

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).

加密探空资料同化对北京地区 边界层数值模拟的影响*

李秋阳¹ 王成刚¹ 王旻燕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 国家气象信息中心,北京 100081

提 要: 基于 2016 年 8 月 28 日至 9 月 2 日在北京市宝联站、朝阳站、大兴站获得的逐 3 h 加密探空资料,利用 WRF V3.9.1 模式和 WRF-3DVar 系统,对北京地区大气边界层进行数值模拟试验,研究加密探空资料同化对边界层数值模拟的影响。结果表明:同化形成的分析场较背景场更接近观测值,更能表现边界层内真实大气的热力、湿度状态及动力特征。位温、比湿、纬向风、经向风、风速分析场的均方根误差分别较背景场的减少了 86%、59%、24%、44%、19%,体现出同化的较强修正作用。加密探空资料同化的预报效果在模式积分 6 h 内最好,之后同化作用的大小及范围逐渐减弱。加密探空资料同化对边界层内大气湿度状态在整个预报时段内均有改进,对边界层内大气热力状态的改进持续 6 h,对于边界层内大气动力特征的改进,纬向风改进较多,经向风和风速不明显,这与风的自身属性、北京市的复杂地形有关。另外,加密探空资料的站点数在空间水平方向上比较少也是导致同化在分析场的改善作用明显但是效果难以持续较长时间的原因之一。

关键词: 大气边界层,数值模拟,加密探空资料,三维变分同化

中图分类号: P457,P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.101801

Influence of Densely-Observed Radiosonde Data Assimilation on Numerical Simulation of Atmospheric Boundary Layer in Beijing Area

LI Qiuyang¹ WANG Chenggang¹ WANG Minyan²

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

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the 3 h densely-observed radiosonde data from Baolian Station, Chaoyang Station, and Daxing Station in Beijing from 28 August to 2 September 2016, and using the WRF V3.9.1 model and WRF-3DVar system, a numerical simulation test of the atmospheric boundary layer in the Beijing Area was carried out to study the impact of the densely-observed radiosonde data assimilation on the numerical simulation of the boundary layer. The results show that the analysis field formed by assimilation is closer to the observation than the background field, and it can better represent the thermal, humidity and dynamic characteristics of the real atmosphere in the boundary layer. Respectively compared with the background field, the root mean square errors of the analysis field of potential temperature, specific humidity, zonal wind, meridional wind, and wind speed are reduced by 86%, 59%, 24%, 44%, 19% correspondingly, showing

* 国家自然科学基金面上项目(41975011)、国家重点研发计划(2016YFC0201900)共同资助

2021 年 5 月 5 日收稿; 2022 年 2 月 22 日收修定稿

第一作者:李秋阳,主要从事资料同化研究. E-mail:20181203015@nuist.edu.cn

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

a strong correction effect of assimilation. The prediction effect of the densely-observed radiosonde data assimilation within 6 hours of model integration is the best, but gradually weakens in size and scope after 6 hours. The densely-observed radiosonde data assimilation improves the atmospheric humidity in the boundary layer throughout the forecast period. The improvement of the atmospheric thermal state in the boundary layer lasts for 6 hours. For the atmospheric dynamic characteristics in the boundary layer, the zonal wind improves most, the meridional wind and wind speed are not obvious, which are related to the nature of the wind and the complex terrain of Beijing. In addition, the relatively small number of sites for densely-observed radiosonde data in the spatial horizontal direction is one of the reasons that the assimilation effect has a significant improvement in the analysis field but is difficult to last for a long time.

Key words: atmospheric boundary layer, numerical simulation, densely-observed radiosonde data, three-dimensional variational assimilation

引 言

大气边界层(ABL)是指以湍流运动为主、对地面强迫的响应时间在 1 h 以内的低层大气(Garratt and Hicks, 1990; 胡非等, 2003; 刘辉志等, 2013), 边界层中发生的强对流天气、污染物传输等过程均极大地影响人类生活, 引起越来越多学者的重视(孟丹等, 2019; 乔梁等, 2019; 张宏昇等, 2020)。目前研究大气边界层的方式主要有外场观测与数值模拟(刘辉志等, 2018; 王蓉等, 2020)。外场观测获取的数据较为准确, 但耗时长, 花费大, 多为单点观测(宁志远和刘厚凤, 2017), 易受地形、天气条件等限制。数值模拟则相对方便、快捷, 可以模拟分析区域边界层的变化特征。但由于边界层具有空间尺度小、时间变化快、对下垫面敏感的特点, 目前数值模拟效果不能尽如人意(马雷鸣和鲍旭炜, 2017; 刘梦娟等, 2018; 许鲁君等, 2018; Buban et al, 2019; Simon et al, 2019)。

资料同化是改进数值模拟结果的重要途径(官元红等, 2007; 朱国富, 2015a, 2020), 而同化效果的好坏则取决于使用的方法和资料。目前常见的同化方法有三维变分法(Lorenc, 1986; 庄照荣等, 2021)、四维变分法(朱国富, 2015b; Nalamasu et al, 2021)以及卡尔曼滤波法(Kalman, 1960; Kalman and Bucy, 1961; 范峥等, 2019)等(陈东升等, 2004; 朱国富, 2015c)。其中, 三维变分法相对合理、实现较为容易, 并且考虑了变量之间、空间点之间的相关性(陈焕盛等, 2020), 发展较为成熟, 得到了广泛的应用(李昕等, 2016; 谭晓伟等, 2016; 万晓敏等, 2019; 陈锋等, 2020)。除了选择合适的同化方法, 用于同

化的资料选取也尤其重要。目前可以进入同化系统的资料较为丰富, 有卫星、雷达、自动站、探空数据等。这些资料中, 卫星获得的大气观测数据存在定位、反演误差等问题(薛纪善, 2009), 且在边界层内分辨率不高, 不能够很好地描述边界层的细微结构; 雷达获取的大气观测数据种类单一(蔡嘉仪等, 2020), 不包含对模拟较为重要的温度及湿度数据; 自动站观测数据只覆盖了最靠近地表的一层, 没有垂直方向的数据, 不能描述边界层的空间结构。相比之下探空资料在边界层内数据种类丰富、质量稳定可靠, 可以用于分析边界层各气象要素的时空变化特征(姚爽, 2014; 李庆雷等, 2018)。但目前探空资料的观测时间 1 天最多 4 次, 观测站点之间距离为百千米量级, 更适用于大(中)尺度的天气系统研究(Faccani et al, 2009; Agustí-Panareda et al, 2010; Hattori et al, 2016; 高笃鸣等, 2018; 王丹等, 2019), 无法准确捕捉到小(微)尺度以及边界层的物理变化过程, 不能满足边界层模拟的需要, 若想针对边界层进行研究则需要更高时空分辨率的观测资料。而本文使用的加密探空资料时间分辨率为 3 h, 站点之间空间水平分辨率为 20 km, 较前文探空资料的时空分辨率更高, 且其垂直层数密集, 既继承了探空资料数据质量好、要素全、观测量可以直接应用于同化系统的优点, 又通过时空上的加密观测有效克服了观测时次少、站点距离远的缺点, 更有利于对边界层模拟结果的改进。

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, 利用 WRF V3. 9. 1 模式和 WRF 三维变分同化(Weather Research and Forecasting - Three-Dimensional Variational Data Assimilation, WRF-3DVar)系统, 对北京地区的大气

边界层进行数值模拟试验,研究加密探空资料同化对北京地区边界层数值模拟的影响。

1 数据与试验设置

1.1 加密探空资料介绍与处理

本文同化系统所使用的加密探空资料为2016年8月28日08时(北京时,下同)至9月2日08时在北京市宝联(海拔高度为52 m)、朝阳(海拔高度为35 m)和大兴(海拔高度为35 m)同时进行观测试验的探空气球观测资料,探空气球上所搭载的是南京信息工程大学自主研发的大气边界层GPS探测系统,可获取的数据有时间、经纬度、海拔高度、温度、相对湿度、气压、风速和风向。经与目前较为先进的探空系统Vaisala RS92探空仪比对,GPS-BL系统所测得的温度、气压、相对湿度、风速、风向的系统偏差分别为 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 0.20 hPa 、 1.17% 、 $0.16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 -1.27° ,均远小于探测误差要求。经检验,该系统数据误差基本满足正态无偏(韩彦霞等,2017),符合三维变分同化对于观测的基本假定。该加密探空资料的加密性体现在:(1)空间水平加密:各观测站点间的距离约为20 km左右,较常规加密探空站点具有更高的空间水平分辨率。(2)空间垂直加密:探空仪的采样时间分辨率为1 s,气球在低空的平均升速

为 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。经统计,该资料在2 km高度以下有约900组数据,能够非常好地反映大气边界层的精细结构特征,具有较高的空间垂直分辨率。(3)观测时次加密:观测试验于每日的02、05、08、11、14、17、20和23时进行,每3 h一次,一天8次,能更好地抓取大气边界层的变化特征,较常规加密探空资料具有更高的时间分辨率。

经气候极值检查、内部一致性检查、时间一致性检查以及拉伊达准则检查等一系列质量控制(钱媛,2019)及与北京市南郊气象观象台(海拔高度为32.2 m)的L波段常规探空系统数据对比,加密探空资料具有较高可信度与准确度。另外,在进入同化系统之前,为避免加密探空资料垂直方向数据过密而产生代表性误差(马旭林等,2019),对其采用匹配模式层稀疏化方法(李庆雷等,2018)稀疏,经检验,稀疏化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。

1.2 试验个例背景介绍

本次试验的模拟时间段内北京主要受高压均压场天气形势影响,观测站点边界层结构存在明显的昼夜变化特征。如图1所示,白天(14时)边界层内温度随高度的增加逐渐降低,递减率约为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,在2100 m高度上,相对湿度迅速由53%降低为38%,风速由 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速递减至 $2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

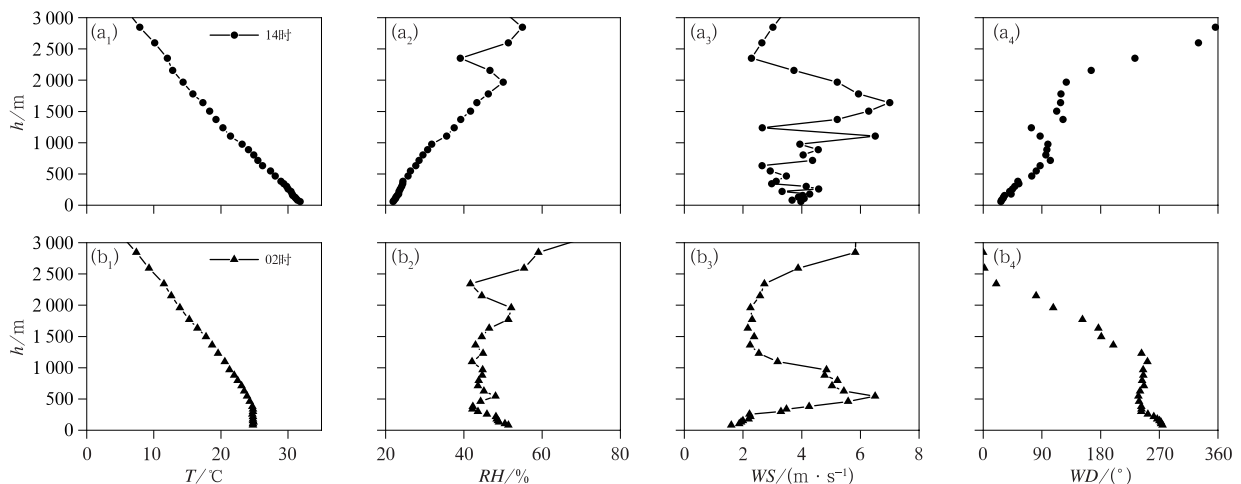


图1 2016年8月(a)29日14时,(b)30日02时宝联站大气边界层内气象要素廓线分布

(下角1~4:1.温度;2.相对湿度;3.风速;4.风向)

Fig. 1 Distribution of meteorological elements in atmospheric boundary layer at Baolian Station at

(a) 14:00 BT 29, (b) 02:00 BT 30 August 2016

(bottoms 1-4: 1. T, 2. RH, 3. WS, 4. WD)

风向逐渐由东风顺转为北风,边界层高度较高,约为 2100 m。夜晚(02 时)在地面至 400 m 高度处大气层结稳定,有贴地逆温出现,逆温强度较小,相对湿度逐渐减小,风速逐渐增大至 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向由西风逐渐逆转为西南风,400~1200 m 高度范围内,温度随高度的增加而递减,递减率约为 $4 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$,相对湿度在 40%~50%波动,风速在 500 m 处有最大值 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后逐渐递减为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向保持为西南风。

1.3 中尺度模式和同化方案

此次模拟使用完全可压缩的中尺度非静力模式 WRF V3.9.1,网格使用荒川 C 网格。模式使用 NCEP/FNL (National Center for Environmental Prediction, Final Operational Global Analysis Data) 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。模拟时间段为 2016 年 8 月 28 日 20 时至 30 日 14 时,其中前 12 h 为模式的 spin-up 阶段。模式使用兰伯特投影,模拟区域如图 2a 所示,采用三层嵌套,最外层区域的中心为 35°N 、 117°E 。三层区域的格点数(东西×南北)分别为 364×364 , 346×346 , 400×400 ,水平分辨率由外到内分别为 9、3 和 1 km。模式最内层区域的地形高度及加密探空观测站点分布如图 2b 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。为描述边界层的精细结构特征,垂直方向分为上疏下密的不等距 50 层,其中 2 km 以下有 25 层。模式的参数化方案见表 1。

本文采用 WRF-3DVar 系统对加密探空资料进行同化,同化分析时刻为 8 月 29 日 14 时,同化要素有:温度、气压、相对湿度、纬向风、经向风。将 WRF 最内层区域模拟预报 6 h 后的预报场作为 WRF-3DVar 系统的背景场,引入稀疏化后的加密探空资

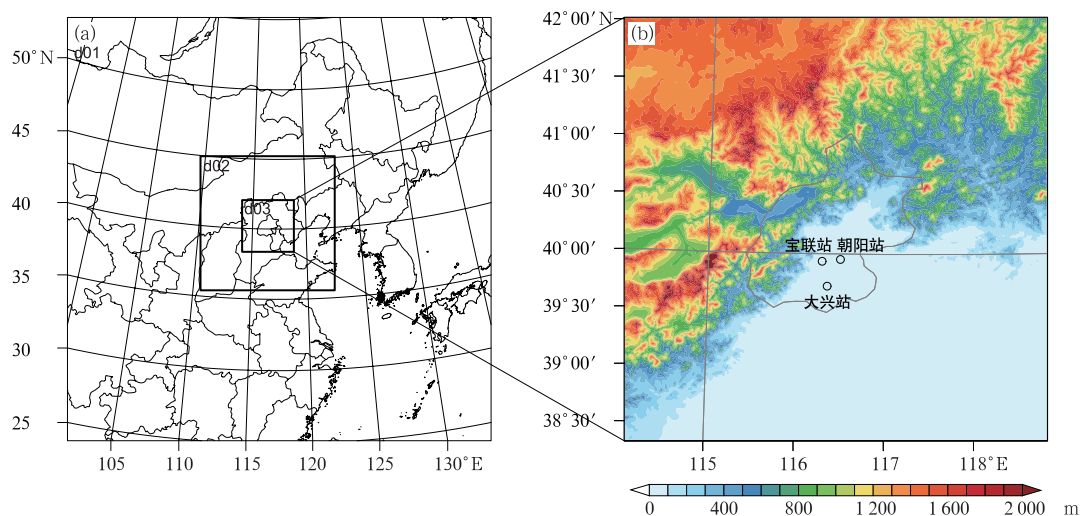


图 2 模式区域:(a)嵌套区域,(b)最内层区域地形高度及站点分布
Fig. 2 Model domain: (a) nested area, (b) topographic height and station distribution in the innermost area

表 1 模式物理方案

Table 1 Model physics schemes

物理参数化方案	参数设置
微物理参数化方案	Lin 方案
长波辐射方案	RRTM 方案
短波辐射方案	Dudhia 方案
近地层方案	Monin-Obukhov 方案
陆面过程参数化方案	Noah 方案
城市冠层方案	UCM 方案
边界层参数化方案	ACM2 方案
积云参数化方案	Grell 3D 方案(只针对外面 2 层模拟区域)

料,同化得到分析场后作为 WRF 模式新的初始场继续积分 24 h,作为同化试验(以下简称 DA);未同化而继续积分 24 h 的模拟作为控制试验(以下简称 CTL)。两组试验均采用相同的动力、物理过程及相同的时间积分步长。

背景场误差协方差(background error covariance, **B**)矩阵在变分同化中起着至关重要的作用:它决定着观测值订正到背景场的程度、控制信息从观测位置向四周传播的方式,还关系到模式变量之间

在动力上是否协调一致(曾腊梅,2014;夏雪,2016)。**B**矩阵的三维空间结构特征与数值模式分辨率、天气情况、地理地形等相关,由于大气边界层模拟对空间的垂直、水平分辨率要求较高,且北京市的地形起伏大、下垫面复杂,经试验 WRF-3DVar 系统自带的 **B** 矩阵不适用,因此本文利用 WRF 模式一个月(2016年8月12日至9月11日)的逐日预报结果,采用 NMC(the National Meteorological Center, USA)方法(陈耀登等,2016)得到了适用于本次模拟区域的 **B** 矩阵(简称 CV5-本地)。

2 数值试验结果

2.1 单点单变量观测同化试验

为考察 WRF-3DVar 系统参数设置的正确性以及 CV5-本地的准确性,首先进行单点观测的理想试验。本文将单点观测(图 3 中黑点位置)放在区域中心,即在南北方向第 200 个格点、东西方向上第 200 个格点、垂直层第 30 层(约 3500 m)格点处,分

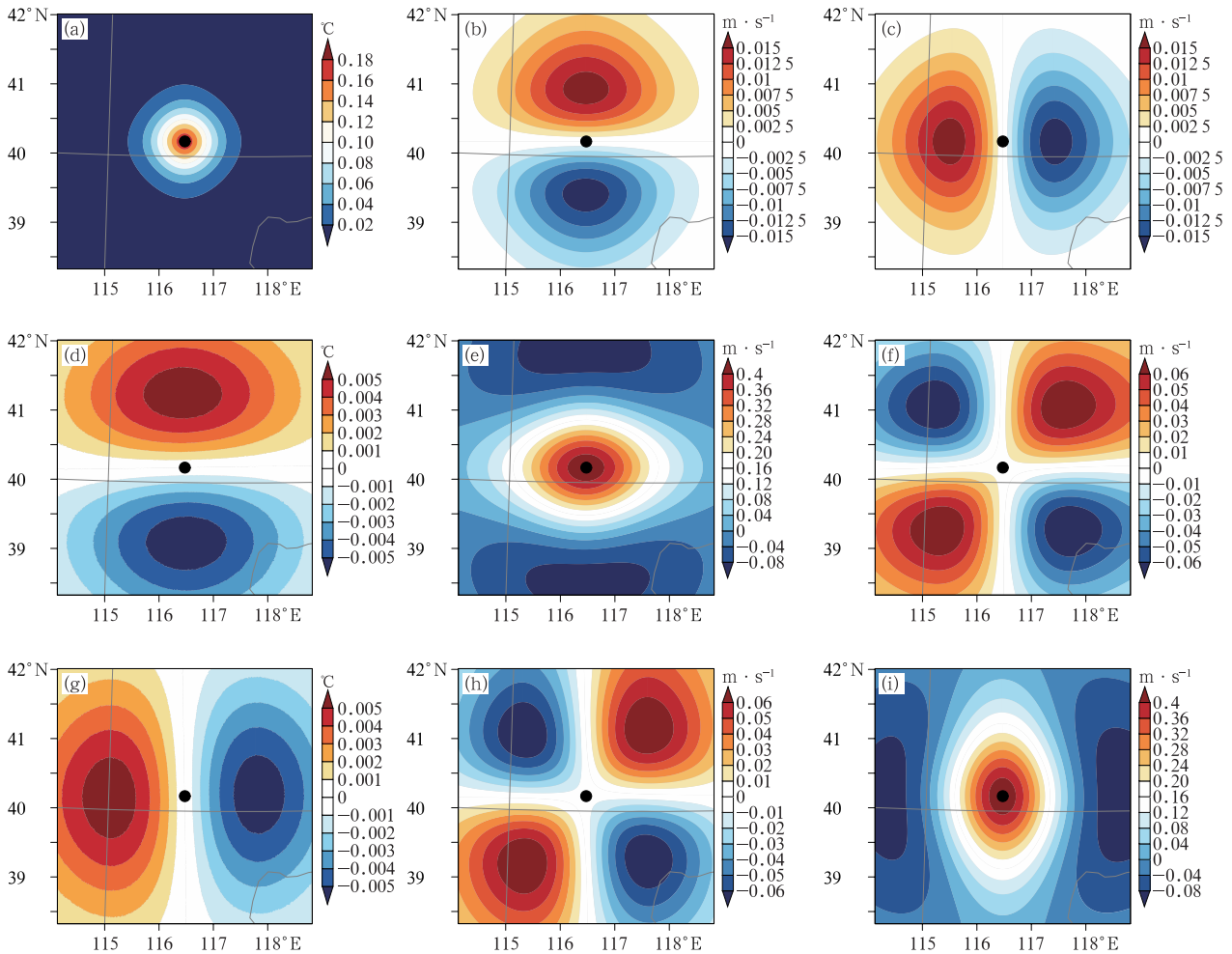


图 3 单点观测理想试验分析增量

(图表示观测变量对分析变量的影响:从上到下的观测变量分别为温度、纬向风、经向风;从左到右的分析变量分别为温度、纬向风、经向风;黑点为单点观测所在位置)

Fig. 3 Horizontal distribution of analysis increments for single observation test

(Fig. 3 represents effect of observed variables on analysis variables.

The observed variables from top to bottom are temperature, zonal wind, meridional wind;

The analysis variables from left to right are temperature, zonal wind, meridional wind;

The black dot is the position of single point observation)

别对温度、纬向风和经向风进行单点观测理想试验,三者给定的单点观测增量分别为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,观测误差分别为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 3 给出了上述 3 个单点单变量的同化分析增量的平面分布,其中每一行表示同一观测变量分别对三个分析变量的影响。以温度这一观测变量为例(图 3a,3b,3c),图 3a 是温度场,分析增量呈自内向外逐渐递减的圆环分布,分析增量极值中心与单点观测位置完全重合;图 3b 是纬向风场,通过地转平衡关系形成了区域上半部为西风、下半部为东风的分布,正负增量的分布及数值大小以单点观测所在纬线为轴南北对称;图 3c 是经向风场,通过地转平衡关系形成了区域左半部分为南风、右半部分为北风的分布,正负增量的分布及数值大小以单点观测所在经线为轴东西对称。上述分析增量完全符合理论模型,且观测变量为纬向风(图 3d,3e,3f)、经向风(图 3g,3h,3i)时也符合,这与马旭林等(2009)所做单点观测理想试验得到的单点观测分析增量的分布形态相一致,表明本文的系统参数设

置和 CV5-本地能够准确、合理地反映多变量之间的相互作用关系。

2.2 分析场诊断

2.2.1 气象要素垂直廓线分析

各气象要素的同化背景场(BK)、同化所得分析场(ANA)及相应观测数据(OBS)的垂直廓线分布如图 4 所示。温度的背景场与观测在地面至 3000 m 高度均相差 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,同化后的分析场与观测廓线基本重合,说明同化后可以明显改善背景场的结果。与温度类似,位温的背景场与观测相差 4 K 左右,同化后的分析场较背景场更接近观测,特别是在 1500 m 以下分析场的廓线与观测基本重合,体现了同化加密探空资料对边界层内大气热力结构改进的正效果。相对湿度的背景场、分析场在地面至 1500 m 高度与观测基本重合,1500~3000 m 分析场更接近观测,其中 1500~2200 m 高度背景场较观测偏高 5%、分析场较观测偏低 5%,虽然分析场没有介于观测与背景场之间,但也属于正常现象,在前人研究

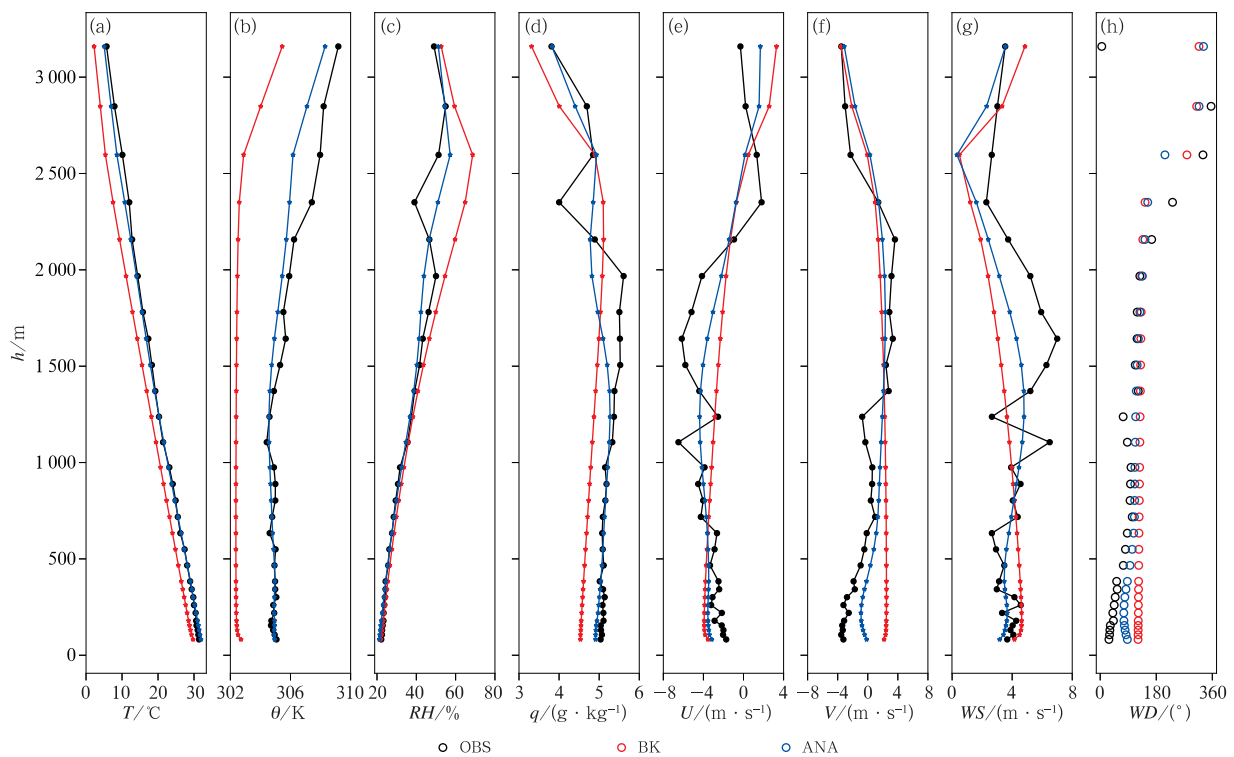


图 4 2016 年 8 月 29 日 14 时宝联站各气象要素的观测数据(OBS)、同化背景场(BK)和分析场(ANA)的垂直廓线分布

(a) 温度, (b) 位温, (c) 相对湿度, (d) 比湿, (e) 纬向风, (f) 经向风, (g) 风速, (h) 风向

Fig. 4 Vertical distribution of observation (OBS), background (BK) and analysis (ANA) of meteorological elements at Baolian Station at 14:00 BT 29 August 2016

(a) T , (b) θ , (c) RH , (d) q , (e) U , (f) V , (g) WS , (h) WD

中也普遍存在(姚爽, 2014)。比湿的分析场较背景场更接近观测, 其中 1500 m 以下分析场与观测基本重合, 明显优于背景场, 这与加密资料同化对大气热力状态的调整有关。纬向风、经向风、风速从地面至 3000 m 高度的变化中, 观测的波动较大, 背景场和分析场波动较小, 且分析场较背景场与观测更接近。风向的背景场在近地面处与观测相差近 130° , 分析场位于两者之间且偏向于背景场; 地面至 200 m 高度, 背景场风向逐渐接近观测风向, 分析场风向则迅速接近观测风向(至模式第 5 层与观测仅相差 30°), 这与经向风同化后的修正作用有关; 200 m 以上高度分析场与背景场继续接近观测, 至 800 m 背景场、分析场风向与观测基本重合且分析场符合得更好。综上, 从各气象要素廓线来看, 同化加密探空资料后分析场较背景场更接近观测值, 更能表现边界层真实大气的热力与动力状态, 体现出了同化的正效果。鉴于 3 个站点结果类似, 为避免重复及篇幅限制, 本文以宝联站为例进行分析。

2.2.2 剖面分析

分析加密探空资料同化在垂直剖面上的影响对

大气边界层的模拟尤为重要。图 5 给出了温度在沿宝联站所在位置东西方向、南北方向所在剖面上的分布情况。由图可知, 东西方向上背景场(图 5a)温度呈西高东低的特征分布, 地面温度最大值在 28°C 左右, 地面至 1500 m, 城市中心的温度较周围高, 体现了较弱的城市热岛效应。同化后的分析场(图 5b)的温度分布特征与背景场相同, 但数值整体上升了 2°C 左右, 且宝联、朝阳、大兴三个站点形成区域的温度要明显高于周围, 在边界层范围内均有体现, 城市热岛效应更明显。分析增量(图 5c)大于 2°C 的水平影响半径为 40 km, 增量大于 1°C 的水平影响半径为 80 km, 垂直方向上地面至 600 m 和 1700~3000 m 存在增量的极值中心, 这与前面的宝联站温度垂直廓线相一致, 600~1700 m 除站点所在位置外其他区域增量为 1°C 左右, 这主要是由于这一高度的背景场与观测之差较其他高度小所导致。南北方向上结果与东西方向上相似, 分析场(图 5e)的温度亦较背景场(图 5d)整体上升, 体现出较强的城市热岛效应。需要指出的是, 南北方向上增量高于 1°C 的水平影响半径为 100 km, 较东西方向

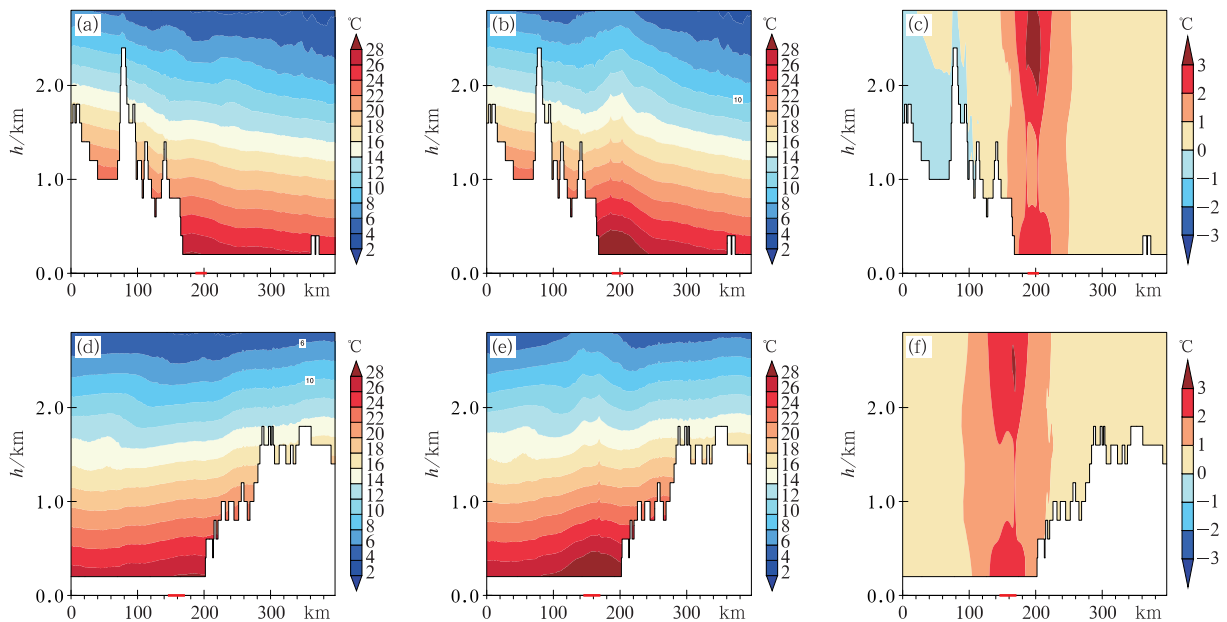


图 5 2016 年 8 月 29 日 14 时温度在沿宝联站所在位置(a, b, c)东西方向, (d, e, f)南北方向垂直剖面上的分布
(a, d)背景场, (b, e)分析场, (c, f)分析增量场
(横坐标红线区域为观测站点所形成区域, 下同)

Fig. 5 Vertical distribution of temperature along (a, b, c) latitudinal direction and (d, e, f) longitudinal direction along the location of Baolian Station at 14:00 BT 29 August 2016
(a, d) background, (b, e) analysis, (c, f) analysis increment
(The red line means the area of the three observation stations, the same below)

上大,这是由于 3 个探空站的南北距离较东西距离大而导致,也进一步说明了参与同化站点分布这一因素对同化效果的重要性。

由于相对湿度、纬向风、经向风在沿宝联站所在位置东西、南北方向垂直剖面上的分布类似,故本文以东西方向上的结果为例进行分析。如图 6 所示,相对湿度的分析场与背景场的分布基本一致,纬向风和经向风的分析场与背景场相差较大。相对湿度分析增量(绝对值大于 10%)的水平影响半径(图 6c)较温度(图 5c)小,只有不到 40 km,垂直方向上也较小,体现出了相对湿度相关尺度较小的特征。纬向风与经向风的分析增量受地形影响较大,增量位于近地面部分有较大的扰动,其中经向风

在地面附近的增量尤其明显,结合图 4 的风向廓线可知,与该时刻风向为偏北风有关。另外,纬向风、经向风的分布特征与地形有很大关联,这些很好地解释、印证了地形较为复杂地区风速模拟不准确这一现状。

2.2.3 各气象要素统计量对比

分别将 2 km 高度以下 3 个站气象要素的背景场、分析场结果与观测对比,计算出 3 个站的均方根误差与相关系数的均值,得出关于位温、比湿、纬向风、经向风,风速的泰勒图,如图 7 所示。由图可知,图中蓝点居多,有 5 个,红点只有 4 个(未出现的点相关系数为负),同一数字蓝点均位于红点的左下方,表明分析场的各要素与观测相关性更好,且分析

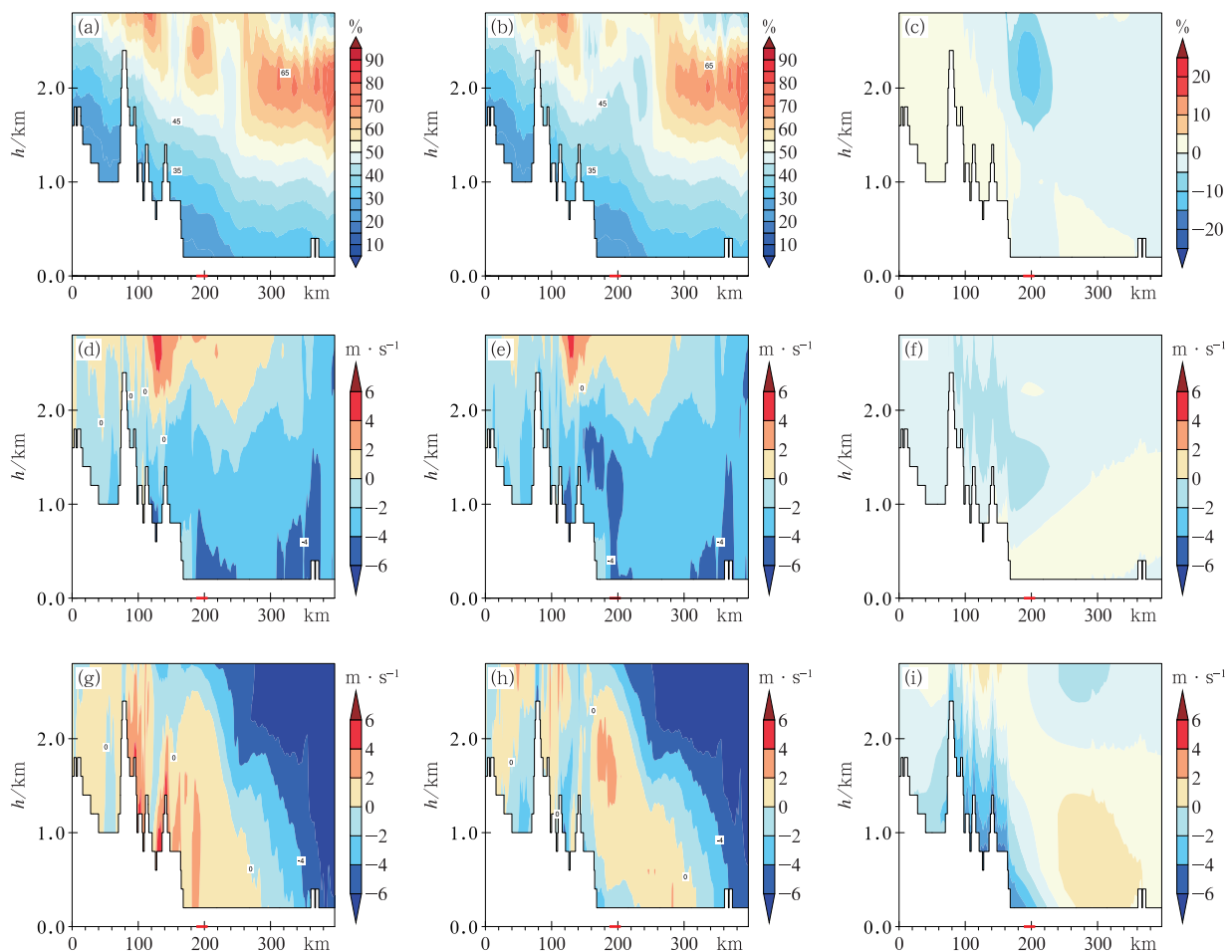


图 6 2016 年 8 月 29 日 14 时(a,b,c)相对湿度,(d,e,f)纬向风,(g,h,i)经向风在沿宝联站所在位置东西方向垂直剖面上的分布(a,d,g)背景场,(b,e,h)分析场,(c,f,i)分析增量场

Fig. 6 Vertical distribution of (a, b, c) relative humidity, (d, e, f) zonal wind, (g, h, i) meridional wind along latitudinal direction of Baolian Station at 14:00 BT 29 August 2016 (a, d, g) background, (b, e, h) analysis, (c, f, i) analysis increment

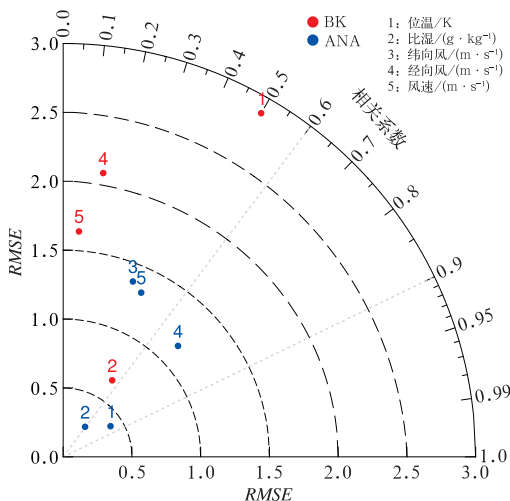


图 7 2016 年 8 月 29 日 14 时背景场、分析场的位温、比湿、纬向风、经向风、风速的泰勒图
(红点:背景场;蓝点:分析场;弧度坐标:相关系数;数字:气象要素)
Fig. 7 Taylor diagrams of potential temperature, specific humidity, zonal wind, meridional wind, and wind speed of background and analysis at 14:00 BT 29 August 2016
(red dot: background; blue dot: analysis; radian coordinate: correlation coefficient; number: meteorological element)

场的均方根误差均小于背景场,即分析场与观测更接近。从数值上来看,位温、比湿、纬向风、经向风、风速的背景场均方根误差(RMSE)分别为 2.88 K、 $0.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,分析场 RMSE 分别为 0.41 K 、 $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,各变量的分析场 RMSE 较背景场分别缩小了 86%、59%、24%、44%、19%,其中位温的 RMSE 减小最多,其次是比湿,表明加密探空资料同化对边界层内大气热力状态与湿度状态的较强改进作用。

2.3 预报场效果分析

2.3.1 气象要素垂直廓线比较

图 8 为 2016 年 08 月 29 日 17 时(积分 3 h)、20 时(积分 6 h)宝联站各气象要素的观测数据、CTL 试验和 DA 试验的垂直廓线分布。由图 8a 可知,DA 试验的 3 h 预报场模拟效果依旧略好于 CTL 试验(尤其 2500 m 以下),温度廓线虽然两个试验结果非常接近且与观测均有较大差距,但是位温廓线 DA 试验的模拟情况仍略好于 CTL 试验;相对湿度 2400 m 以下两个试验结果均比较接近观测,2400~

3000 m,CTL 试验与观测较为接近,DA 试验与观测逐渐偏离,偏离最多处(2800 m 高度)较观测多 16%左右,从比湿来看,CTL 试验与观测在整个边界层内均偏低 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,而 DA 试验虽没有表现出观测的细小变化特征但与观测符合得很好。纬向风两个试验均与观测符合得比较好,尤其是 DA 试验在 1250 m 以下、2000~3000 m 与观测更为接近;经向风在整个边界层内两个试验结果都较观测偏大,CTL 试验更接近观测;受经向风的模拟偏大情况影响,风速在整个边界层内两个试验结果都较观测偏大,CTL 试验更接近观测;风向在边界层内两个实验与观测基本符合,未有较大差异。从 6 h 预报场(图 8b)来看,加密探空资料同化有少量正效果,有也少量负效果。两个试验的温度廓线和位温廓线在地面至 700 m 高度 CTL 试验较 DA 试验更接近观测,在 700~3000 m 高度两个试验结果非常接近且与观测均有所差距;相对湿度和比湿在 1000 m 以下高度 DA 试验结果比较接近观测,边界层内 1000 m 高度以上,CTL 试验与观测符合得很好,DA 试验略差。风由于其特殊的物理属性模拟结果没有温度那么稳定,两个试验均与观测有所差异。综上,加密探空资料同化的 3 h 预报场可以较好地延续分析场的热力结构和水汽结构上的同化正效果,改进模式的预报情况;6 h 预报场的改进情况较 3 h 预报场有所减弱;边界层内动力结构的改进作用不明显,这可能与北京市地形、模式的参数化方案等有关,有待进一步研究。

2.3.2 温度剖面图比较

29 日 15、16、17、20 时温度在沿宝联站所在位置东西方向垂直剖面上的分布如图 9 所示。由图可知,15 时(积分 1 h)CTL 试验中(图 9a)宝联站(第 187 个格点位置)附近的地面温度在 $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,地面至 1500 m,城市中心的温度较周围高,体现了较弱的城市热岛效应;DA 试验(图 9b)的温度分布特征与 CTL 试验相同,但宝联、朝阳、大兴三个站点所形成区域的温度要明显高于 CTL 试验,在边界层高度范围内均有体现,城市热岛效应更明显,该时刻的温度分析增量(图 9c)强度最大值为 $1 \sim 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,增量大于 $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水平影响半径为 60 km,较分析场有所减弱,范围和强度均有所减少。16 时(积分 2 h)温度的增量强度和范围都较 15 时的弱,且增量高值中心水平方向向西略微偏移、垂直方向向 1500 m 高度处集中,在模拟区域边界处增量基本消失。17 时

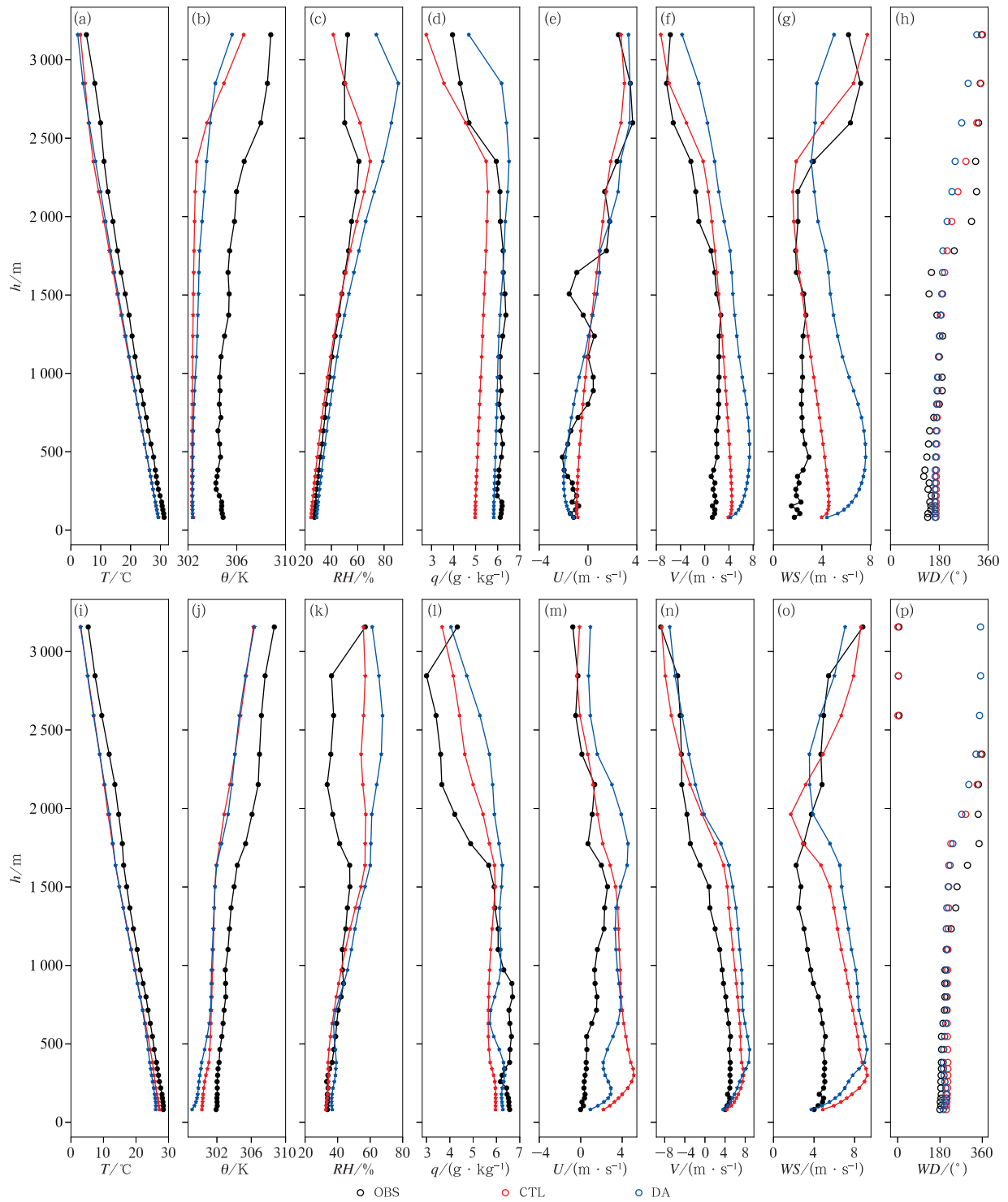


图 8 2016 年 8 月 29 日(a~h)17 时和(i~p)20 时宝联站各气象要素的观测数据(OBS)、CTL 试验(CTL)和 DA 试验(DA)的垂直廓线分布
(a, i) 温度, (b, j) 位温, (c, k) 相对湿度, (d, l) 比湿, (e, m) 纬向风, (f, n) 经向风, (g, o) 风速, (h, p) 风向

Fig. 8 Vertical distribution of observation (OBS), CTL test (CTL) and DA test (DA) of meteorological element at Baolian Station at (a-h)17:00 BT and (i-p) 20:00 BT 29 August 2016

(a, i) T , (b, j) θ , (c, k) RH , (d, l) q , (e, m) U , (f, n) V , (g, o) WS , (h, p) WD

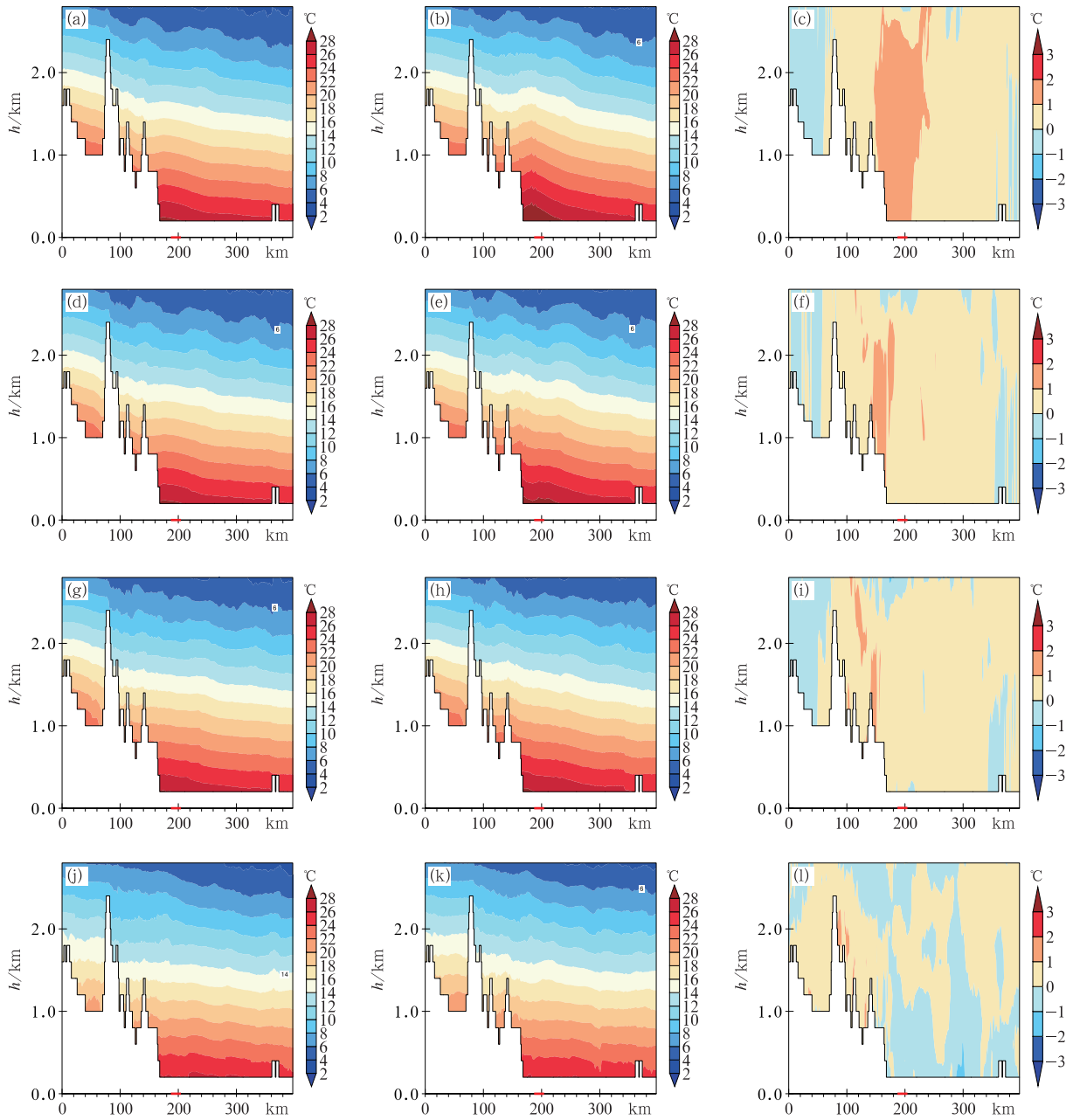


图 9 2016 年 8 月 29 日(a,b,c)15 时,(d,e,f)16 时,(g,h,i)17 时,(j,k,l)20 时温度在沿宝联站所在位置东西方向垂直剖面上的分布 (a,d,g,j)CTL 试验,(b,e,h,k)DA 试验,(c,f,i,l)增量场

Fig.9 Vertical distribution of temperature along latitudinal direction of Baolian Station

(a, b, c) 15:00 BT, (d, e, f) 16:00 BT, (g, h, i) 17:00 BT, (j, k, l) 20:00 BT 29 August 2016

(a, d, g, j) CTL, (b, e, h, k) DA, (c, f, i, l) incremental field

(积分 3 h) 的温度增量强度和范围继续减少, 只剩一些细小、分散的特征。随着模式积分时间的不断增加, 温度增量的强度和范围继续减少, 至 20 时(积分 6 h), 由图 9l 可知此时预报场中已经基本没有明显的正增量, 且近地面出现了负增量, 表明同化效果几乎消失。综上可得, 加密探空资料同化可以将温

度偏低的背景场进行一定程度上的调整, 但由于资料站点个数较少, 对背景场的调整范围较小, 随着模式积分时间的增加, 同化作用的范围及大小逐渐减弱, 在模式积分 6 h 后基本消失。

2.3.3 预报效果随时间的变化情况

分别将两次试验各时刻气象要素 2 km 以下的

模拟结果与观测数据对比,计算 3 个站的平均均方根误差和平均相关系数,得出关于位温、比湿、纬向风、经向风、风速随时间变化的泰勒图。如图 10 所示,位温的相关系数(0.90~1.00)最高,比湿(0.80

~0.95)次之,纬向风、经向风、风速由于其自身的属性及变化特性而相关系数较小,与理论实际相符。从均方根误差来看,DA 试验的前 6 h 位温预报场(图 10a)较 CTL 试验均方根误差更小,更接近实

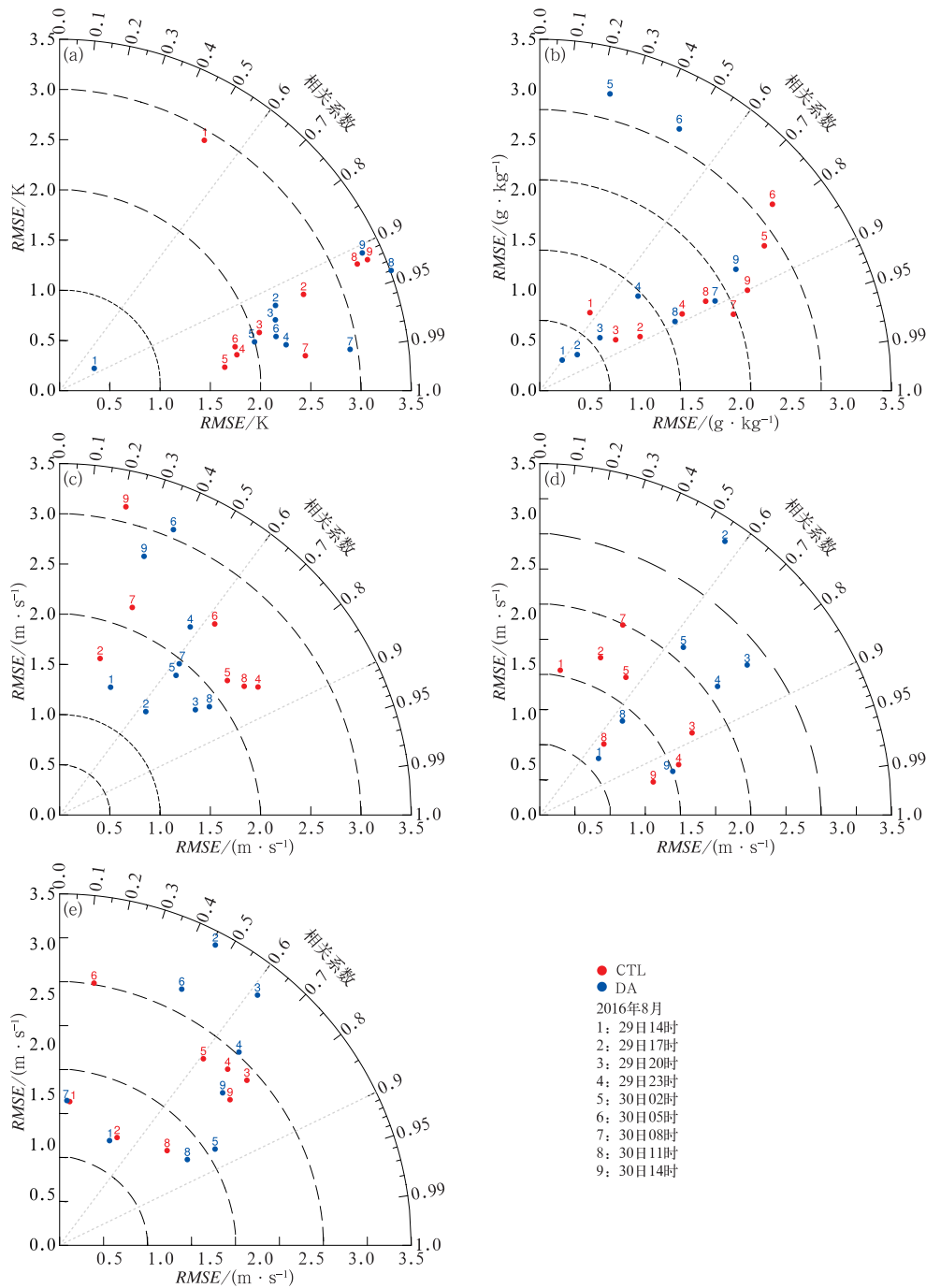


图 10 两组试验各时次(a)位温,(b)比湿,(c)纬向风,(d)经向风,(e)风速的泰勒图
(红点:CTL 试验;蓝点:DA 试验;弧度坐标:相关系数;数字:时间)

Fig. 10 Taylor diagrams of (a) θ , (b) q , (c) U , (d) V , and (e) WS at each time of the two tests

(red dot: CTL test; blue dot: DA test; radian coordinates: correlation coefficient; number: time)

况,之后两个试验结果相差不大。DA 试验的比湿(图 10b)均方根误差在各模拟时刻均小于 CTL 试验,与观测更接近,表明同化对边界层湿度状态的调整可以持续相对较长时间,这与湿度的相关尺度较小特征有关。纬向风(图 10c)CTL 试验的时刻 1 和时刻 3 结果的相关系数为负未出现在图中,其时刻 6 的均方根误差较 DA 试验小,其余时刻 DA 试验的均方根误差均小于 CTL 试验,即 DA 试验与实况差距更小。经向风(图 10d)除时刻 1 外,其余时刻 CTL 试验的均方根误差均小于 DA 试验,表示同化在分析场改进作用明显但随着模式的积分同化效果快速消失,CTL 试验更接近实况。风速(图 10e)在时刻 1、时刻 5、时刻 7、时刻 9 中均是 DA 试验更接近观测,其余时刻 CTL 试验更接近观测。综上可得,对于边界层内大气热力状态的模拟,DA 试验的前 6 h 预报场模拟得更好;对于边界层内大气湿度状态的模拟,DA 试验在所有时刻均模拟得更好,同化效果持续时间亦较长;对于边界层内大气动力特征的模拟,纬向风 DA 试验模拟得较好,经向风和风速两个试验均有优劣,这与风的自身属性、北京市的复杂地形有关。另外,加密探空资料站点个数在空间水平方向上比较少也是导致同化在分析场的改善作用明显但是效果难以持续较长时间的原因之一。

3 结论与讨论

通过以上分析,得到以下主要结论:

(1)加密探空资料同化形成的分析场较背景场更接近观测结果。温度的分析场城市热岛效应更明显,同化后更能表现边界层内真实大气的热力状态;受温度改进的影响,边界层的湿度状态(尤其是比湿)改进较多;纬向风与经向风的分析增量在近地面受地形影响较大,体现了大气的动力特征。位温、比湿、纬向风、经向风、风速分析场的均方根误差分别较背景场的减少了 86%、59%、24%、44%、19%,体现出了同化的较强修正作用。

(2)加密探空资料同化的预报效果在模式积分 6 h 内最好,之后同化作用的大小及范围逐渐减弱。对于边界层内大气热力状态的模拟,加密探空资料同化对前 6 h 预报场模拟结果改进较多;对于边界层内大气湿度状态的模拟,加密探空资料同化对预报时间段的模拟结果均有改进,同化效果持续时间

较长;对于边界层内大气动力特征的模拟,加密探空资料同化后对纬向风模拟结果改进明显,对经向风和风速的改进稍弱,这与风的自身属性、北京市的复杂地形有关。另外,加密探空资料的站点数在空间水平方向上比较少也是导致同化在分析场的改善作用明显但是效果难以持续较长时间的原因之一。

综上所述,加密探空资料可以获得更丰富的大气边界层观测信息,其同化后能够进一步改善模式初始场,在一定程度上提高边界层模拟结果的准确度。虽然本文得到了一些有重要意义的结论,但只是对边界层模拟结果的改善做了初步的尝试。本文仅基于加密探空资料的空间加密性进行了同化试验,利用其时间加密的优势进行循环同化模拟试验是下一步研究的重点。

致谢:感谢马旭林老师的悉心指导以及南京信息工程大学高性能计算机中心的计算支持。

参考文献

- 蔡嘉仪,苗世光,李炬,等,2020. 基于激光云高仪反演全天边界层高度的两步曲线拟合法[J]. 气象学报,78(5):864-876. Cai J Y, Miao S G, Li J, et al, 2020. A two-step ideal curve fitting method for retrieving full-day planetary boundary layer height based on ceilometer data[J]. Acta Meteor Sin, 78(5):864-876 (in Chinese).
- 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).
- 陈锋,董美莹,苏涛,等,2020. 雷达资料同化对一次浙江初春罕见飑线过程数值模拟的影响分析[J]. 气象,46(4):462-477. Chen F, Dong M Y, Su T, et al, 2020. Influence of radar data assimilation on the numerical simulation of a rare squall line in Zhejiang Province in early spring[J]. Meteor Mon, 46(4):462-477 (in Chinese).
- 陈焕盛,王文丁,田敬敬,等,2020. 三维变分在 PM_{2.5} 重污染数值模拟中的应用研究[J]. 中国环境监测,36(2):64-74. Chen H S, Wang W D, Tian J J, et al, 2020. Application of three-dimensional variational data assimilation on simulation of PM_{2.5} heavy pollution[J]. Environ Monitor China, 36(2):64-74 (in Chinese).
- 陈耀登,陈晓梦,闵锦忠,等,2016. 各向异性背景场误差协方差构建及在“凡亚比”台风的应用[J]. 海洋学报,38(9):32-45. Chen Y D, Chen X M, Min J Z, et al, 2016. Anisotropic background error covariance modelling and its application in Typhoon Fanapi[J]. Acta Oceanol Sin, 38(9):32-45 (in Chinese).
- 范峥,李宏,刘向文,等,2019. 基于局地集合变换卡尔曼滤波的全球海洋资料同化系统设计及算法加速[J]. 地球科学进展,34(5):531-539. Fan Z, Li H, Liu X W, et al, 2019. Global ocean data assimilation system design and algorithm acceleration based on

- local ensemble transform Kalman filter[J]. *Adv Earth Sci*, 34(5):531-539(in Chinese).
- 高笃鸣,李跃清,程晓龙,2018. 基于西南涡加密探空资料同化的一次奇异路径耦合低涡大暴雨数值模拟研究[J]. *气象学报*, 76(3):343-360. Gao D M, Li Y Q, Cheng X L, 2018. A numerical study on a heavy rainfall caused by an abnormal-path coupling vortex with the assimilation of southwest China vortex scientific experiment data[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(3):343-360(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 Disaster Reduction Res*, 30(4):1-8(in Chinese).
- 韩彦霞,王成刚,严家德,等,2017. 新型边界层气象探空系统的开发与应用[J]. *气象科技*, 45(5):804-810. Han Y X, Wang C G, Yan J D, et al, 2017. Development and application of new boundary layer meteorological sounding system[J]. *Meteor Sci Technol*, 45(5):804-810(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).
- 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).
- 李昕,王元,明杰,等,2016. 雷达径向风和反演风联合同化在台风灿都(2010)数值预报中的研究[J]. *气象*, 42(6):649-663. Li X, Wang Y, Ming J, et al, 2016. A combined radar data assimilation strategy of radial velocity and retrieved wind and its impact on the forecasting of Tropical Cyclone Chanthu (2010)[J]. *Meteor Mon*, 42(6):649-663(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 (2012—2017)[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(4):823-832(in Chinese).
- 刘梦娟,张旭,陈葆德,2018. 边界层参数化方案在“灰色区域”尺度下的适用性评估[J]. *大气科学*, 42(1):52-69. Liu M J, Zhang X, Chen B D, 2018. Assessment of the suitability of planetary boundary layer schemes at “grey zone” resolutions[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(1):52-69(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).
- 马旭林,郭欢,和杰,等,2019. 适应数值模式垂直坐标的GPS掩星反演资料稀疏化方案[J]. *大气科学学报*, 42(3):380-389. Ma X L, Guo H, He J, et al, 2019. A new thinning scheme of GPS occultation retrieved data for the vertical coordinates of a numerical model[J]. *Trans Atmos Sci*, 42(3):380-389(in Chinese).
- 马旭林,庄照荣,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[J]. *气象学报*, 67(1):50-60. Ma X L, Zhuang Z R, Xue J S, et al, 2009. Development of 3-D variational data assimilation system for the nonhydrostatic numerical weather prediction model-GRAPES[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(1):50-60(in Chinese).
- 孟丹,陈正洪,陈城,等,2019. 基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J]. *气象*, 45(12):1756-1761. Meng D, Chen Z H, Chen C, et al, 2019. Research on wind changes at different heights in atmospheric boundary layer based on sounding wind data[J]. *Meteor Mon*, 45(12):1756-1761(in Chinese).
- 宁志远,刘厚凤,2017. 大气边界层的国内外研究现状[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 27(2):22-25. Ning Z Y, Liu H F, 2017. Domestic and abroad research status of atmospheric boundary layer[J]. *J Environ Manag Coll China-EMCC*, 27(2):22-25(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).
- 乔梁,张强,岳平,等,2019. 由非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析[J]. *大气科学*, 43(2):251-265. Qiao L, Zhang Q, Yue P, et al, 2019. Analysis of changes in the structure of atmospheric boundary layer from non-monsoon zone to monsoon zone[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(2):251-265(in Chinese).
- 谭晓伟,徐枝芳,龚建东,2016. 风廓线雷达资料对GRAPES_MESO数值预报系统影响的初步研究[J]. *气象*, 42(1):26-33. Tan X W, Xu Z F, Gong J D, 2016. Impact of wind-profiling radar data assimilation on GRAPES_MESO model system[J]. *Meteor Mon*, 42(1):26-33(in Chinese).
- 万晓敏,龚建东,韩威,等,2019. FY-4A云导风在GRAPES_RAFS中的同化应用评估[J]. *气象*, 45(4):458-468. Wan X M, Gong J D, Han W, et al, 2019. The evaluation of FY-4A AMVs in GRAPES_RAFS[J]. *Meteor Mon*, 45(4):458-468(in Chinese).
- 王丹,徐枝芳,王瑞文,等,2019. 14:00加密探空对区域数值预报系统的影响研究[J]. *高原气象*, 38(4):872-886. Wang D, Xu Z F, Wang R W, et al, 2019. Intensive radiosonde observations at 14:00 in China mainland and their impact study on mesoscale numerical weather prediction[J]. *Plateau Meteor*, 38(4):872-886(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).
- 夏雪, 2016. 多变量相关的背景误差协方差及其对同化和预报效果的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学. Xia X, 2016. Balance characteristic of multivariate background error covariance and its impact on assimilation and forecasts[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 许鲁君, 刘辉志, 徐祥德, 等, 2018. WRF 模式对青藏高原那曲地区大气边界层模拟适用性研究[J]. *气象学报*, 76(6):955-967. Xu L J, Liu H Z, Xu X D, et al, 2018. Evaluation of the WRF model to simulate atmospheric boundary layer over Nagqu area in the Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteor Sin*, 76(6):955-967(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).
- 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).
- 姚爽, 2014. L 波段探空数据分析及在区域模式中的同化应用试验 [D]. 北京: 中国气象科学研究院. Yao S, 2014. L-band radiosonde data analysis and assimilation experiment in meso-scale model[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 曾腊梅, 2014. 背景场误差协方差模拟对资料同化及数值预报效果的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学. Zeng L M, 2014. The effects of background error covariance simulation on data assimilation and forecast [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 张宏昇, 张小曳, 李倩惠, 等, 2020. 大气边界层高度确定及应用研究进展[J]. *气象学报*, 78(3):522-536. Zhang H S, Zhang X Y, Li Q H, et al, 2020. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3):522-536(in Chinese).
- 朱国富, 2015a. 理解大气资料同化的根本概念[J]. *气象*, 41(4):456-463. Zhu G F, 2015a. Understanding of the fundamental concept of atmospheric data assimilation[J]. *Meteor Mon*, 41(4):456-463(in Chinese).
- 朱国富, 2015b. 数值天气预报中分析同化基本方法的历史发展脉络和评述[J]. *气象*, 41(8):986-996. Zhu G F, 2015b. Remarks on development of basic methods of atmospheric data assimilation for numerical weather prediction[J]. *Meteor Mon*, 41(8):986-996(in Chinese).
- 朱国富, 2015c. 理解大气资料同化的内在逻辑和若干共性特征[J]. *气象*, 41(8):997-1006. Zhu G F, 2015c. Interpretation of several basic aspects of atmospheric data assimilation[J]. *Meteor Mon*, 41(8):997-1006(in Chinese).
- 朱国富, 2020. 基于估计理论的大气资料同化引论——大气的状态估计[M]. 北京: 气象出版社. Zhu G F, 2020. *Atmospheric Data Assimilation on Basis of Estimation Theory—State Estimation for Atmosphere*[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 庄照荣, 李兴良, 陈春刚, 2021. 水平相关模型的性质及其在 GRAPES 三维变分系统中的应用[J]. *大气科学*, 45(1):229-244. Zhuang Z R, Li X L, Chen C G, 2021. Properties of horizontal correlation models and its application in GRAPES 3DVar system [J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(1):229-244(in Chinese).
- Agustí-Panareda A, Beljaars A, Cardinali C, et al, 2010. Impacts of assimilating AMMA soundings on ECMWF analyses and forecasts[J]. *Wea Forecasting*, 25(4):1142-1160.
- Buban M S, Lee T R, Dumas E J, et al, 2019. Observations and numerical simulation of the effects of the 21 August 2017 North American total solar eclipse on surface conditions and atmospheric boundary-layer evolution[J]. *Bound-Layer Meteor*, 171(2):257-270.
- Faccani C, Rabier F, Fourrié N, et al, 2009. The impacts of AMMA radiosonde data on the French Global Assimilation and Forecast System[J]. *Wea Forecasting*, 24(5):1268-1286.
- Garratt J R, Hicks B B, 1990. Micrometeorological and PBL experiments in Australia[J]. *Bound-Layer Meteor*, 50(1):11-29.
- Hattori M, Matsumoto J, Ogino S Y, et al, 2016. The impact of additional radiosonde observations on the analysis of disturbances in the South China Sea during VPRES2010[J]. *SOLA*, 12:75-79.
- Kalman R E, 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Trans ASME-J Basic Eng*, 82:35-45.
- Kalman R E, Bucy R S, 1961. New results in linear filtering and prediction theory[J]. *Trans ASME-J Basic Eng*, 83:95-108.
- Lorenc A C, 1986. Analysis methods for numerical weather prediction[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 112(474):1177-1194.
- Nalamasu N R, Shekhar M S, Singh G P, 2021. Performance of 4D-Var data assimilation on extreme snowfall forecasts over the western Himalaya using WRF model[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 57:555-571.
- Simon J S, Zhou B W, Mirocha J D, et al, 2019. Explicit filtering and reconstruction to reduce grid dependence in convective boundary layer simulations using WRF-LES[J]. *Mon Wea Rev*, 147(5):1805-1821.

(本文责编:俞卫平)