

吴义凯,王成刚,苗世光,2025. 加密探空与地面自动气象站资料同化对北京地区边界层数值模拟改善研究[J]. 气象,51(1): 30-42. Wu Y K, Wang C G, Miao S G, 2025. Improvement of densely-observed radiosonde and automatic weather station data assimilation on numerical simulation of atmospheric boundary layer in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 51(1): 30-42 (in Chinese).

加密探空与地面自动气象站资料同化 对北京地区边界层数值模拟改善研究^{*}

吴义凯¹ 王成刚¹ 苗世光²

¹ 南京信息工程大学, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

² 北京城市气象研究院, 中国气象局城市气象重点开放实验室, 北京 100089

提 要: 利用 2016 年 8 月 28 日至 9 月 2 日在北京市宝联、朝阳、大兴站获得的逐 3 h 加密探空资料与逐 1 h 的地面自动气象站资料, 基于 WRF 模式与 WRFDA 三维变分同化系统, 分别进行仅同化加密探空资料(S-DA)、仅同化地面自动气象站资料(A-DA)以及同时同化以上两种资料(M-DA)的同化试验, 研究三组资料同化方案对北京地区边界层数值模拟的改善影响。结果表明: 垂直方向上, 加密探空资料对于改善模拟结果起核心作用, 可使边界层范围内温度、相对湿度、风速的均方根误差分别减少 65%、61%、22%。地面自动气象站资料对垂直方向的模拟结果亦有贡献, 但改善力度小、影响范围低。M-DA 试验与 S-DA 试验结果相仿。水平方向上, 地面自动气象站资料的改善作用主要体现在影响范围广, 加密探空资料改善力度较强, 然而影响范围小。M-DA 试验综合两种资料的优势, 可使模拟结果更接近观测结果。同化时效性方面, 同化试验对边界层内热力状态的改善影响时间较长, 对湿度状态与动力结构的改善影响时间较短, 其中 M-DA 试验对热力状态的改善影响最多可延长至预报 6 h, 对湿度与动力结构的改善影响最多可延长至预报 3 h。综上, 同时同化加密探空与地面自动气象站资料要比单独同化任一资料的效果更好, 两种资料在同化后可以相互补充各自的不足, 能较强烈地改善模式的初始场, 从而在一定程度上提高边界层模拟结果的准确度。

关键词: 资料同化, 大气边界层数值模拟, 加密探空资料, 地面自动气象站资料

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.120201

Improvement of Densely-Observed Radiosonde and Automatic Weather Station Data Assimilation on Numerical Simulation of Atmospheric Boundary Layer in Beijing Area

WU Yikai¹ WANG Chenggang¹ MIAO Shiguang²

¹ Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of CMA, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Key Laboratory for Urban Meteorology of CMA, Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Using the 3 h densely-observed radiosonde and the 1 h automatic weather station data obtained from Baolian, Chaoyang and Daxing stations in Beijing from 28 August to 2 September 2016, based on the WRF model and the WRFDA three-dimensional variational assimilation system, this paper conducts assimilation experiments on only assimilating densely-observed radiosonde data (S-DA), only assimilating automatic weather station data (A-DA), and simultaneously assimilating the above two types of data (M-DA), to investigate the improvement effect of the three data assimilation schemes in the numerical simulation of

^{*} 国家自然科学基金项目(42330608, 41975011)共同资助

2024 年 3 月 5 日收稿; 2024 年 12 月 2 日收修定稿

第一作者: 吴义凯, 主要从事边界层数值模拟研究. E-mail: 940968257@qq.com

通讯作者: 王成刚, 主要从事边界层气象学研究. E-mail: wcg@nuist.edu.cn

the boundary layer in the Beijing Area. The results show that in the vertical direction, the densely-observed radiosonde data play a core role in improving simulation results, which can reduce the root mean square errors of temperature, relative humidity, and wind speed within the boundary layer range by 65%, 61%, and 22%, respectively. The automatic weather station data also contribute to the simulation results in the vertical direction, but the improvement is small and the impact range is low. The results of the M-DA experiment are similar to those of the S-DA experiment. In the horizontal direction, the improvement effect of the assimilated automatic weather station data is mainly reflected in a wide range of impact. The effect of densely-observed radiosonde data has strong improvement, but the impact range is small. The advantages of combining the two types of data in the M-DA experiment can make the simulation results closer to the observation results. In terms of assimilation timeliness, the assimilation experiment has a relatively long effect on improving the thermal state within the boundary layer, and a relatively short effect on improving the humidity state and dynamic structure. Among them, the M-DA experiment can extend its effect for the thermal state up to 6 h in forecast, and its effect for the humidity and dynamic structure up to 3 h in forecast. In summary, the simultaneous assimilation of densely-observed radiosonde and automatic weather station data is more effective than assimilating one of the data only. The two types of data can complement each other's shortcomings after assimilation, which can greatly improve the initial field of the model and thus improve the accuracy of boundary layer simulation results to a certain extent.

Key words: data assimilation, numerical simulation of atmospheric boundary layer, densely-observed radiosonde data, automatic weather station data

引言

数值模拟是研究边界层大气演变特征与形成机制的一种重要方法,近年来国内外研究学者们在这一领域开展了大量卓有成效的工作(张强和胡隐樵,2001;胡非等,2003;刘辉志等,2013;2018)。但由于大气边界层物理过程具有空间尺度小、时间变化快、湍流影响过程复杂、对下垫面强迫作用敏感等特点,故现有中尺度气象模式对边界层内各气象要素的模拟结果还不尽如人意(Sušelj et al,2012;2013;王蓉等,2020)。大量研究结果表明,数值模拟预报结果的准确性主要受模式分辨率(马雷鸣和鲍旭炜,2017;王蓉等,2019)、物理参数化方案(Zhang et al,2015;栾贻花等,2016)、初始场及边界条件(陈东升等,2004;Stevens and Bony,2013)等多方面因素的影响。其中,初始场的准确性是最主要原因之一(陈建萍等,2007;孟智勇等,2019;Meng et al,2019)。

资料同化是提高初始场准确性最有效、最便捷的一种方法(Taragrand,1997;官元红等,2007;熊春晖等,2013),但同化效果的优劣则主要取决于所用的同化方法与同化资料。目前同化方法主要分为变分法与集合卡尔曼滤波法两大类,其中四维变分法

(4DVar)必须依赖复杂的伴随模式,计算成本较高(Huang et al,2009);集合卡尔曼滤波法(EnKF)也存在有限集合数较难准确估计背景误差协方差、矩阵不满秩、分析变量难以平衡等问题(Evensen,1994;Houtekame and Mitchell,1998)。相比之下,三维变分法(3DVar)实现较为容易,发展比较成熟,应用广泛(Courtier et al,1998;Barker et al,2004;薛纪善等,2008)。

另外,随着观测技术、观测方法的进步,能应用于同化的观测资料也越来越丰富,包括卫星、雷达、自动气象站、探空资料等等。其中,卫星资料在边界层内空间分辨率较低(薛纪善,2009),雷达资料反演出的温湿数据在多数情况下反映的是降水过程中的大气状态,而更多地应用于同化改善降水过程的数值预报结果(孙娟珍等,2016),因此这两种资料在边界层数值模拟资料同化中的应用较少。相比于卫星、雷达等非常规观测资料,自动气象站、探空资料这些常规观测资料的观测量均为模式变量,可以直接用于同化系统,同时也可以避免非常规观测资料在前向观测算子模拟过程中表现出的不确定性问题(张飞民和王澄海,2014;孟晓文,2018;王金成等,2024)。探空资料的质量稳定可靠,能够提供大气三维结构的完整描绘,其中加密探空资料具有时间加

密、空间加密、垂直分辨率高、信息量大等优势,可以弥补常规探空资料的不足,更有利于对边界层模拟结果的改进(李秋阳等,2022;林逸,2022)。然而,加密探空观测站点个数依然较少,且对数值模拟结果在水平方向上的影响范围较为有限。地面自动气象站观测资料的站点分布密集、观测频率高、实时性强,但是只覆盖了最靠近地表的一层,对数值模拟结果在垂直方向上的影响范围较为有限(李红莉等,2014;王平等,2017;刘瑞婷等,2016;肖明静等,2023)。有关研究表明,同时同化探空资料与地面自动气象站观测资料可以弥补彼此的不足(丁伟钰等,2006),改善动力场和热力场的结构(莫毅等,2008;朱雯娜和黄海波,2012;曾明剑等,2014),各气象要素的均方根误差在同化后也有不同程度的减小(黄燕燕等,2011;何光碧等,2013;徐同等,2016;张旭鹏等,2021)。过往的相关研究更多地说明了同化两种观测资料对于降水过程模拟的改善,而其对于边界层大气本身物理过程发展与演变的模拟结果改善研究较少。

因此,本文基于北京市宝联站、朝阳站、大兴站获得的加密探空资料与北京地区地面自动气象站资料,对北京地区大气边界层分别进行仅同化加密探空资料(S-DA)、仅同化地面自动气象站资料(A-DA)以及同时同化以上两种资料(M-DA)的同化试验,旨在研究三种资料同化方案对北京地区边界层数值模拟的改善影响。

1 数据与方法

1.1 观测数据介绍与处理

本研究使用的加密探空资料为 2016 年 8 月 28 日至 9 月 2 日在北京地区进行的外场观测资料,探空站点分别为宝联、朝阳和大兴三个站点;所用地面自动气象站观测资料为同一时间段内北京市 376 个自动气象站采集的数据,具体站点分布情况如图 1a 所示。

其中,加密探空资料中包括采样时间、经纬度、海拔高度、温度、气压、相对湿度、风速及风向。该资料的“加密性”体现在:(1)水平空间加密:各探空站点间的距离约为 20 km,较常规探空站点具有较高的水平空间分辨率。(2)垂直空间加密:传感器的采

样频率高,因此每隔几十米就有一组数据,并能很好地反映大气边界层的精细结构特征,具有较高的垂直空间分辨率。(3)观测时次加密:观测试验每 3 h 一次,一天 8 次,能很好地捕捉大气边界层的物理变化特征。为保证观测数据的准确性、可用性与有效性,在获取数据之后已对其进行一系列的质量控制(钱媛,2019)。而且为避免加密探空资料数据进入同化系统后,在垂直方向上与模式层高度不匹配,数据在使用前采用了稀疏化方案(李庆雷等,2018),即根据气象要素垂直廓线的变化特征,自适应地从低到高逐层挑选出廓线上的显著转折点,即温度特性层、湿度特性层、风特性层等,然后分别将对应模式层高度的上、下方相邻两层数据插值到该模式层。经检验,稀疏化之后的加密探空资料仍可以很好地表现出边界层的精细结构特征。

地面自动气象站观测资料数据中包括气温、相对湿度、气压、风速及风向。考虑到模式地形与实际观测站地形高度的差异(Ruggiero et al, 1996; Benjamin et al, 2004),本研究参照 Ruggiero et al (1996)方案同化地面自动气象站观测资料,模式地形与地面站实际最大高度差为 100 m,在进行了格式检查、逻辑检查、气候极值检查、内部一致性检查、空间一致性检查、时间一致性检查以及持续性检查等质量控制步骤之后(徐枝芳等,2013),在同化过程中实际使用的站点数量在 278 个左右。

1.2 模式与试验设置

本研究采用模式 WRF V3.9.1 进行模拟,使用 WRFDA 三维变分同化系统进行同化试验,同化资料包括加密探空与地面自动气象站观测资料。利用 NCEP/FNL 全球预报系统最终分析资料为模式提供初始和边界条件,其空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 6 h。模式使用兰伯特投影,模拟区域采用三层嵌套(图 1b),最外层区域 d03 的中心位置为 40°N 、 117.4°E ,三层嵌套区域的格点数分别为 364×364 、 346×346 、 400×400 ,水平分辨率由外到内分别为 9、3、1 km。模式最内层区域的地形高度如图 1a 所示。垂直坐标采用静力气压下的地形追随坐标,模式顶部气压为 50 hPa。为描述大气边界层的精细结构特征,模式垂直方向分为上疏下密的不等距 50 层,其中 2 km 以下加密到 25 层。

本次模拟时间段为 2016 年 8 月 28 日 02:00 至

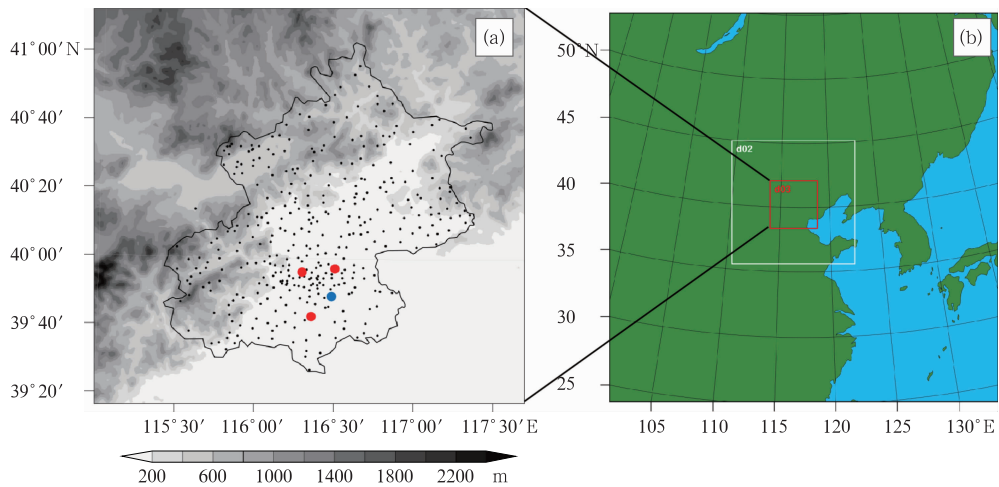


图 1 (a)加密探空(红色圆点)、常规探空(蓝色圆点)与地面自动气象站(黑色圆点)等观测站点分布(阴影为地形高度), (b)模式嵌套区域

Fig. 1 (a) Distribution of densely-observed radiosonde station (red dot), conventional radiosonde station (blue dot) and automatic weather station (black dot) (shaded: terrain height), and (b) model nested areas

29 日 14:00(北京时,下同),其中前 12 h 为模式的 spin-up 阶段。WRF 模式的物理参数化方案具体如表 1 所示。本文的同化分析时刻为最内层嵌套 d03 的起始时刻,即 2016 年 8 月 28 日 14:00。同化的气象要素包括气压、温度、相对湿度、风速及风向,其中对于风速、风向采用直接同化的方式。WRFDA 三维变分同化系统中采用的极小化算法为共轭梯度法。由于大气边界层模拟对空间的垂直、水平分辨率要求较高,且北京地区地形起伏大、下垫面复杂, WRFDA 三维变分同化系统自带的背景场误差协方差矩阵(B 矩阵)不适用,本文采用李秋阳等(2022)计算得到的适用于模拟区域的 B 矩阵。观测误差协方差矩阵采用模式自带文件,同化最大迭代次数为 500,最小收敛值为 0.0001。

表 1 模式物理参数化方案

Table 1 Scheme of model physical parameterization

物理过程	参数化方案
微物理过程方案	WSM6
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Dudhia
边界层方案	BL
陆面过程方案	Noah
近地面层方案	M-O(Janjic Eta)
积云参数化方案	Kain-Fritsch(d02、d03 关闭)

本文将未同化任何观测资料的数值模拟试验作为控制试验(CTL)。同化试验会在某一同化分析时刻将观测资料引入同化系统,将同化生成的分析场

继续积分 24 h。根据同化时资料的采纳情况,同化试验分为仅同化加密探空资料的同化试验(S-DA)、仅同化地面自动气象站资料的同化试验(A-DA)以及同时同化以上两种资料的同化试验(M-DA)。具体的试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

名称	代号	内容
控制试验	CTL	未同化任何观测资料
	S-DA	仅同化加密探空资料
同化试验	A-DA	仅同化地面自动气象站资料
	M-DA	同时同化以上两种资料

2 试验结果分析

2.1 三组同化试验结果在垂直方向上的对比分析

本研究中引入同化系统的加密探空数据来自宝联站、朝阳站及大兴站,而在同一时间段内南郊站的常规观测数据未用于任一组同化试验,且与前三个站点距离相近,各气象要素的空间协调性好,因此将南郊站作为“独立观测”,与各组模拟结果进行比较分析。图 2 为 S-DA(图 2a₁~2h₁)、A-DA(图 2a₂~2h₂)与 M-DA(图 2a₃~2h₃)三组同化试验在同化分析时刻背景场(BK)、分析场(AN)与观测数据(OBS)的温度、相对湿度、风速及风向的垂直廓线

(图 2a~2d)。为具体了解同化在垂直方向上对模拟的改善效果,将观测数据分别与背景场和分析场相减,得到各气象要素的差值廓线(图 2e~2h),两

者差值以下分别简称为背景差值(BK-OBS)与分析差值(AN-OBS)。

图 2a₁~2h₁ 为仅同化加密探空资料的同化试

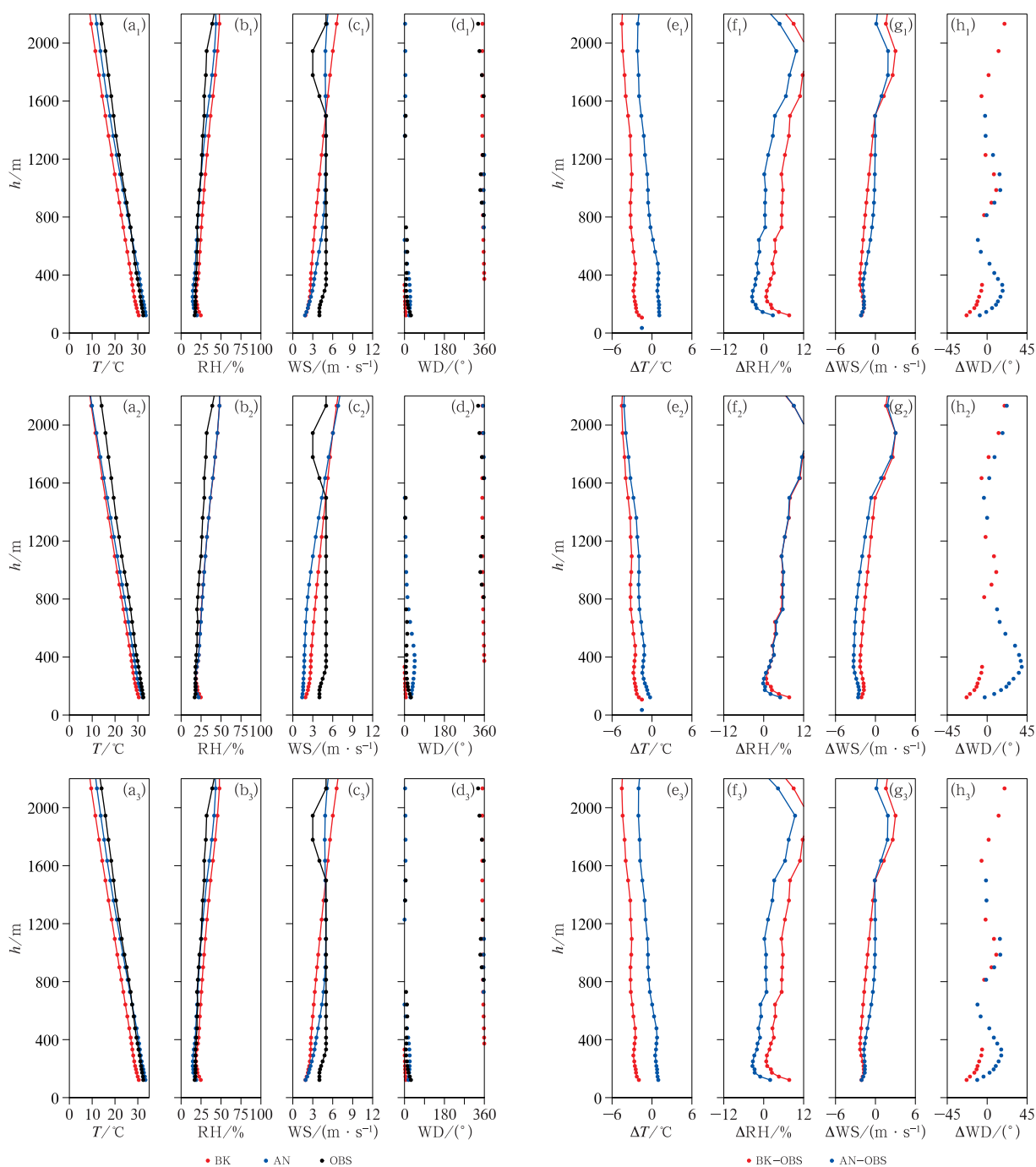


图 2 2016 年 8 月 28 日 14:00 三组同化试验南郊站各气象要素

(a~d) 观测数据(OBS)、背景场(BK)、分析场(AN)垂直廓线及(e~h) |BK-OBS|、|AN-OBS| 差值廓线

(a₁~h₁) S-DA 试验, (a₂~h₂) A-DA 试验, (a₃~h₃) M-DA 试验

Fig. 2 (a~d) Vertical profiles of observation (OBS), background (BK) and analysis (AN) of meteorological elements and (e~h) their difference value profiles at Nanjiao Station at 14:00 BT 28 August 2016

(a₁~h₁) S-DA, (a₂~h₂) A-DA, (a₃~h₃) M-DA

验结果。由图 2a₁ 可知,温度在近地面至 2000 m 高度内的背景场廓线变化趋势基本与观测廓线一致,而分析场廓线在低层基本与观测廓线重合,在高层较背景场廓线更接近观测廓线。结合差值廓线图 2e₁ 来看,温度的背景差值总体随高度增加,其中 1600 m 高度以下平均在 3℃ 左右,分析差值整层变化趋势与背景差值相近,平均不超过 1℃,在 800 m 高度左右趋近于 0℃。相对湿度的廓线与差值廓线分别如图 2b₁ 与 2f₁ 所示,在整个大气边界层内的分析场结果基本与观测重合,背景差值在 250 m 高度以上逐渐增加,而分析差值在 1200 m 以下平均大小不超过 3%。在图 2c₁ 中,在 1500 m 以下观测风速较大,模拟结果较小,而分析场廓线相比背景场廓线更加靠近观测。具体的情况由图 2g₁ 可见,风速的分析差值较背景差值平均小约 1.5 m·s⁻¹,其中在 400 m 和 1500 m 高度处分析差值明显小于背景差值,这与风速垂直廓线的特征对应。结合图 2d₁ 和 2h₁ 可知,整层风向以偏北风为主,风向的背景差值及分析差值平均皆小于 22.5°,其中在边界层低层两者平均相差 20°左右。

图 2a₂~2h₂ 为仅同化地面自动气象站资料的同化试验结果。如图 2e₂ 所示,温度的分析差值在整个大气边界层内均小于背景差值,其中在近地面至 800 m 高度内分析差值的变化趋势基本与背景差值相同,且两者平均相差 1.5℃,在 800 m 高度之上分析差值随着高度增加逐渐增大并越来越接近于背景差值。相对湿度的结果由图 2f₂ 可见,其整层分析差值与背景差值的大小及变化趋势基本相同,仅在近地面分析差值平均要比背景差值小 3% 左右。对于风速与风向,由于地面自动气象站资料仅有贴近地面的一层数据,并不能描述垂直方向上的动力结构,A-DA 试验并没有像 S-DA 试验一样给出很好的结果,这也是符合事先预期的。

图 2a₃~2h₃ 为同时同化加密探空与地面自动气象站资料的同化试验结果,可以看到,南郊站各个气象要素的垂直廓线及差值廓线的变化特征基本与 S-DA 试验的结果相同,这说明同时同化两种资料对于背景场在垂直方向上的改善是加密探空数据起到最主要的作用。

将背景场、分析场分别与三个加密探空站点观测数据进行比较,计算垂直方向上 2000 m 以下平均均方根误差(RMSE)。从数值上来看,在同化分析时刻温度、相对湿度及风速的背景场 RMSE 分别

为 2.51℃、4.75%、2.40 m·s⁻¹,S-DA 试验的分析场 RMSE 分别为 1.26℃、2.56%、1.99 m·s⁻¹,较背景场分别减小了 50%、46%、17%;M-DA 试验的分析场 RMSE 分别为 0.87℃、1.83%、1.88 m·s⁻¹,较背景场分别减小了 65%、61%、22%,同时较 S-DA 试验结果分别减小了 31%、29%、5%。其中温度的 RMSE 减小得最多,其次是相对湿度,再次是风速。综上,同化对于分析场的大气边界层内热力状态、湿度状态与动力结构在垂直方向上皆有较强的改进作用,且能体现出一定的同化正效果,其中地面自动气象站资料对于模拟结果在垂直方向上的改善也具有一定程度的贡献。

2.2 三组同化试验结果在水平方向上的对比分析

图 3 为三组同化试验在同化分析时刻背景场、分析场及分析增量场的温度与相对湿度近地面水平分布。在背景场(图 3a₁)中,近地面温度在北京地区平原范围内基本高于 30℃,城市中心气温在 32℃ 左右。S-DA 试验的分析场(图 3b₁)中高温区域内较背景场整体增加 1~3℃,且城市热岛范围增大。结合图 3e₁ 来看,温度的分析增量集中在三个探空站点形成的城市范围,中心极值可达 3℃ 以上,极值范围在东西与南北方向上的跨度分别达到约 30 km 与 60 km,这和三个探空站点的位置分布相关。分析增量大于 2℃ 的水平影响范围直径达到约 64~67 km,大于 1℃ 的水平影响范围直径则达到约 130 km,基本覆盖了北京的南部地区。A-DA 试验的分析场(图 3c₁)中高温区域范围增大,城市热岛中心不明显。大于 1℃ 的分析增量(图 3f₁)分布在北京市的城市南部与西部山区,这和地面自动气象站点的位置分布相关。M-DA 同化试验的分析场(图 3d₁)中,平原范围内 32~34℃ 的高温范围进一步增大,城市热岛中心位于昌平区附近。分析增量场如图 3g₁ 所示,极值中心位于大兴站附近,2~3℃ 的增量分布基本与 A-DA 试验的结果类似,而大于 1℃ 的分析增量基本覆盖了整个北京地区。

由图 3a₂ 可知,在同化分析时刻的背景场中,北京地区近地面较干,相对湿度在 30% 以下。S-DA 试验的分析场如图 3b₂ 所示,相较于背景场增大了北京南部的 10%~20% 的相对干区范围,对应地在分析增量场(图 3e₂)中,-5.0%~-2.5% 的负分析增量范围覆盖了北京市的城市南部地区。这一相对湿度的负分析增量范围与前文温度的正分析增量范

围大小基本相当,体现了同化对于温湿状态改善的协调作用。从 A-DA 试验的分析场(图 3c₂)与分析增量场(图 3f₂)来看,A-DA 试验增强了北京东北部的相对湿度同时降低了南部的相对湿度,从而使得

10%~20%的相对干区调整到了北京的城市南部,干区范围相较于 S-DA 试验的结果要小。大于 2.5%的相对湿度正分析增量覆盖了北京东北部,负分析增量则分布在北京西南部,且-5.0%~-2.5%

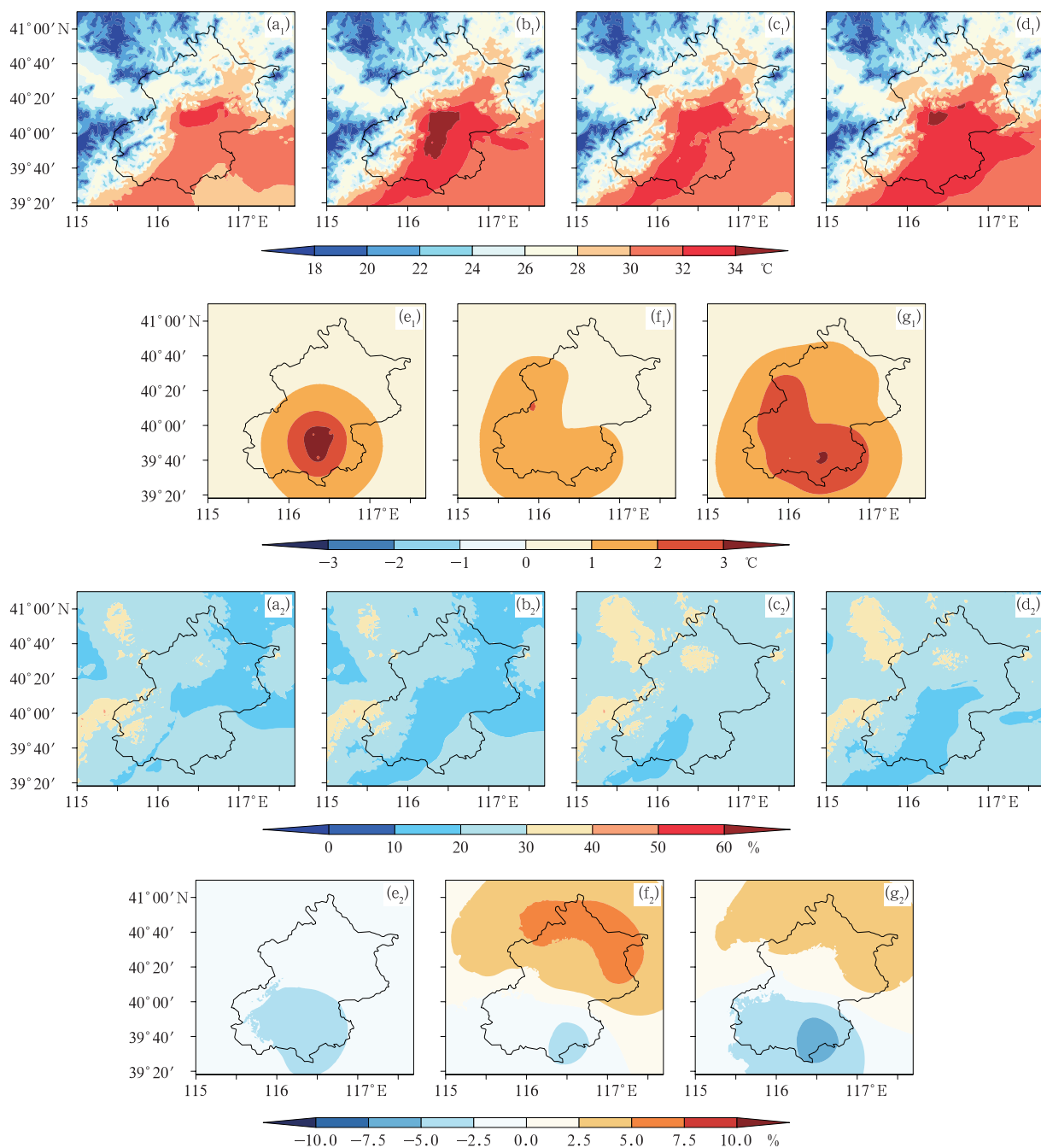


图 3 2016 年 8 月 28 日 14:00(a)背景场、(b~d)分析场及(e~g)分析增量场的(a₁~g₁)温度与(a₂~g₂)相对湿度水平分布

(b,e)S-DA 试验,(c,f)A-DA 试验,(d,g)M-DA 试验

Fig. 3 Horizontal distribution of (a₁~g₁) temperature and (a₂~g₂) relative humidity of (a) background,

(b~d) analysis and (e~g) analysis increment at 14:00 BT 28 August 2016

(b, e) S-DA, (c, f) A-DA, (d, g) M-DA

的极值中心位于大兴区南端,水平影响范围直径达到约 30 km。M-DA 同化试验的结果基本综合了前两组试验的分布特征,分析场(图 3d₂)中相对于区位于北京的城市中南部地区,且相较于前两组试验的范围都要大。由图 3g₂ 可见,相较于 A-DA 试验的结果,M-DA 同化试验减小了北京东北部的相对湿度正分析增量大小及范围,增强了北京南部的相对湿度负分析增量,其位置分布基本无变化而其中中心极值增加到 $-7.5\% \sim -5.0\%$ 。

总之在水平方向上,与背景场相比,同化所得分析场增强了热岛效应且调整了湿度分布,使其更加符合实际情况,体现出了同化的改进效果。其中,地面自动气象站资料在水平方向上对于同化改善模拟的结果起到主导作用,加密探空资料也有一定的水平影响范围。

2.3 三组同化试验的时效性对比分析

由于同化机制与模式限制而造成的各种误差,同化试验对于模拟结果的改善效果具有一定的时效性。图 4 为大兴站垂直方向上观测、CTL 试验及三组同化试验的温度与相对湿度及各自分析增量随时间的变化情况,为了与观测对应,模拟结果每 3 h 输出一次。

由观测结果可知,28 日 17:00 大兴站自地面向高空温度(图 4a₁)递减、相对湿度(图 4a₂)递增,其中近地面温度高于 30℃ 的较暖范围(以下简称暖层)厚度达 350 m,相对湿度低于 20% 的较干范围(以下简称干层)厚度达 750 m,且两者大小变化在边界层内基本皆与 14:00 持平,另外因为日落而近地面辐射冷却,暖层与干层分别消散于 18:00 与 17:30 左右。CTL 试验温度(图 4e₁)结果整体较观测偏低 2~3℃,近地面暖层厚度不足百米;相对湿度(图 4e₂)结果在边界层高层较观测偏高 10% 左右,干层厚度仅有 200 m 且不接地。在 S-DA 试验的结果中,近地面温度(图 4b₁)下降明显,同化尽管增加了分析场的暖层厚度却没有维持到 3 h 预报场,而暖层的消散时刻与观测的结果相当;相对湿度的情况与温度类似,分析场的干层厚度得到了增加而在 3 h 预报内迅速减小,且低层出现上干下湿的层结,与观测不符。A-DA 试验相较于 CTL 试验,对于暖层(图 4c₁)与干层(图 4c₂)的厚度皆有所增加,然而与观测结果仍有差距。M-DA 同化试验在 3 h 内的预报结果优于前两组试验,温湿状态及发

展特征更加接近观测。

28 日 20:00 即 6 h 预报,大兴站观测与 17:00 相比温度(图 4a₁)呈下降走势,相对湿度(图 4a₂)呈上升走势,其中由于辐射冷却在地面至 500 m 高度内两者均变化明显,近地面温度下降至 26~28℃,相对湿度上升至 20%~30%,近地面存在逆湿层结。CTL 试验的温度(图 4e₁)除了整层数值较观测偏小外,200 m 高度出现逆温层结,与观测不符;相对湿度(图 4e₂)结果在边界层较高层基本与观测一致,而逆湿层结则在该预报时刻之后出现。由于背景场的原因,三组同化试验在 6 h 预报中均出现一定强度的逆温层结,其中 M-DA 同化试验的结果最弱,体现了同化的修正作用。28 日 20:00 之后,由于同化效果消散,三组同化试验与观测结果相比均存在较大偏差。

图 4f₁ 为 S-DA 试验大兴站垂直方向上温度分析增量随时间的变化情况。由此可见,同化在预报 6 h 内增加了背景场温度,正分析增量可以影响整个边界层,说明了加密探空资料对模拟结果改善在垂直方向上起到主要作用。温度的正分析增量随着预报时间逐渐减少,大于 1℃ 的分析增量对于整层的影响可以持续到 17:00(即 3 h 预报)。A-DA 试验中大于 1℃ 的温度分析增量(图 4g₁)可以影响到距地面近 1500 m 的高度,并且可持续到预报 2 h 左右,这说明了地面自动气象站资料对模拟结果改善在垂直方向也有一定的贡献。M-DA 试验的结果(图 4h₁)较 S-DA 试验增强了温度分析增量的作用时效,大于 2℃ 的影响最长持续到预报约 2.5 h,大于 1℃ 的影响在边界层高层持续到预报 4~5 h,在近地面可以达到预报 6 h,其中在 200 m 高度出现的负分析增量正是同化对于背景场中逆温层结的修正作用。同样地,相对湿度的分析增量场有类似的结论。在 S-DA 试验的结果(图 4f₂)中,同化在预报 6 h 内减小了边界层内的相对湿度,小于 -2.5% 的负分析增量能够影响到预报 1~2 h。A-DA 试验(图 4g₂)对于整层相对湿度的减小程度较小,而小于 0% 的负分析增量则可以持续影响到预报 3 h。与温度的情况一样,M-DA 同化试验(图 4h₂)相较于 S-DA 试验同样延长了相对湿度负分析增量的影响时长,小于 -2.5% 的负分析增量持续到了预报 2~3 h。

将 CTL 试验与三组同化试验的结果分别与两种观测资料进行比较,计算各气象要素在垂直方向

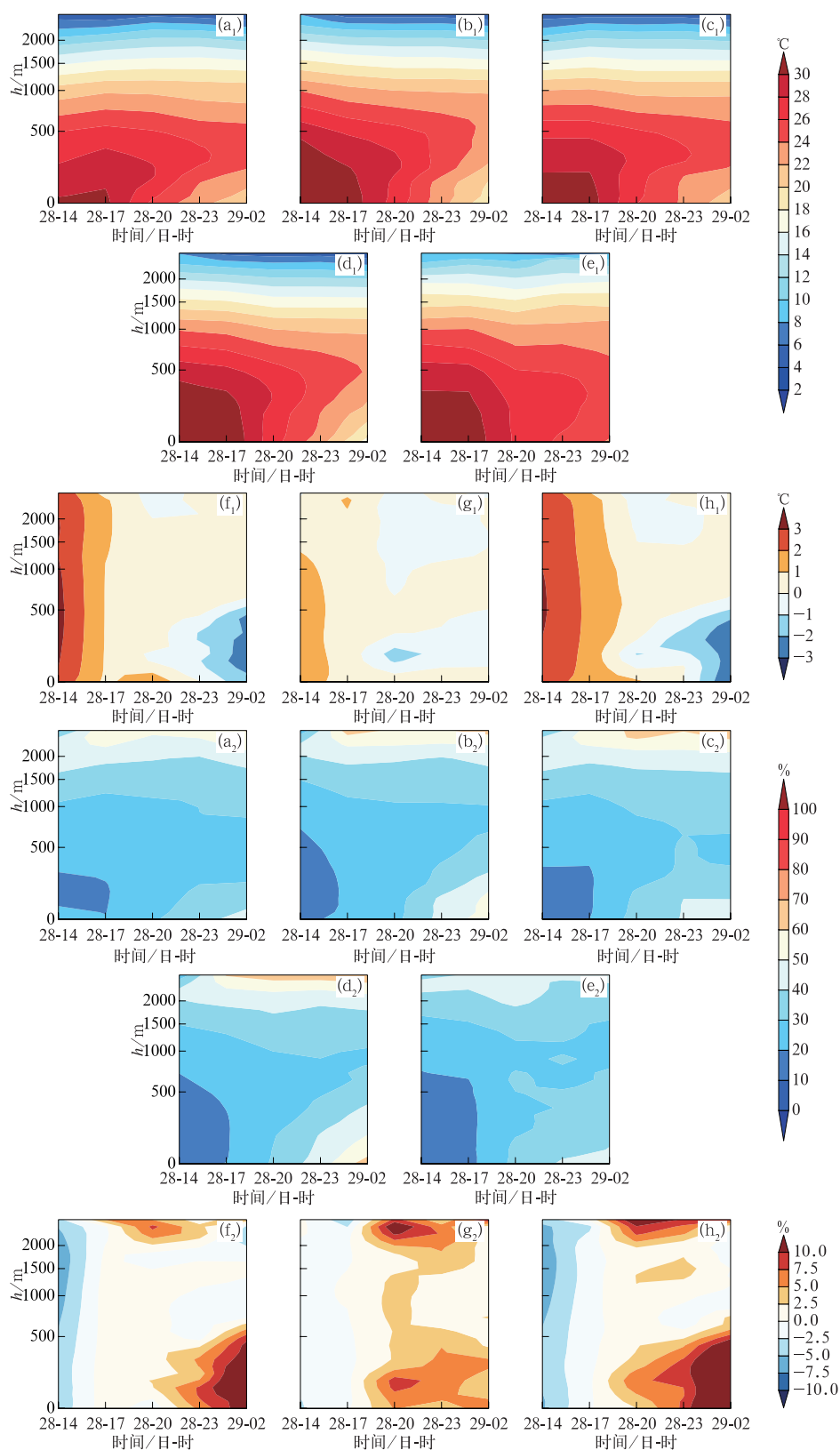


图 4 2016 年 8 月 28 日 14:00 至 29 日 02:00 大兴站垂直方向上 ($a_1 \sim e_1$) 温度, ($a_2 \sim e_2$) 相对湿度

及其 ($f_1 \sim h_1, f_2 \sim h_2$) 各自分析增量随时间变化

(a) 观测, (b, f) S-DA 试验, (c, g) A-DA 试验, (d, h) M-DA 试验, (e) CTL 试验

Fig. 4 Time-variation in vertical direction of ($a_1 \sim e_1$) temperature, ($a_2 \sim e_2$) relative humidity and ($f_1 \sim h_1, f_2 \sim h_2$) their analysis increments at Daxing Station from 14:00 BT 28 to 02:00 BT 29 August 2016

(a) observation, (b, f) S-DA, (c, g) A-DA, (d, h) M-DA, (e) CTL

2000 m 以下及水平方向上的站点平均 RMSE。由于水平方向上各组的试验结果过于接近,这里仅给出垂直方向上的 RMSE 随预报时间的变化,如图 5 所示。对于温度(图 5a),从同化分析时刻到预报 6 h,蓝色点线在绿色点线以下,即 M-DA 试验结果小于 CTL 试验结果;预报 6 h 之后,M-DA 试验结果大于 CTL 试验结果。对于相对湿度(图 5b)和风速

(图 5c),M-DA 试验结果在预报前 3 h 优于 CTL 试验结果。其中相对湿度在预报 9 h 之后出现的 M-DA 试验结果小于 CTL 试验结果的情况是由于预报误差导致的,所呈现的“同化改善效果”在之后的预报时刻并不持续。

表 3 给出了 CTL 试验与同化试验预报 6 h 内气象要素在垂直方向与水平方向上的 RMSE 具体

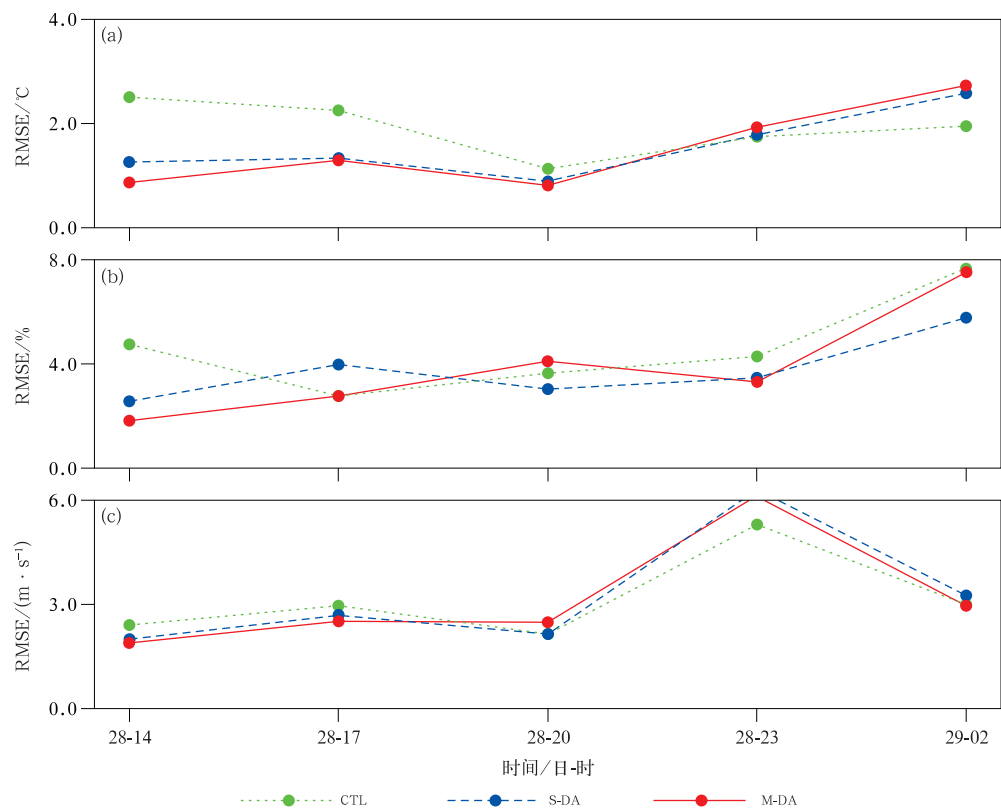


图 5 2016 年 8 月 28 日 14:00 至 29 日 02:00(a)温度,(b)相对湿度,(c)风速
垂直方向上 RMSE 随时间的变化

图 5 Time-variation in vertical direction of RMSE of (a) temperature, (b) relative humidity
and (c) wind speed from 14:00 BT 28 to 02:00 BT 29 August 2016

表 3 预报 6 h 内 CTL 试验与同化试验在垂直方向与水平方向上的 RMSE
Table 3 RMSE of the meteorological elements for CTL and assimilation experiments in
vertical and horizontal directions within 6 hours of forecast

物理量	时间/BT	垂直方向			水平方向		
		CTL	S-DA	M-DA	CTL	A-DA	M-DA
T/°C	14:00	2.51	1.26	0.87	3.14	2.59	2.61
	17:00	2.56	1.35	1.29	3.11	3.06	3.06
	20:00	1.13	0.89	0.80	4.81	4.95	5.18
RH/%	14:00	4.75	2.56	1.83	6.38	4.98	5.51
	17:00	2.77	3.97	2.77	9.56	9.12	9.87
	20:00	3.64	3.03	3.00	32.12	30.86	31.30
WS/(m · s ⁻¹)	14:00	2.40	1.99	1.88	1.41	1.59	1.41
	17:00	2.95	2.69	2.51	1.07	1.34	1.69
	20:00	2.14	2.14	2.48	1.63	1.51	1.72

数值。结合图表可知,在垂直方向上,相比于 S-DA 试验,M-DA 同化试验温度的 RMSE 在预报 6 h 内更小,相对湿度和风速的 RMSE 在预报 3 h 内更小。也就是说在同化时效范围内,M-DA 试验对于模拟结果的改善程度比 S-DA 试验更好,这正是加入的地面自动气象站资料对于模拟结果改善的贡献。因此,同化试验在垂直方向上对于大气边界层内热力状态的改善效果较强且能持续至预报 6 h,对于湿度状态与动力结构的也有较强的改善程度,且改善效果最多持续至预报 3 h。另一方面,在水平方向上,同化试验温度的 RMSE 在预报 3 h 内小于 CTL 试验,相对湿度与风速的 RMSE 彼此相差不大,可能与同化对于地面自动气象站数据的利用率较低有关。

3 结论与讨论

通过以上三种同化试验的对比可知,M-DA 试验的结果最优:

(1)垂直方向上,同时同化加密探空与地面自动气象站资料的同化试验分析场 RMSE 较背景场结果减小显著,其中加密探空资料对模拟结果的改善起主导作用,地面自动气象站资料也有一定贡献。

(2)水平方向上,同时同化加密探空与地面自动气象站资料的同化试验综合两种资料的优势,使得模拟结果更接近观测结果。其中地面自动气象站资料明显改善背景场低层的温湿分布,很好地补充了加密探空资料由于站点少、在水平方向上对模拟结果影响范围较小的不足。

(3)同化时效性方面,同化试验对边界层内热力状态的改善影响时间较长,对湿度状态与动力结构的改善影响时间较短,其中 M-DA 试验对热力状态的改善影响最多可延长至预报 6 h,对湿度与动力结构的改善影响最多可延长至预报 3 h。

综上,同时同化加密探空与地面自动气象站资料要比单独同化任一资料的效果更好,两种资料在同化后可以相互补充各自的不足,能较强烈地改善模式的初始场,从而在一定程度上提高边界层模拟结果的准确度。本文对于边界层数值模拟结果的改善影响仅做了初步尝试,利用资料的时间加密特点进行循环同化模拟试验将是下一步研究的重点。

参考文献

陈东升,沈桐立,马革兰,等,2004. 气象资料同化的研究进展[J]. 南

- 京气象学院学报,27(4):550-564. Chen D S, Shen T L, Ma G L, et al, 2004. Advances in the meteorological data assimilation[J]. J Nanjing Inst Meteor, 27(4):550-564(in Chinese).
- 陈建萍,周伟灿,官元红,等,2007. 使用卫星资料进行边界层四维变分同化研究综述[J]. 气象与减灾研究,30(1):53-59. Chen J P, Zhou W C, Guan Y H, et al, 2007. Overview of using satellite data on four-dimensional variational data assimilation on lateral layer[J]. Meteor Dis Reduct Res, 30(1):53-59(in Chinese).
- 丁伟钰,万齐林,闫敬华,等,2006. 对流天气系统自动站雨量资料同化对降雨预报的影响[J]. 大气科学,30(2):317-326. Ding W Y, Wan Q L, Yan J H, et al, 2006. Variational assimilation of automatic weather stations rainfall in convective systems and its impact on rain forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 30(2):317-326(in Chinese).
- 官元红,周广庆,陆维松,等,2007. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. 气象与减灾研究,30(4):1-8. Guan Y H, Zhou G Q, Lu W S, et al, 2007. Theory development and application of data assimilation methods[J]. Meteor Dis Reduct Res, 30(4):1-8(in Chinese).
- 何光碧,张利红,陈功,等,2013. 探空加密观测资料对西南地区数值预报的影响分析[J]. 高原山地气象研究,33(3):1-7. He G B, Zhang L H, Chen G, et al, 2013. Effect of sounding intensive observation data on numerical weather prediction of Southwest China[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 33(3):1-7(in Chinese).
- 胡非,洪钟祥,雷孝恩,2003. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. 大气科学,27(4):712-728. Hu F, Hong Z X, Lei X E, 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP[J]. Chin J Atmos Sci, 27(4):712-728(in Chinese).
- 黄燕燕,万齐林,陈子通,等,2011. 加密探空资料在华南暴雨数值预报的应用试验[J]. 热带气象学报,27(2):179-188. Huang Y Y, Wan Q L, Chen Z T, et al, 2011. Experiments of using dense observation data of sounding balloon in rainstorm forecast over South China[J]. J Trop Meteor, 27(2):179-188(in Chinese).
- 李红莉,彭菊香,张艳霞,2014. 多源观测资料在 LAPS 中尺度分析场中的作用分析[J]. 暴雨灾害,33(3):273-280. Li H L, Peng J X, Zhang Y X, 2014. Analysis on the role of various observation data in LAPS mesoscale analysis fields[J]. Torr Rain Dis, 33(3):273-280(in Chinese).
- 李庆雷,远芳,杨贵,等,2018. L 波段探空秒级资料稀疏化方案及检验方法[J]. 气象科技进展,8(1):127-132. Li Q L, Yuan F, Yang G, et al, 2018. A sparsification scheme and evaluation of the L-band radiosonde high-resolution data[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1):127-132(in Chinese).
- 李秋阳,王成刚,王旻燕,2022. 加密探空资料同化对北京地区边界层数值模拟的影响[J]. 气象,48(5):580-594. Li Q Y, Wang C G, Wang M Y, 2022. Influence of densely-observed radiosonde data assimilation on numerical simulation of atmospheric boundary layer in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 48(5):580-594(in Chinese).

- 林逸,2022.低空急流与北京城市边界层特征的观测与模拟研究[D].南京:南京信息工程大学. Lin Y,2022. Observation and simulation of boundary layer low-level jet in Beijing urban zone [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 刘辉志,冯健武,王雷,等,2013.大气边界层物理研究进展[J].大气科学,37(2):467-476. Liu H Z, Feng J W, Wang L, et al,2013. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment at LAPC[J]. Chin J Atmos Sci,37(2):467-476(in Chinese).
- 刘辉志,王雷,杜群,2018.大气边界层物理研究进展(2012~2017年)[J].大气科学,42(4):823-832. Liu H Z, Wang L, Du Q, 2018. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC (2012—2017)[J]. Chin J Atmos Sci,42(4):823-832(in Chinese).
- 刘瑞婷,阮征,魏鸣,等,2016.风的空间不均匀分布对风廓线雷达数据质量影响研究[J].热带气象学报,32(2):229-236. Liu R T, Ruan Z, Wei M, et al,2016. The analysis of influence on wind measurement by inhomogeneous wind distribution with wind profile radar[J]. J Trop Meteor,32(2):229-236(in Chinese).
- 栾贻花,俞永强,郑伟鹏,2016.全球高分辨率气候系统模式研究进展[J].地球科学进展,31(3):258-268. Luan Y H, Yu Y Q, Zheng W P,2016. Review of development and application of high resolution global climate system model[J]. Adv Earth Sci,31(3):258-268(in Chinese).
- 马雷鸣,鲍旭炜,2017.数值天气预报模式物理过程参数化方案的研究进展[J].地球科学进展,32(7):679-687. Ma L M, Bao X W, 2017. Research progress on physical parameterization schemes in numerical weather prediction models[J]. Adv Earth Sci,32(7):679-687(in Chinese).
- 孟晓文,2018.常规探空资料同化对重庆地区一次大暴雨过程的数值模拟研究[D].兰州:兰州大学. Meng X W,2018. Numerical simulation analysis on conventional data assimilation for a rainstorm in Chongqing[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 孟智勇,张福青,罗德海,等,2019.新中国成立70年来的中国大气科学研究:天气篇[J].中国科学:地球科学,49(12):1875-1918. Meng Z Y, Zhang F Q, Luo D H, et al,2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: synoptic meteorology[J]. Sci China Earth Sci,49(12):1875-1918(in Chinese).
- 莫毅,潘晓滨,臧增亮,等,2008.资料同化对一次华南暴雨影响的数值试验研究[J].暴雨灾害,27(4):289-294. Mo Y, Pan X B, Zang Z L, et al,2008. Effect of data assimilation on a numerical simulation of a heavy rain in South China[J]. Torr Rain Dis,27(4):289-294(in Chinese).
- 钱媛,2019.往返平漂式探空数据的质量控制及评估研究[D].南京:南京信息工程大学. Qian Y,2019. Quality control and evaluation of round-trip flat drift sounding data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 孙娟珍,陈明轩,范水勇,2016.雷达资料同化方法:回顾与前瞻[J].气象科技进展,6(3):17-27. Sun J Z, Chen M X, Fan S Y,2016. Radar data assimilation methods: review and future perspective [J]. Adv Meteor Sci Technol,6(3):17-27(in Chinese).
- 王金成,王丹,王瑞文,等,2024.往返平飘式探空在CMA-MESO三维变分中的同化及对模式预报的影响[J].气象,50(2):159-169. Wang J C, Wang D, Wang R W, et al,2024. Assimilation of round-trip horizontal drift radiosonde data in CMA-MESO 3DVar and its impact on model forecast[J]. Meteor Mon,50(2):159-169(in Chinese).
- 王平,王晓峰,张蕾,等,2017.地面观测资料在快速更新同化系统中的敏感性试验[J].气象,43(8):901-911. Wang P, Wang X F, Zhang L, et al,2017. Sensitivity analysis of surface observation data in WRF-ADAS rapid refresh system[J]. Meteor Mon,43(8):901-911(in Chinese).
- 王蓉,黄倩,岳平,2019.大涡模式水平分辨率对边界层夹卷过程及示踪物垂直传输的影响[J].干旱气象,37(1):48-56. Wang R, Huang Q, Yue P,2019. Effect of large eddy horizontal resolution on simulation of entrainment and tracer vertical transport[J]. J Arid Meteor,37(1):48-56(in Chinese).
- 王蓉,张强,岳平,等,2020.大气边界层数值模拟研究与未来展望[J].地球科学进展,35(4):331-349. Wang R, Zhang Q, Yue P, et al,2020. Summary and prospects of numerical simulation research of the atmospheric boundary layer[J]. Adv Earth Sci,35(4):331-349(in Chinese).
- 肖明静,吴炜,刘诗军,等,2023.多源观测数据逐半小时同化对一次区域持续性暴雨的敏感性试验[J].气象,49(8):915-931. Xiao M J, Wu W, Liu S J, et al,2023. Sensitivity experiments of half-hourly assimilation of multi-source data in one regional persistent rainstorm process[J]. Meteor Mon,49(8):915-931(in Chinese).
- 熊春晖,张立凤,关吉平,等,2013.集合-变分数据同化方法的发展与应用[J].地球科学进展,28(6):648-656. Xiong C H, Zhang L F, Guan J P, et al,2013. Development and application of ensemble-variational data assimilation methods[J]. Adv Earth Sci,28(6):648-656(in Chinese).
- 徐同,王晓峰,张蕾,等,2016.加密探空资料在华东区域业务模式中的应用试验[J].暴雨灾害,35(4):306-314. Xu T, Wang X F, Zhang L, et al,2016. The application test of intensive radiosonde observations in the East China regional numerical model system [J]. Torr Rain Dis,35(4):306-314(in Chinese).
- 徐枝芳,陈小菊,王轶,2013.新建地面自动气象站资料质量控制方法设计[J].气象科学,33(1):26-36. Xu Z F, Chen X J, Wang Y, 2013. Quality control scheme for new-built automatic surface weather observation station's data[J]. Sci Meteor Sin,33(1):26-36(in Chinese).
- 薛纪善,2009.气象卫星资料同化的科学问题与前景[J].气象学报,67(6):903-911. Xue J S,2009. Scientific issues and perspective of assimilation of meteorological satellite data[J]. Acta Meteor Sin,67(6):903-911(in Chinese).
- 薛纪善,庄世宇,朱国富,等,2008.GRAPES新一代全球/区域变分同化系统研究[J].科学通报,53(20):2408-2417. Xue J S,

- Zhuang S Y, Zhu G F, et al, 2008. Research on the new generation global/regional variational assimilation system of GRAPES [J]. *Chin Sci Bull*, 53(20): 2408-2417 (in Chinese).
- 曾明剑, 张备, 周嘉陵, 等, 2014. GPS/PWV 资料同化在强降水过程中的定量作用评估 [J]. *气象科学*, 34(1): 77-86. Zeng M J, Zhang B, Zhou J L, et al, 2014. Quantitative evaluation for GPS/PWV data assimilation in heavy precipitation events [J]. *J Meteor Sci*, 34(1): 77-86 (in Chinese).
- 张飞民, 王澄海, 2014. 利用 WRF-3DVAR 同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验 [J]. *高原气象*, 33(3): 675-685. Zhang F M, Wang C H, 2014. Experiment of surface-layer wind forecast improvement by assimilating conventional data with WRF-3DVAR [J]. *Plateau Meteor*, 33(3): 675-685 (in Chinese).
- 张强, 胡隐樵, 2001. 大气边界层物理学的研究进展和面临的科学问题 [J]. *地球科学进展*, 16(4): 526-532. Zhang Q, Hu Y Q, 2001. Scientific problems and advance of atmospheric boundary layer physics [J]. *Adv Earth Sci*, 16(4): 526-532 (in Chinese).
- 张旭鹏, 郭启云, 杨荣康, 等, 2021. 基于“上升-平漂-下降”探空资料的长江中下游暴雨同化试验 [J]. *气象*, 47(12): 1512-1524. Zhang X P, Guo Q Y, Yang R K, et al, 2021. Assimilation experiment of rainstorm in the middle and lower reaches of the Yang-tze River based on “up-drift-down” sounding data [J]. *Meteor Mon*, 47(12): 1512-1524 (in Chinese).
- 朱雯娜, 黄海波, 2012. 资料同化对一次寒潮数值预报效果的评估 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 6(3): 50-53. Zhu W N, Huang H B, 2012. Effect of numerical prediction with data assimilation of a cold wave [J]. *Desert Oasis Meteor*, 6(3): 50-53 (in Chinese).
- Barker M D, Huang W, Guo R Y, et al, 2004. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results [J]. *Mon Wea Rev*, 132(4): 897-914.
- Benjamin S G, Grell G A, Brown J M, et al, 2004. Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model [J]. *Mon Wea Rev*, 132(2): 473-494.
- Courtier P, Andersson E, Heckley W, et al, 1998. The ECMWF implementation of three-dimensional variational assimilation (3D-Var). I: formulation [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 124(550): 1783-1807.
- Evensen G, 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics [J]. *J Geophys Res Ocean*, 99(C5): 10143-10162.
- Houtekamer P L, Mitchell H L, 1998. Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique [J]. *Mon Wea Rev*, 126(3): 769-811.
- Huang X Y, Xiao Q N, Barker D M, et al, 2009. Four-dimensional variational data assimilation for WRF: formulation and preliminary results [J]. *Mon Wea Rev*, 137(1): 299-314.
- Meng Z Y, Zhang F Q, Luo D H, et al, 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: synoptic meteorology [J]. *Sci China Earth Sci*, 62(12): 1946-1991.
- Ruggiero F H, Sashegyi K D, Madala R V, et al, 1996. The use of surface observations in four-dimensional data assimilation using a mesoscale model [J]. *Mon Wea Rev*, 124(5): 1018-1033.
- Stevens B, Bony S, 2013. What are climate models missing [J]. *Science*, 340(6136): 1053-1054.
- Sušelj K, Teixeira, Chung D, 2013. A unified model for moist convective boundary layers based on a stochastic eddy-diffusivity/mass-flux parameterization [J]. *J Atmos Sci*, 70(7): 1929-1953.
- Sušelj K, Teixeira J, Matheous G, 2012. Eddy diffusivity/mass flux and shallow cumulus boundary layer: an updraft PDF multiple mass flux scheme [J]. *J Atmos Sci*, 69(5): 1513-1533.
- Talagrand O, 1997. Assimilation of observations: an introduction [J]. *J Meteor Soc Japan*, 75(1): 191-209.
- Zhang X F, Zhang S Q, Liu Z Y, et al, 2015. Parameter optimization in an intermediate coupled climate model with biased physics [J]. *J Climate*, 28(3): 1227-1247.

(本文责编: 俞卫平)