析增量差别也较清楚。

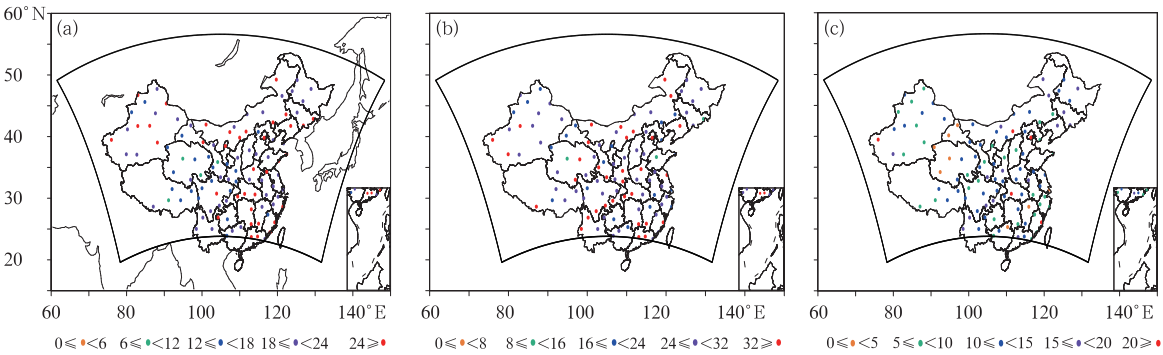


图 6 2013 年 7 月 1 日 00 时预报区域(扇形区)站点分布及各站分钟探空与常规探空同化垂直观测层数差异分布  
(a)  $U/V$ , (b)  $T$ , (c)  $Q$

Fig. 6 Distribution of sounding stations in prediction areas (fan section) and differences of vertical observing levels between minutely sounding and conventional sounding assimilations at 00:00 UTC 1 July 2013  
(a)  $U/V$ , (b)  $T$ , (c)  $Q$

进一步细致讨论各试验方案间风、温、湿要素分析增量差异。如图 7a、7b 所示,其中 700 hPa 层上 PROF-CONV 的风矢量差表明同化分钟探空后加强了华北及东北南部的西风分量,正相当位温差的分布则表明 PROF 低层具有比 CONV 更优的温湿条件;200 hPa 层上 PROF 较 CONV 形成的风场分析增量差别在影响范围和幅度上均较低层更为显著,尤其在新疆南部地区,PROF 试验实际减弱了该地区高空急流的强度。分析 INDV-PROF 的结果(图 7c、7d)可以发现,700 hPa 层上 INDV 和 PROF 的分析增量有极为微小的差别;但是到 200 hPa 高

度,尤其在我国北方地区 200 hPa 层高空急流所处位置,气球水平漂移造成的风场分析增量差别变得显著,特别在东北地区,INDV 和 PROF 的风矢量差最大可超过  $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,这与垂直加密观测的影响达到了类似的程度。与 CONV 相比,INDV 试验实际综合了上述两个方面的影响,包括通过同化垂直方向更密的分钟探空进一步提升 700 hPa 暖湿条件并减弱新疆地区 200 hPa 西风急流强度和考虑气球漂移加强 200 hPa 层东北地区风场(图 7e、7f)。

利用 fnl 资料对 2013 年 7 月 1 日 00 时 700 和 200 hPa 位势高度场及风场(图 8)进行分析,可知

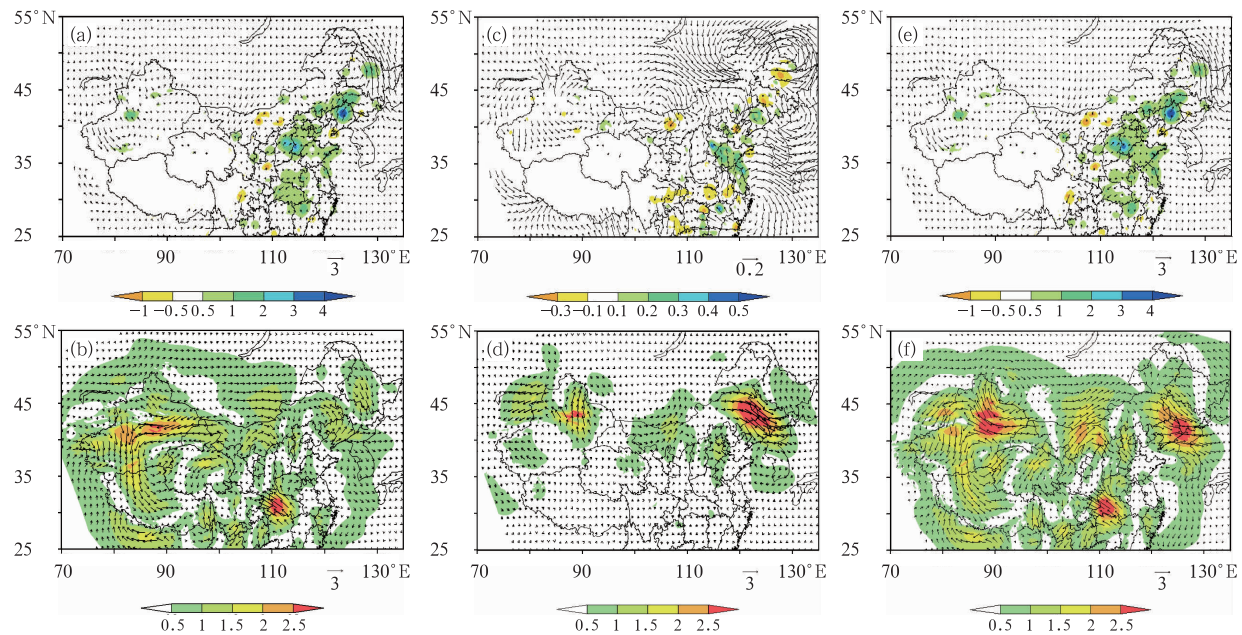


图 7 2013 年 7 月 1 日 00 时三个试验分析结果的差异:(a, c, e) 700 hPa 水平风矢量差和相当位温差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ),(b, d, f) 200 hPa 水平风矢量差和风速差(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a, b) PROF-CONV, (c, d) INDV-PROF, (e, f) INDV-CONV

Fig. 7 Differences of analysis results achieved from 3 experiments at 00:00 UTC 1 July 2013: (a, c, e) difference of horizontal wind vector and equivalent potential temperature at 700 hPa (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ); (b, d, f) difference of horizontal wind vector and wind speed at 200 hPa (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a, b) PROF-CONV, (c, d) INDV-PROF, (e, f) INDV-CONV

700 hPa 我国东北地区有一气旋性低涡存在, 东北南部及华北地区位于低涡底部西风气流中, 200 hPa 我国北方地区处于较一致的平直西风急流区。结合上述分析, 可以看出本个例试验中, 在主要关键天气系统所在区域, 存在分钟探空数据及常规探空数据同化分析结果的差异, 可进一步探讨其对未来预报效果的影响。

就降水预报而言, 整体上三个方案形成的预报结果非常相似, 特别是 PROF 和 INDV。但分析  $t =$

12~24 的 12 h 累积降水预报结果(图 9)可知, 虽然同化常规探空的 CONV 及同化分钟探空的 PROF (INDV, 图略) 均可较准确地预报出辽宁地区两条大雨带, 且两者降水量级预报也基本一致, 但仍有细微差别。特别是后者较前者可以更好地预报出河北中部地区较强的降水中心(图 9c, 红框区), 更接近实况降水。

可以通过对同化结果的分析来尝试寻找降水预报发生差异的原因。由于 PROF 和 INDV 的降水

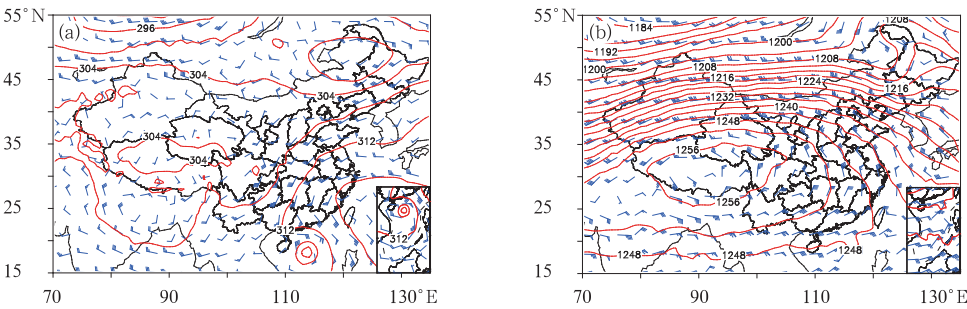


图 8 2013 年 7 月 1 日 00 时(a)700 hPa、(b)200 hPa 高空风场及位势高度场  
Fig. 8 Upper air winds and geopotential height fields at 00:00 UTC 1 July 2013  
(a) 700 hPa, (b) 200 hPa

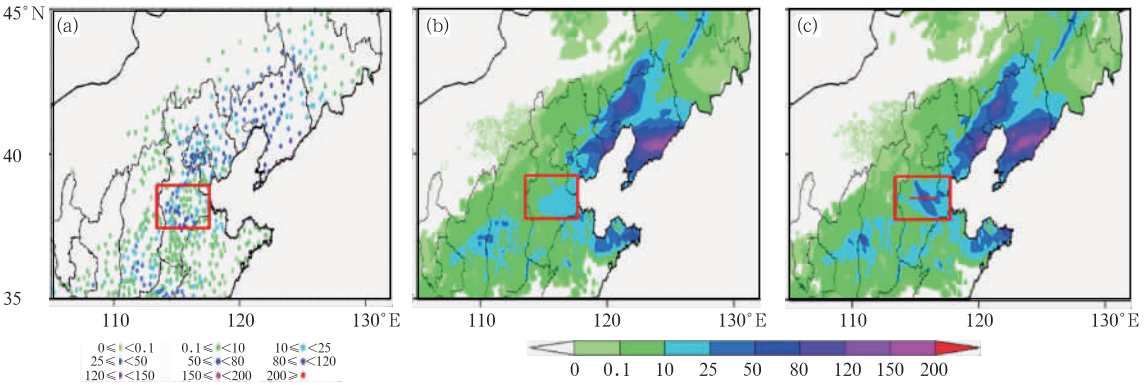


图 9 (a) 站点观测、(b) CONV 预报、(c) PROF 预报的 2013 年 7 月 1 日 12 时至 2 日 00 时的 12 h 累积降水(单位: mm)

Fig. 9 12 h accumulated precipitation by (a) station observation, (b) CONV forecast, and (c) prediction of PROF during 12:00 UTC 1–00:00 UTC 2 July 2013 (unit: mm)

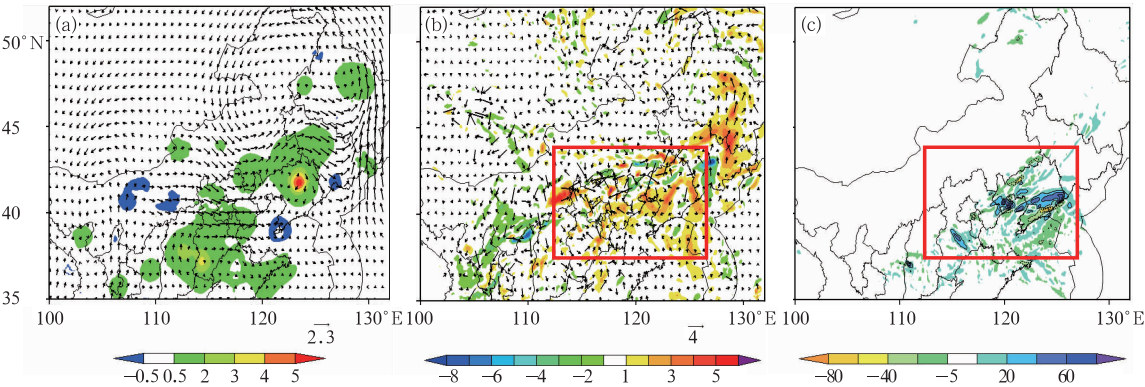


图 10 PROF 与 CONV 方案(a) $t=00$  时(即 2013 年 7 月 1 日 00 时)的 500 hPa 风场矢量差和 700 hPa 相当位温差; (b) $t=12$  时(相当于 2013 年 7 月 1 日 12 时)预报的 700 hPa 风场矢量差和 700 hPa 相当位温差; (c) $t=12\sim 24$  时预报的 12 h 累积降水量差(相当于 2013 年 7 月 1 日 12 时至 7 月 2 日 00 时)

Fig. 10 (a) 500 hPa wind vector difference and 700 hPa equivalent potential temperature difference between PROF and CONV schemes at 00:00 UTC 1 July 2013; (b) 700 hPa wind vector difference and equivalent potential temperature difference at 12:00 UTC 1 July 2013; and (c) 12 h accumulated precipitation difference during 12:00 UTC 1–00:00 UTC 2 July 2013

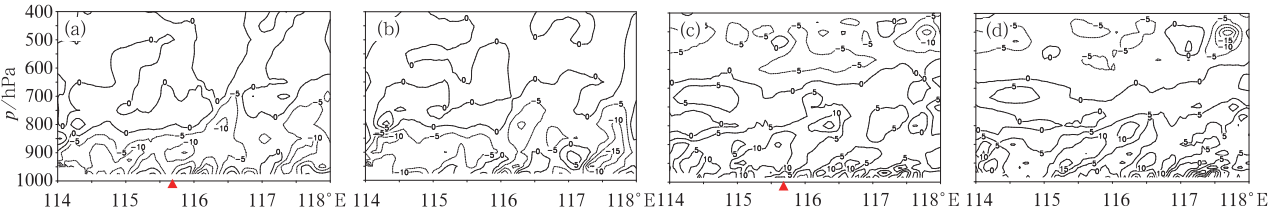


图 11 PROF(a, c)与 CONV(b, d)方案  $t=12$  时,

2013 年 7 月 1 日 12 时(a, b)水汽通量散度,(c, d)涡度纬向垂直分布

Fig. 11 Vertical distribution of (a, b) divergence of moisture flux and (c, d)

vorticity along zonal direction at  $t=12$  h (a, c) PROF and (b, d) CONV at 12:00 UTC 1 July 2013

预报结果几乎一致,这里仅考虑 PROF 和 CONV 试验的差别。图 10a 为 PROF 和 CONV 试验于分析时次的 700 hPa 层相当位温差和 500 hPa 风矢量差,其中,PROF 试验同化后形成的 500 hPa 风场在华北、东北上游地区具有比 CONV 更强的气旋式增量,预示着 PROF 方案形成了更深的高空槽,在其

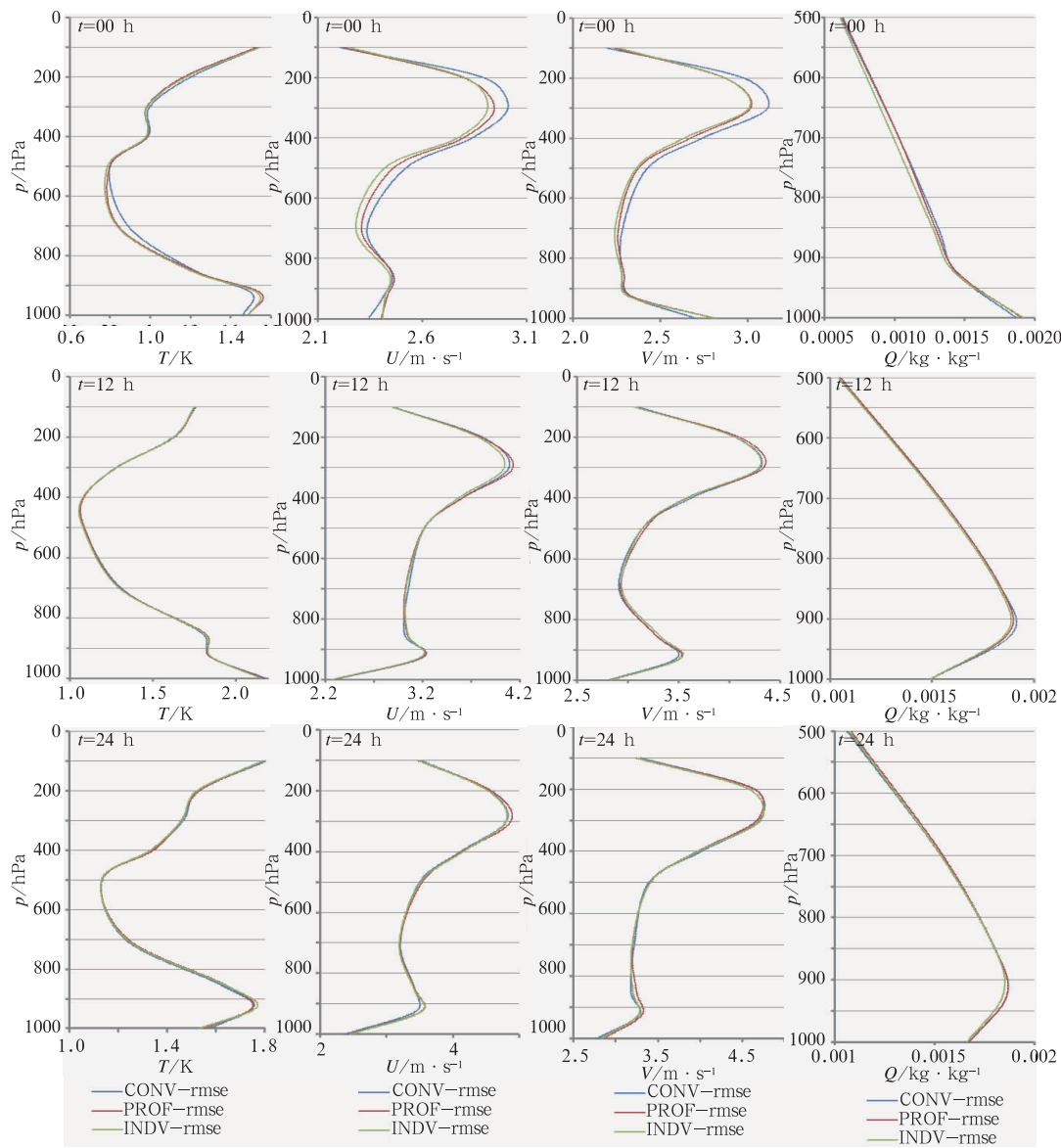


图 12 三个试验在 2013 年 7 月 1—20 日 00 UTC 的  $t=00$  时、 $t=12$  时和  $t=24$  时预报的高空要素均方根误差

Fig. 12 Vertical distribution of  $T/U/V/Q$  RMSE from 3 experiments during 1–20 July 2013

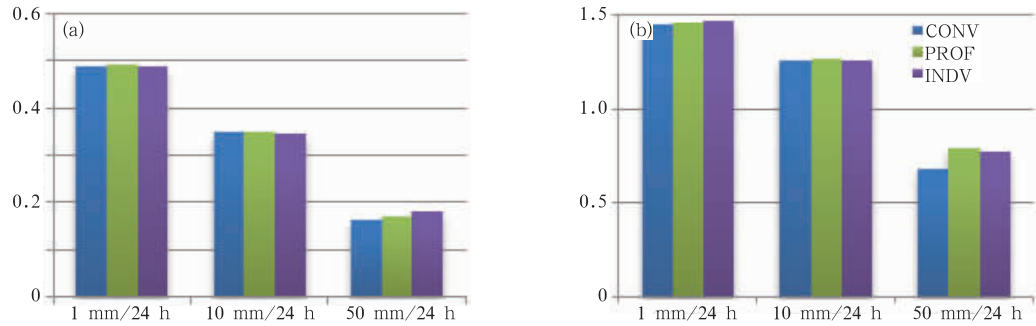


图 13 三个试验在 2013 年 7 月 1—20 日 00 时起始预报的 24 h 累积降水 (a) TS, (b) BIAS 评分

Fig. 13 (a) TS and (b) BIAS skill score of 24 h accumulated precipitation for the 3 experiments carried out at 00:00 UTC 1–20 July 2013

向下游移动的过程中将在动力上更有利于降水发生;而700 hPa高度相当位温的正分析增量差值表明PROF较CONV试验在相应地区具有更为暖湿的初始条件。积分12 h后PROF-CONV的700 hPa风场在北京以南的华北中部地区为气旋式辐合,并在华北、东北地区为正的相当位温差(图10b),有利于PROF试验较CONV试验在上述地区形成更强的降水(图10c),与实况更为一致。

同时,从积分12 h后,PROF与CONV方案沿38.2°N附近(38.0°~38.5°N纬度平均,图9c短红线示意)的水汽通量散度及涡度纬向垂直剖面分布(图11)可以看出,与图9红框中标注的降水区对应,于114°~116.5°E范围,PROF与CONV方案的对流层低层均表现为水汽辐合区及正涡度区。但在河北中部强降水中心附近(图11中箭头所指位置),PROF方案相对于CONV方案,具有更强更明显的水汽辐合中心及正涡度中心。由此可知,PROF方案在细节上具有更有利于强降水产生的水汽及动力条件。

### 2.3.2 批量试验的预报性能评估检验

采用上述方案,对2013年7月1—20日开展批量同化和预报试验,并对结果进行高空要素和降水预报客观检验。高空和降水检验所用实况分别为预报区域内所有探空站(约160个)常规气压层要素观测和常规地面站24 h累积降水观测。

对分析时次( $t=0$ 时)、 $t=12$ 时和 $t=24$ 时三个时次的高空要素检验结果如图12所示,可知同化了分钟观测的INDV和PROF试验在900 hPa以上分析效果优于CONV试验,其中INDV最优,PROF其次,对于风的分析改善尤为明显,但925 hPa以下则略差;其后的INDV和PROF预报较CONV的优势逐渐不明显,仅改善了300~200 hPa高度层上风的预报效果。另外由以预报区域内2000个地面站24 h累积降水为实况的降水检验结果可知,整体降水性能变化不大,但是对于暴雨以上级别(50 mm/24 h)的降水,同化更高垂直分辨率的分钟探空数据具有正效果(图13)。

## 3 结论和讨论

本文首先对L波段分钟级别探空数据的基本特征进行了分析,基于此结果分别采用廓线和逐点方式开展分钟观测数据在模式中的同化应用,并与

仅同化常规探空观测的试验进行对比,得到如下初步结论:

(1) L波段分钟探空观测作为秒级探空时间上的稀疏化,相应地在垂直方向上也实现了稀疏化,其垂直分辨率可高于常规气压层探空观测约20层,且较常规探空加密的层数随高度增加而增多,并且与华北区域快速更新同化循环预报系统模式层有较好的匹配,在垂直方向上能够补充常规探空无法解析的观测信息。

(2) 探空气球在升空过程中随风向下风方漂移,通过L波段分钟探空观测中包含的逐点空间定位信息,可以了解探空观测的漂移特征:我国北方地区,经向漂移明显,500 hPa以上,经度偏差迅速增加,200 hPa达到0.3°,100 hPa以上可超过0.5°,而纬向漂移较小;南方地区,经向漂移与纬向漂移平均而言均较弱。

(3) 本文采用两种方法开展L波段分钟级探空观测同化:一是通常采用的垂直廓线方式;二是将逐个空间位置上的探空记录作为独立观测进行同化。单个测站的同化结果表明,以廓线方式同化分钟探空观测,其更丰富的垂直观测信息可有效增加观测在分析中的权重,形成更接近观测的分析场;逐点同化方式较廓线方式同化结果的差异主要表现在对流层上层;分钟观测较常规观测的同化结果差异主要表现在风场,而温湿场的差异仅在对流层低层有所反映。

(4) 对降水个例的同化结果进行分析可知,采用廓线或逐点方式同化分钟探空后的大尺度形势场及降水预报结果与同化常规探空是类似的,但也在整个模式预报区域内形成了可分辨的影响。逐点同化分钟探空表明气球水平漂移造成的风场同化差异在200 hPa以及我国北方地区高空急流位置更为明显。分钟探空与常规探空同化结果差异主要分布在二者可同化垂直观测层数差异较大的地区,分钟探空补充的额外观测信息能够部分影响到其后的降水预报。

(5) 20天连续试验结果表明,逐点同化分钟观测具有最好的分析性能,然而在其后的常规气象要素预报中初始场优势逐渐减弱,但对流层高层风的预报性能仍有改善。对于大量级降水,无论采用哪种方法同化分钟探空,都能起到一定的正面效果。

同化较高垂直分辨率的分钟探空数据虽然对分析预报产生了一些积极影响,但不难看出,其大尺度

的增量性改进效果是有限的,因此仍待进一步有针对性的开展精细、高分辨率的分析,以突出其在分析小尺度系统方面的优势,但这一工作不仅需要资料本身可以很好地反映小尺度特征,同时也需模式背景场误差协方差结构能很好地反映多尺度特征。另外,我们使用的是 3DVAR 技术,在逐点同化时其实仅考虑了探空漂移带来的空间位置的细致差异,而无法(像 4DVAR 那样)考虑 L 波段分钟探空在上升过程中所表达的高时间分辨率信息。因此,未来同化系统的改进将有助于推动这一工作的开展和进一步显示 L 波段分钟/秒探空同化预报的有效性及其潜力。

## 参考文献

- 陈哲. 2010. 中国探空气球水平漂移总体特征分析. 气象, 36(2): 22-27.
- 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): 182-194.
- 陈龙虎, 江大纯, 吴月友, 等. 2009. 利用 L 波段探空雷达秒级数据分析安庆近地层逆温特征, 2009 第五届苏皖两省大气探测, 环境遥感与电子技术学术研讨会专辑.
- 蔡森, 欧建军, 周毓荃, 等. 2014. L 波段探空判别云区方法的研究. 大气科学, 38(2): 213-222.
- 范水勇, 王洪利, 陈敏, 等. 2013. 雷达反射率资料的三维变分同化研究. 气象学报, 71(3): 527-537.
- 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.
- 嵇磊, 李伟, 雷恒池, 等. 2008. 探空气球漂移位置订正在 MM5 模式中的应用研究. 高原气象, 27(3): 668-676.
- 刘红亚, 薛纪善, 沈桐立, 等. 2005. 探空气球漂移及其对数值预报影响的研究. 应用气象学报, 16(4): 518-526.
- 刘梦娟, 陈敏. 2014. BJ-RUC 系统对北京夏季边界层的预报性能评估. 应用气象学报, 25(2): 212-221.
- 石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2014. 2013 年 1 月安徽持续性霾天气成因分析. 气候与环境研究, 19(2): 227-236.
- 杨湘婧, 徐祥德, 陈宏尧, 等. 2011. L 波段探空高分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型. 气象, 37(12): 1504-1510.
- 苑跃, 陈中钰, 赵晓莉, 等. 2014. L 波段与 59701 探空系统观测资料差异评估. 气象, 40(2): 238-246.
- 张朝林, 陈敏, K. Ying-Hwa, 等. 2005. “00.7”北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估. 气象学报, 63(6): 922-932.
- 张利红, 何光碧, 屠妮妮, 等. 2013. 不同观测资料在西南地区数值预报中的应用. 高原山地气象研究, 33(3): 23-30.
- 张利红, 蒋丽娟, 陈朝平, 等. 2009. 探空观测资料在西南暴雨中的同化试验. 高原山地气象研究, 29(3): 31-38.
- 赵桂香, 赵建峰, 杨东, 等. 2013. 山西一次大暴雨过程云图及环境场的特征分析. 高原气象, 32(6): 1747-1757.
- Agustí-Panareda A, Beljaars A, Cardinali C, et al. 2010. Impacts of assimilating AMMA soundings on ECMWF analyses and forecasts. Wea Forecasting, 25(4): 1142-1160.
- Amstrup B, Huang X Y. 1999. Impact of the additional FASTEX radiosonde observations on the high-resolution limited-area model (HIRLAM) data-assimilation and forecasting system. Quart J Roy Meteor Soc, 125(561): 3359-3374.
- de la Torre A, Alexander P, Giraldez A. 1997. High-resolution temperature profiles measured with stratospheric balloons near the Andes Mountains. Geo Res Lett, 24(9): 1079-1082.
- Durre I, Yin X. 2008. Enhanced Radiosonde Data For Studies of Vertical Structure. Bull Amer Meteor Soc, 89(9): 1257-1262.
- Faccani 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.
- Hamilton K, Vincent R A. 1995. High-resolution radiosonde data offer new prospects for research. Eos Trans Amer Geo Union, 76(49): 497-506.
- Kalnay E, 卡莱尼, 蒲朝霞【译】. 2005. 大气模式、资料同化和可预报性. 北京: 气象出版社, 300.