

# 华北地区一次大雾过程的三维变分同化试验<sup>\*</sup>

梁爱民<sup>1,2</sup> 张庆红<sup>1</sup> 刘开宇<sup>1,3</sup> 申红喜<sup>1,2</sup>

1 北京大学物理学院大气科学系,北京,100871

2 民航北京气象中心,北京,100621

3 民航贵阳空管中心,贵阳,550012

## 摘 要

文中采用 WRF 非静力数值预报模式及其三维变分同化系统(WRF 3D-Var),对 2006 年 1 月 13—14 日发生在华北地区及山东半岛的一次大雾过程进行了包括 GTS(Global Telecommunication System)资料、AMDAR(Aircraft Meteorological Data Relay)资料和 9210 资料的不同资料组合的三维变分同化试验,以及时间间隔分别为 6、3 和 1 h 不同时间频率的循环同化试验,并以同化分析场为初始场进行了 36 h 的模拟试验。对同化分析场和模拟结果进行了分析,分析结果表明,采用三维变分方法同化 AMDAR 等多种非常规观测资料后,分析场均有明显的改变,对雾区的模拟结果也有局部不同程度的修正。进一步分析起修正作用的原因得知同化资料后对低层的湿度和层结趋稳性有所改善。同化 GTS 资料对低层的增湿贡献明显,但对层结趋稳性贡献不大;而同化 AMDAR 资料主要使层结趋稳性明显,对增湿无贡献;9210 资料对低层湿度和层结趋稳性均有贡献。不同时间间隔的循环同化试验表明,多时次的循环同化比单时次的同化分析增量要大,逐时循环同化与 6 和 3 h 循环同化相比,可明显改善模拟效果。

**关键词:** 大雾,变分同化,数值预报,AMDAR 资料, RMSE。

## 1 引 言

数值天气预报是一个初值问题,成功的预报不仅要求模式能逼真地代表大气的运动状态而且要求初始条件也尽可能地准确<sup>[1]</sup>。经过半个世纪的发展,目前数值模式本身已趋近完善,越来越精细的数值预报模式可以相当真实地模拟出实际天气过程的发展演变;另一方面随着数值模式的发展,模式分辨率越来越高,仅用常规探测资料形成的初值已远远不能满足精细化数值预报的需求,因此,如何将越来越多的非常规资料加进数值模式,即数值模式的数据同化问题已成为数值天气预报进一步发展的关键问题,也是当前国内外的前沿性研究课题之一。

资料同化方法的发展历程是从最初的逐步订正法(SCM)、到随后的最优插值法(OI),现在普遍使用的是变分法和 Kalman 滤波法。虽然 4D-Var 同化方法和 Kalman 滤波法被认为是未来资料同化的

发展方向,但目前只有极少数一些欧美发达国家在业务中开始运行四维变分同化方法,例如欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、法国等<sup>[2]</sup>,至今没有任何国家气象中心实现 Kalman 滤波方法的业务运行。这是由于四维变分中目标泛函最小化和伴随模式的逆向积分计算量和所需存储空间巨大,集合 Kalman 滤波法的主要问题是计算量、存储空间和怎样获得模式状态误差协方差矩阵的精确初值等,其存储问题仍是主要的限制。而三维变分是一种对计算机资源要求相对较低,容易业务化的资料同化方法,因此,各国气象业务系统中仍以此作为资料同化的主要途径,中国气象局目前发展的三维变分同化系统 GRAPES 3D-Var<sup>[3]</sup>已经在科学研究和业务预报中得到广泛应用<sup>[4]</sup>。相对而言,MM5、WRF/3D-Var 系统是目前发展较为完善的中尺度模式及其 3D-Var 同化系统,且已在业务应用中取得了明显效果<sup>[5-6]</sup>。因此基于 WRF 3D-Var 系统进行同化研究

<sup>\*</sup> 初稿时间:2007 年 6 月 17 日;修改稿时间:2007 年 8 月 30 日。

资助课题:“973”国家重点基础发展规划项目(2004CB418301)和国家自然科学基金项目(40675022 与 60572184)。

通讯作者:张庆红,主要从事中小尺度气象学、大气数值模式与可预报性研究。qzhang@pku.edu.cn

具有明显的实际意义。

雾是在特定天气背景之下形成的,并具有高度局域性的高影响天气。随着经济建设步伐的不断加快,社会需求使得海、陆、空交通运输业(特别是航空和高速公路)飞速发展,雾的影响也越来越突出。特别是能见度小于 200 m 的浓雾,给交通运输业造成了频繁的严重事故和巨大的经济损失。因此,对雾的定时、定点和定量预报是需要解决的迫在眉睫的科学问题。

对降水过程的变分同化试验已有了许多成果<sup>[7-9]</sup>,但对于大雾这种局地性较强的天气现象,同化研究者甚少。近几年来,中国的地面加密观测资料得到了长足的发展,民用航空飞行器气象探测资料(AMDAR)也越来越丰富,如何利用这些资料形成更精确的模式初值,是当前资料同化中一项紧迫的任务。本文采用 WRF 非静力数值预报模式及其三维变分同化系统(WRF 3D-Var),对 2006 年 1 月 13—14 日华北地区及山东半岛的一次大雾过程进行了包括 GTS 资料、AMDAR 资料和 9210 资料的三维变分同化试验,并在此基础上进行了时间间隔分别为 6、3 和 1 h 不同时间频率的循环同化试验。

## 2 资料及大雾过程简介

### 2.1 大雾过程简介

2006 年 1 月 12 日白天,北京地区降雪,13 日白天,山东半岛、华北南部和华中等地相继出现了大雾天气。13 日夜间至 14 日早晨在山东北部、渤海湾、天津、河北和北京等地先后出现了大范围的大雾天气。此次大雾对交通运输造成了很大的影响,其中北京地区先后有 4 条高速公路封闭。北京首都国际机场位于北京市区的东北(40.072°N、116.597°E),在此次大雾过程中,能见度最差仅 50 m,出现时间为 00:30—04:20 UTC,维持了 3 个多小时。本次大雾在机场营运的高峰时间突然出现,致使北京首都机场航班延误达 520 多班,机场滞留旅客近万人,给航空公司造成了巨大的经济损失,也给旅客的出行带来了很大的不便<sup>[10]</sup>。

### 2.2 AMDAR 资料简介

当前商用飞机大都装有气象传感器以及自动数据收集和处理系统,可以把飞机在飞行中得到的气象数据自动转播到地面,这种系统就是 AMDAR

(Aircraft Meteorological Data Relay)。

目前,中国航空飞机气象报(AMDAR/ACARS)的主要内容包括飞机飞行中的经度、纬度、时间、高度(气压)、温度和水平风向风速。这些数据无论是天气预报业务,还是在大气科学研究中,都具有很好的应用价值。

从收集到的 AMDAR 报文格式资料解读出来的飞机报有几种类型:高空气象报(WOB)、位置报(Present Position Report)、飞机爬升报(TKO)、飞机稳态巡航报(CRZ)等,其中只有 WOB 报包含的气象要素最为全面,格式较为规范,质量也较高。而其他几种类型的报文中包含的气象要素较少,且质量难以保障,所以本文中只应用 AMDAR 解码后的 WOB 报。WOB 报主要包含 4 个变量:高度(气压)、风向、风速以及温度。选择有代表性的一个时段,2006 年 1 月 13—15 日,观察分析 WOB 报的资料分布,发现 WOB 报遵循一定的时间和空间分布规律。从 WOB 报高度分布图(图 1a)上看,飞机的飞行高度均在 12000 m 以下,在近地面附近 WOB 报文最多,表明测到低空的资料多在起飞和降落的时段内,因此低空资料的观测时间及位置比较集中。其次在 10000—11000 m 报文数次之,表示大部分 WOB 报文是在平飞阶段测到的资料,此时飞机速度较快,资料分布较为分散,但集中在固定的航线上。第 3 高峰出现在 5000—8000 m 高度上,表示飞机在起飞/降落和航线平飞阶段之间经过爬升/进近阶段时观测也较多,这些观测分布在机场周围航线末端和空中走廊上,距离机场的位置也不太远。由于商用飞机的飞行时间不同的影响,导致 WOB 报资料在白天(00:00—12:00 UTC)的资料要多于夜间(12:00—次日 00:00 UTC)。因此,WOB 报资料并非是随时间线性均匀分布的,而是多集中于白天时段(图 1b)。另外,WOB 报主要分布在中国的东半部,在陆地的报文多于海上的报文,且多集中于京广、京沪、京哈几条主要的航线内(图 2)。

由于 WOB 报具有上述时间和空间分布的特点,因此不同时间段同化出来的效果会有差异,对不同区域同化的作用也会有区别。为检验 AMDAR 报的同化效果,本文选择 2006 年 1 月 14 日 00:00—12:00 UTC 内的 AMDAR 报文进行了同化试验对比分析。

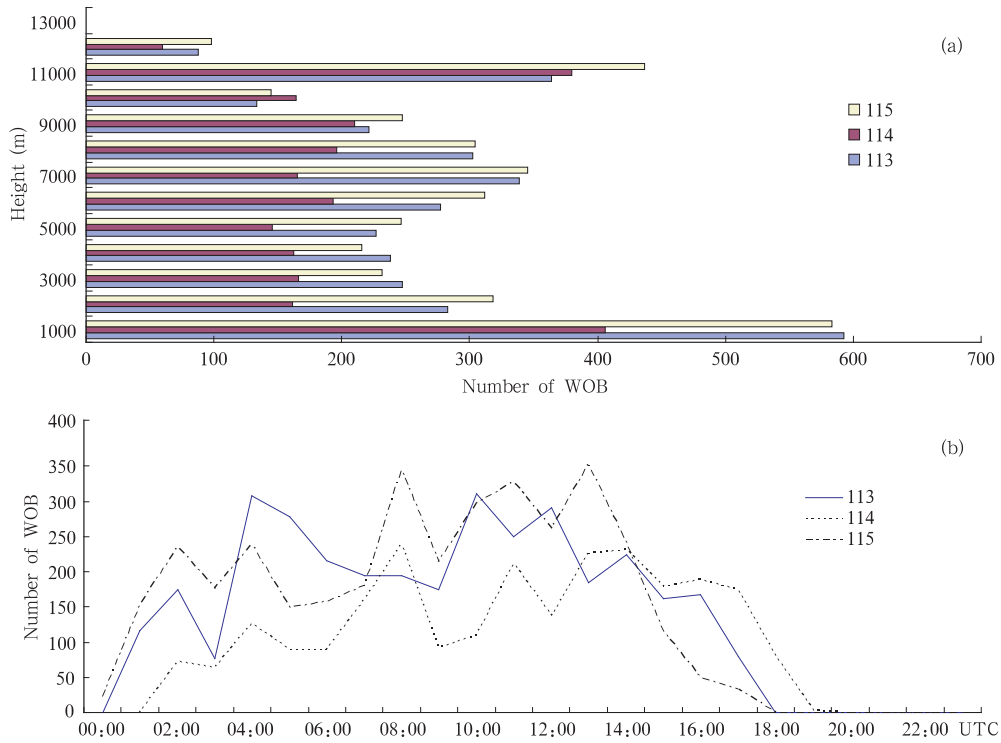


图1 2006年1月13—15日AMDAR报文随高度(a)和时间(b)分布

Fig. 1 (a) Altitudinal and (b) temporal distributions of AMDAR data during 13 to 15 January 2006

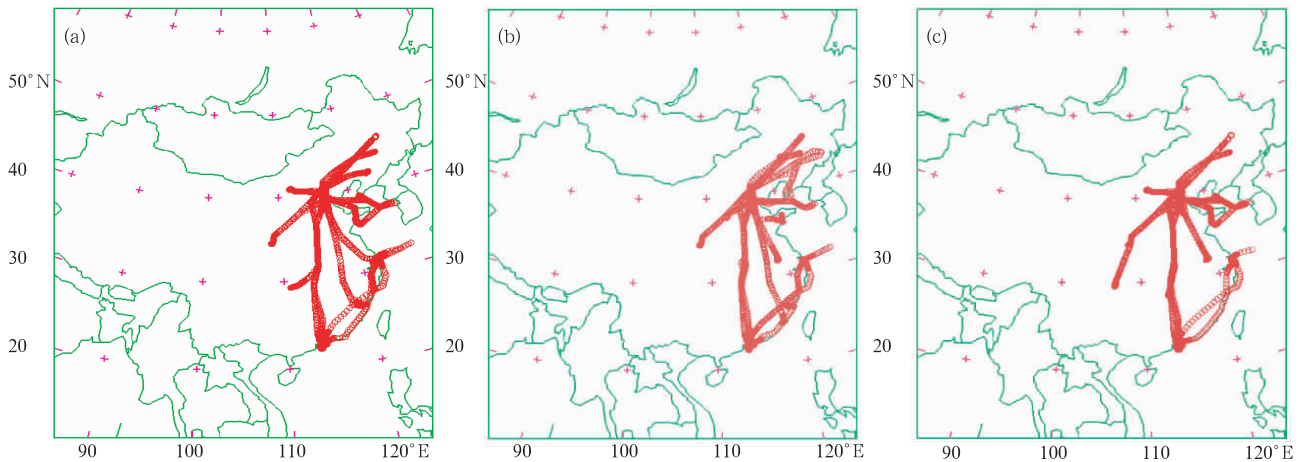


图2 2006年1月13—15日AMDAR报文水平分布

(a. 13日, b. 14日, c. 15日)

Fig. 2 Horizontal distributions of AMDAR data on (a) 13, (b) 14, and (c) 15 January 2006

### 3 试验设计

#### 3.1 WRF-3Dvar 系统

本文所使用的同化系统是 WRF 三维变分同化系统,它是在 NCAR MM5 3D-Var 的基础上发展起来的三维变分同化系统,目标函数为

$$J(x) = J_b(x) + J_o(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(H(x) - y_o)^T O^{-1}(H(x) - y_o)$$

目标函数的梯度为

$$\nabla J = B^{-1}(x - x_b) + H^T O^{-1}\{H(x) - y_o\}$$

Hessian 矩阵为

$$\nabla_{\mathbf{x}}^2 J = \mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}'^T \mathbf{O}^{-1} \mathbf{H}'$$

其中,  $\mathbf{x}$  是分析增量,  $\mathbf{x}_b$  是背景场,  $\mathbf{y}_o$  是观测值,  $\mathbf{y}$  是由分析增量导出的观测值,  $\mathbf{B}$  是背景误差协方差,  $\mathbf{O}$  是观测误差协方差矩阵。  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{x}_b$  是  $N$  维模式空间的  $N$  维向量,  $\mathbf{y}_o$  和  $\mathbf{y}$  是  $M$  维观测空间的  $M$  维向量,  $\mathbf{B}$  为  $N \times N$  阶矩阵,  $\mathbf{O}$  为  $M \times M$  阶矩阵。  $\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{H}$  称为观测算子。上标“T”表示矩阵转置,“-1”表示矩阵的逆。其中,背景误差协方差( $\mathbf{B}$ )的计算目前通常采用 NMC(the National Meteorological Center)方法<sup>[11]</sup>,其核心是用对同一时刻不同时效的预报值之间的差作为预报误差的近似。

### 3.2 试验设计

为了考查初始场对模式模拟雾的影响,以及为了分析同化不同资料的影响,本文设计了控制实验

和 3 种同化试验方案,控制试验为未同化任何资料,即仅用 NCEP 再分析场资料插值得到 WRF 模式的初值场(图表中用 noda 表示),其他 3 种同化方案根据同化的资料不同划分。

方案 1:观测只用 GTS 资料(图表中用 dagts 表示);

方案 2:观测为 GTS 和 AMDAR 资料(图表中用 dagpa 表示);

方案 3:观测为 GTS、AMDAR 和 9210 资料(图表中用 dagp9a 表示)。

3 种同化方案中最大的不同就是同化资料类型和数量的不同,表 1 为所用个例 2006 年 1 月 13 日 12:00 UTC 的同化方案 1、2、3 中所同化的不同资料数量对比。可见,AMDAR 资料和 9210 资料数较多,补充了有限的 GTS 观测资料。

表 1 2006 年 1 月 13 日 12:00 UTC GTS、AMDAR 和 9210 资料中观测数量比较  
Table 1 Numbers of GTS, AMDAR, and 9210 data at 12:00 UTC 13 January 2006

| 同化方案   | SOUND | SYNOP | AMDAR | METAR | SHIP | PILOT | TOTAL |
|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| dagts  | 80    | 475   | 0     | 68    | 3    | 7     | 633   |
| dagpa  | 80    | 475   | 597   | 68    | 3    | 7     | 1230  |
| dagp9a | 125   | 2488  | 597   | 115   | 3    | 7     | 3335  |

所有观测资料都经过质量控制(如极值检查、要素一致性检查、静力学检查、水平一致性检查等)。在 WRF-3DVar 同化系统中,对观测资料的采用还有一次简单的质量控制,即当观测值与模式值之间的差值大于观测误差 5 倍时,该观测资料就被剔除,不参与同化分析计算。

为了寻求高时间频率资料同化进模式的最佳方案,本文又利用 WRF 3D-Var 系统对 13 日 00:00—12:00 UTC 的 GTS+AMDAR+9210 资料分别进行每隔 6、3 和 1 h 循环同化,循环同化期间用 WRF 模式进行模拟预报,用模拟预报场作为下一次同化的背景场,根据同化时间频率的不同分为 3 种方案。

方案 4:观测为 GTS、AMDAR 和 9210 资料,每隔 6 h 循环同化(图表中用 dagp9a6h 表示)。

方案 5:观测为 GTS、AMDAR 和 9210 资料,每隔 3 h 循环同化(图表中用 dagp9a3h 表示)。

方案 6:观测为 GTS、AMDAR 和 9210 资料,每隔 1 h 循环同化(图表中用 dagp9a1h 表示)。

所有试验方案均得到 2006 年 1 月 13 日 12:00 UTC 的初始场,每隔 6 h 的 FNL 分析场作为模式

侧边界资料,利用 WRF 模式做 36 h 预报。为了分析方便,在同化系统和模拟预报中均没有使用嵌套方案,模式所选择的区域水平范围以(40°N、116°E)为中心,格点数为 230×220;区域的分辨率为 15 km,垂直方向 31 层。

WRF 模式采用质量坐标,兰勃托正形投影方式。时间积分方案采用 Runge-Kutta 3 阶方案,本次所有试验中,选用的物理方案为:WSM 6 类霰方案计算可分辨尺度降水<sup>[12]</sup>;BMJ 积云参数化方案计算次网格尺度降水<sup>[13-14]</sup>;边界层采用了 MYJ 高分辨率行星边界层参数化方案,计算行星边界层的感热、潜热、动量和湍流混合的垂直通量<sup>[15-17]</sup>;考虑到陆面物理过程对雾的生成和发展有很大的影响,模拟时采用了 5 层土壤模式;地表层和陆面过程分别为相似理论和热扩散方案<sup>[16-17]</sup>;长波辐射方案选 rrtm 方案<sup>[18]</sup>;短波选 Dudhia 方案<sup>[19]</sup>等。

## 4 同化试验结果分析

### 4.1 不同资料同化分析

为了检验同化资料在此次大雾个例中的作用,

本文对控制试验和 3 种不同资料同化方案的同化结果以及模拟结果进行了对比分析。

#### 4.1.1 同化后模拟结果的对比分析

雾和云的区别仅仅在于是否接触地面<sup>[20]</sup>。一般认为,雾的液态水含量范围为 0.05—0.20 g/kg<sup>[21]</sup>,但根据各地的地域特点和雾形成条件的不同,雾中的液态水含量范围也各有不同,本文取液态水含量 0.05 g/kg 为成雾下临界值,对上临界值不作限制。

在雾的生消演变过程中,能见度随着雾的液态水含量的变化而变化。本文描述中能见度的计算采用了 Kunkel 关于液态水含量(LWC)和能见度(VIS)关系的经验公式<sup>[22-23]</sup>

$$V_{is} = \frac{\ln 0.02}{\beta}$$

式中  $\beta = 144.7(\rho_0 \times q_1)^{0.88}$ ,  $\rho_0$  为水密度(单位: g/cm<sup>3</sup>),  $q_1$  为液态水含量(单位: g/kg),  $\beta$  是根据大量的试验给出的物理参数。

对比分析 2006 年 1 月 14 日 03:00 UTC 的能见度预报(图 3b—e)与半小时后的 NOAA-17 雾区监测图(图 3a)可知,无论同化资料与否都能够大致模拟出明显的低能见度区域(能见度 < 1 km),对雾区分布形态的模拟效果大致可用。同化方案 1、2、3 与控制试验对比,最明显的改进是在渤海湾,在控制试验中雾区只出现在渤海湾的西北角和东南角,范围很小,而同化试验中渤海湾大部分都出现了雾区,与实况相符;方案 2 与其他两种方案和控制试验最大的不同是在天津西南至河北中部的雾区连接成了带状,对照卫星监测图可知此形状与实况非常相似,只是位置稍微偏南了些。以上都说明 AMDAR 资料在雾区的同化模拟中能起到较为明显的正作用。而同化 9210 资料虽然在天津南部修正了虚假雾区,但在山东北部雾区要小一些。

再比较 2006 年 1 月 14 日 00:00 UTC 的能见度预报(图略)与同时次的实况(图略),发现同化资料后也能起到一定的修正作用。同化方案 1、2、3 对控制试验最明显的改进仍是在渤海湾,同化资料后渤海湾的雾区范围均有所扩大;另一个改进是消除了控制试验中位于山东北部黄河入海口以南至山东与天津交界线区域内的虚假雾区。3 种同化方案中方案 2 更接近于实况。说明 AMDAR 资料在同化中起到的正效应最为明显。

对比分析 2006 年 1 月 14 日 06:00 UTC 的近

地层液态水含量预报(图略)与半小时后的 NOAA-16 卫星雾区监测图(图略)可以看出,3 种同化方案与控制试验均在河北有一处虚假预报,且 3 种同化方案均在渤海湾对控制试验有非常大的改进,而方案 2 在天津南部有虚假预报,方案 3 的预报对天津南部的虚假雾区有较好地消除,在山东半岛处方案 1、2 比 3 的预报要好。

综上所述,控制试验与 3 种不同资料同化方案均能模拟出雾区的大概分布趋势,而同化资料后对雾区能起到修正作用,同化方案 2 比 1 明显从雾区的分布形态和范围要好得多,表明同化 AMDAR 资料对雾的模拟预报能起到正的修正效应。方案 3 比方案 1 和 2,虽在开始阶段的雾区预报上没有明显的改进,但在午后雾区范围减小阶段,能修正前述几种方案的虚假雾区,表明 9210 资料对雾的预报也能起到正效应。但 9210 地面加密站的资料在同化分析中并没有起到想象中的作用,表明地面资料同化是更复杂的问题,有待于更进一步的研究。

#### 4.1.2 同化分析增量场 RMSE 对比

从 3 种不同资料同化方案后位势高度场的分析增量均方根误差(RMSE)图(图 4a)中可以看出,3 种同化方案的 RMSE 在垂直方向上的变化趋势基本一致,850 hPa 以下 RMSE 随高度升高而增大,850 hPa 以上随高度升高而逐渐减小,在中层 400 hPa RMSE 达极小值,约为 15—20 gpm,之后 RMSE 又随着高度升高呈直线增长的趋势,至 100 hPa 达极大值(约 40—55 gpm),而低层 850 hPa 为次大值,约为 32—38 gpm。从以上分析表明同化高度场在中层的改变最小,而改变最大的层次是高层,在低层 850 hPa 的改变也较大。且方案 1、2、3 对背景场的改变依次增大,表明同化资料数越多对背景场的调整越大,这可能是因为分析场中的中小尺度信息越多,使分析场更有可能接近于观测场。

分析 3 种不同资料同化方案后温度场分析增量随高度演变图(图 4b)可知,同化后对温度场的改变主要在低层(925—700 hPa),700 hPa 以上随高度升高逐渐呈阶梯式下降的趋势,对高层的改变最小。其中 AMDAR 资料在 250 hPa 以下对温度有改善,而以上不起作用,这可能是与飞机的巡航高度有关。飞机的巡航高度一般在 200 hPa 以下,而主要在 250 hPa 以下(含 250 hPa),因此 200 hPa 以上无 AMDAR 资料。

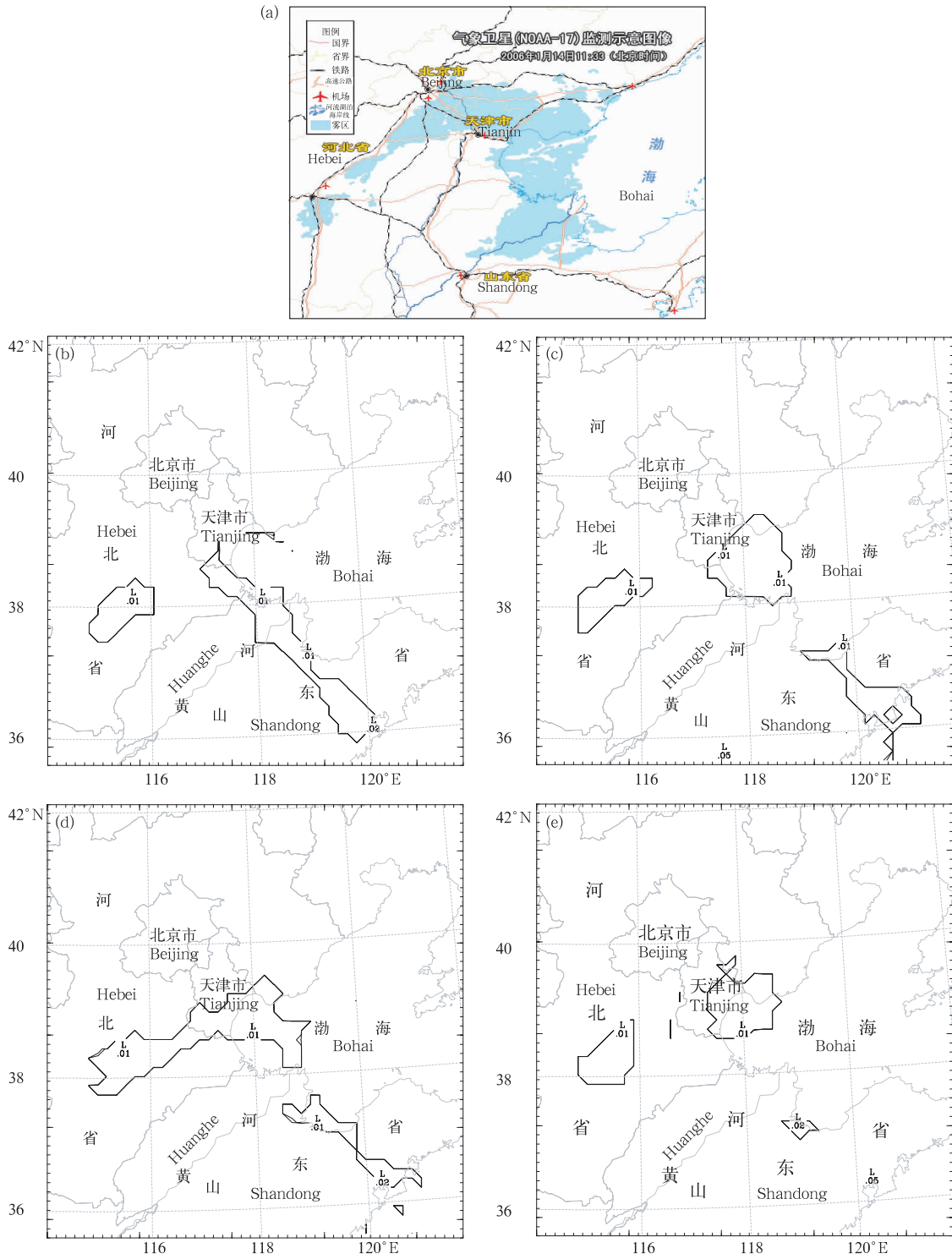


图 3 2006 年 1 月 14 日 03:33 UTC 气象卫星 NOAA-17 监测的雾区(a)示意图(来自国家气象局卫星中心);控制试验(b)与同化方案 1(c)、2(d)、3(e)模拟 15 h(2006 年 1 月 14 日 03:00 UTC)能见度( $\leq 1$  km)分布(单位:km)

Fig. 3 (a) Fog (blue) distribution detected by NOAA-17 at 03:30 UTC 14 January 2006 and simulated visibility ( $\leq 1$  km; units:km) at 03:00 UTC 14 January 2006 in (b) the control experiment and three data assimilation scheme experiments (c) dagts, (d) dagpa, and (e) dagp9a



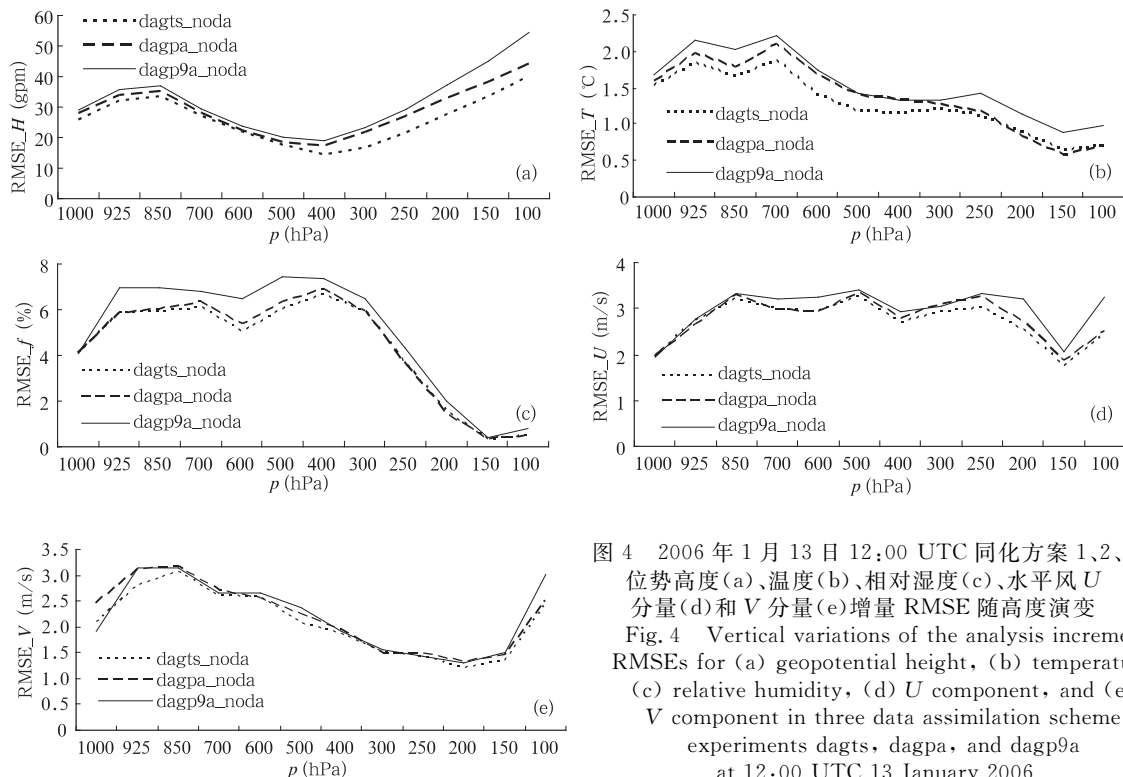


图4 2006年1月13日12:00 UTC同化方案1、2、3位势高度(a)、温度(b)、相对湿度(c)、水平风 $U$ 分量(d)和 $V$ 分量(e)增量RMSE随高度演变  
Fig. 4 Vertical variations of the analysis increment RMSEs for (a) geopotential height, (b) temperature, (c) relative humidity, (d)  $U$  component, and (e)  $V$  component in three data assimilation scheme experiments dagts, dagpa, and dagp9a at 12:00 UTC 13 January 2006

由图4c可知同化对于湿度场的影响,3种同化方案中每一种方案在925—300 hPa对相对湿度的调整均基本相当,只分别在600 hPa层有相对低值,而300 hPa以上同化各种资料对背景场的影响均呈快速下降趋势,至高层达到最低几乎接近于0,这说明高层资料中水汽分布比较接近实况。方案2与1的差别很小,是由于AMDAR资料中没有湿度信息。

分析风场增量RMSE图(图4d、4e)可知,同化对水平风场 $U$ 分量的影响随着高度升高变化基本不大,且方案1、2在400 hPa以下基本一致,400 hPa以上方案2比1稍大,3种方案中所有高度层上方案3的改变均为最大;但同化对 $V$ 分量的影响较大,风场增量随高度升高陡降,并且3种方案对 $V$ 分量的影响基本一致。表明AMDAR资料水平风场 $U$ 分量并没有改变背景场,而 $V$ 分量有改变,这可能是因为低层主要是径向风所致。

综合以上分析结果可以看出,同化资料后3种不同方案对高度场、温度场、湿度场和风场在各高度层上均有较明显的调整,(仅湿度调整在高层例外),且对同一要素而言在高度层上调整的趋势基本一致;3种方案之间调整幅度的差别相对于同化与否调整幅度差别来说并不明显,但3种方案增量的大

小还是有一定的规律,基本以同化方案1、2、3的顺序依次增大,表明资料量越大,对背景场的改变越大。不同的是,对不同要素在各高度上的修改幅度趋势不尽相同。

#### 4.1.3 模拟结果原因简析

从前述分析中可以得出,同化资料后对分析场的调整还是比较明显的,模拟结果中对雾区的生消也有修正,表明GTS、AMDAR、9210资料同化能起到一定的改善作用,那么同化究竟改善了哪些要素而导致了模拟结果的改善呢?再仔细对比分析上述所有方案,发现同化资料后模拟结果并没有实质上根本性的变化,与实况之间仍有一定的差距。原因究竟又是什么呢?

分析同化方案3温度场分析增量分布(图5a、5b)可以看出,同化资料造成了中国华北东部、东北南部、华东大部、渤海、黄海及朝鲜半岛在低层出现了大范围的降温区域,在北京、朝鲜半岛及其以西海域出现了两个负值中心,而且925 hPa的降温幅度要大于850 hPa的幅度,这种变化使得层结趋向于稳定的方向发展,有利于雾的生成。湿度增量图上(图5c、5d)在渤海及山东半岛以东、朝鲜半岛以西、辽宁以南的区域内有增湿区域,在越低的层次上增

湿越明显。这些特征在同化方案 1、2 的分析增量图(图略)上也有总体趋势基本相同的表现。正是因为降温造成的层结趋稳性以及明显的增湿中心,使得同化资料后在渤海及山东半岛区域内模拟的雾区范围及强度有了一定的修正。

进一步分析低层温湿变化的原因可知,同化 GTS、AMDAR 和 9210 资料均对低层的温湿层结产生一定的影响,但影响的范围及程度有所不同。分析比较 3 种方案的温度增量图(图略),降温的范围及分布形态均比较一致,但方案 2 的低层降温更明显,位于渤海湾北部的 925 与 850 hPa 的降温中心差达到 1.0 °C,比方案 3 的 0.5 °C 要强,而方案 1

中降温差的降温幅度很小,只有 0.1 °C。比较同化后湿度增量图(图略),同化方案 1 和 2 不论 925 hPa 还是 850 hPa 湿度增量均基本相似,这是因为 AMDAR 资料中没有湿度资料,但方案 3 的湿度增量比方案 1、2 均小,尤其是在 850 hPa 上。综合看,方案 2 与方案 1 的增湿相当,比方案 3 明显,但方案 2 的层结趋稳性最强,方案 1 最差。正因如此,才导致了模拟结果中方案 2 效果最明显。另外,由此分析也可得出,同化 GTS 资料对低层的增湿贡献明显,但对层结趋稳性贡献不大;而同化 AMDAR 资料主要使低层降温明显,即使层结趋稳性明显,但由于无湿度要素,对增湿无贡献;9210 资料补充更多的是地

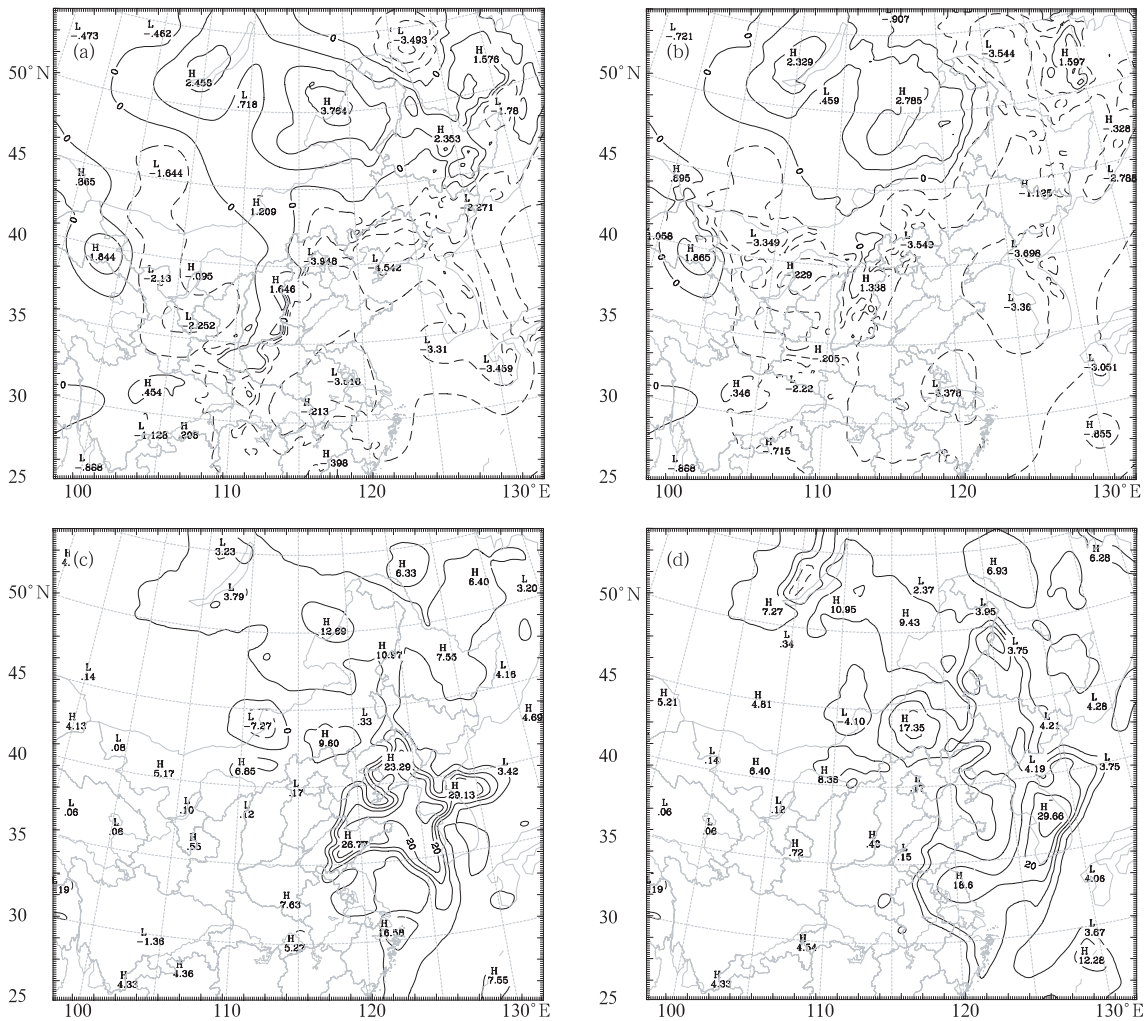


图 5 同化方案 3 温度和湿度分析增量分布

(a. 925 hPa 的温度增量, b. 850 hPa 的温度增量, c. 925 hPa 的湿度增量, d. 850 hPa 的湿度增量;分析增量  $\geq 0$  为实线,  $< 0$  为虚线,温度增量等值线间隔 1 °C;相对湿度等值线间隔 5%)

Fig. 5 Analysis increments of 925 hPa/850 hPa (a/b) temperature (contour interval: 1 °C) and (c/d) relative humidity (contour interval: 5%) of data assimilation scheme 3 (dagnp9a) (solid line: increment  $\geq 0$ ; dash line: increment  $< 0$ )



面加密观测资料,所以对近地层的改善较大,随高度增大改变减小,由分析得出 9210 资料对低层湿度和层结趋稳性均有贡献。

分析控制试验及同化方案 3 在初始时刻的高度场形势图(图 6)可得,虽然同化资料后在 850 hPa 等压面上位势高度都有不同程度的修正,例如在贝加尔湖和中国黑龙江东北的低压、河套地区的高压都有负变高,即对低压加深、高压减弱,但控制中国中纬度地

区尤其是华北地区的形势并没有改变。这在 500 hPa 高度图上也得到了很好的证明,无论同化与否 500 hPa 图上北京地区上空均受较为平直的偏西气流控制。分析其他层次(包括地面)以及其他两种同化方案后(图略)均能得出大致同样的结论。有可能正是因为同化与否对高空和地面形势并没有改变,在相同的环境下对某些局部层结和湿度的改变只造成了局部的雾区的改善,但并没有发生根本性的改进。

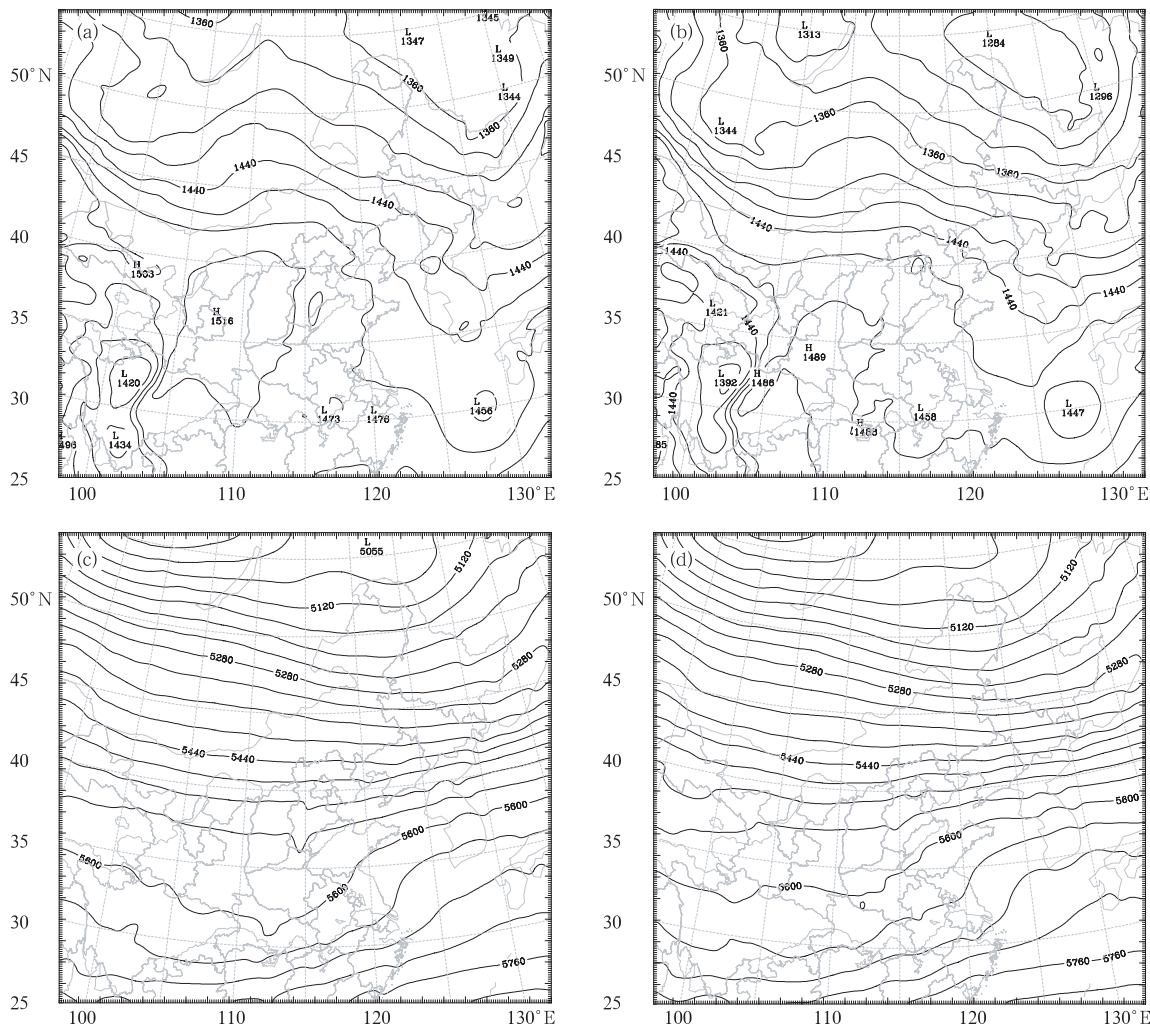


图 6 2006 年 1 月 13 日 12:00 UTC 控制试验初始场与同化方案 3 分析场 850 和 500 hPa 位势高度  
(a. 850 hPa 控制试验, b. 850 hPa 同化方案 3. c. 500 hPa 控制试验, d. 500 hPa 同化方案 3,  
实线为位势高度等值线,850 hPa 间隔 20 gpm,500 hPa 间隔 40 gpm)

Fig. 6 850 hPa/500 hPa geopotential heights (solid line; contour interval: 20 gpm in a, b; 40 gpm in c, d)  
at 12:00 UTC 13 January 2006 in (a/c) the control experiment (noda)  
and (b/d) data assimilation scheme 3 (dagp9a)

雾是稳定层结下在边界层内发生、发展和消散的一种现象,只要形势稳定,天空状况不变,对高空

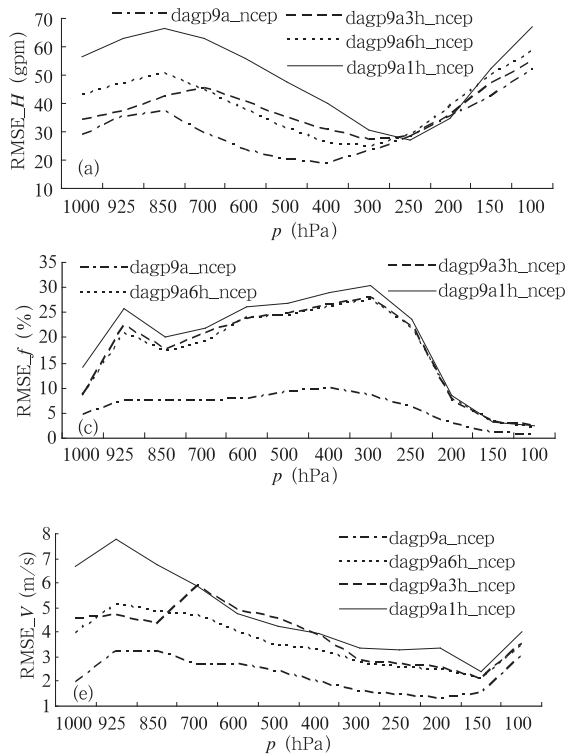
的变化可能并不敏感,此次过程同化资料对高空的改善较大,对近低层的各要素改变相对较小,这可能

也是对雾的模拟没有发生根本性改变的原因之一。

另外,国外近年来有研究表明,在数值模式对雾的模拟中地温的作用不可忽视<sup>[24]</sup>,而我们同化研究中没有相关的资料,也许这也是同化资料并没有根本性改善大雾预报的原因之一,具体情况需要进一步研究。

### 4.2 不同时间频率同化分析

因为 AMDAR 资料和 9210 资料中有很多高时间频率的资料,而 3D-Var 只能同化某时刻的资料,如何利用 3D-Var 同化高时间频率的资料,本文设计了 3 种时间频率循环同化方案 4、5、6,试图找到一种可行的循环同化方案。



### 4.2.1 同化分析场对比

分析同化方案 3、4、5、6 的分析增量图(图 7)可得,多次循环同化比单次同化的分析增量 RMSE 均要大,其中对湿度场效果最明显,循环同化次数最多且用到的资料最多的 1 h 循环同化总的来说改变最大,3 h 次之,6 h 最小。但在低层(850 hPa 及以下)3 h 与 6 h 方案相比同化改变较为接近,对某些要素(例如高度场)的改变甚至要小。多次循环同化与单次同化相比,除温度场分析增量 RMSE 随高度变化趋势不同外,高度场、湿度场和 wind 场随高度的变化趋势基本相同。

图 7 2006 年 1 月 13 日 12:00 UTC 同化方案 4、5、6 与 3 的位势高度(a)、温度(b)、湿度(c)、水平风 U 分量(d)、和 V 分量(e)分析增量 RMSE 随高度演变 Fig. 7 Vertical variations of the analysis increment RMSEs of (a) geopotential height, (b) temperature, (c) relative humidity, (d) U component, and (e) V component in the four data assimilation schemes including dagp9a, dagp9a6h, dagp9a3h and dagp9a1h at 12:00 UTC 13 January 2006

### 4.2.2 同化后模拟结果对比分析

比较分析 3 种不同时间频率同化方案后的模拟结果,从 2006 年 1 月 13 日 12:00 UTC 开始积分 6 h 后,3 种方案液态水含量分布图(图略)上均开始出现大于 0.05 g/kg 的区域,不过位置及范围有些差异,对比同时次的地面能见度客观分析图(图略)发现 1 h 循环同化模拟结果最接近实况,在山东半岛西部临近渤海的陆地上出现一片大雾,只是范围稍小;3 h 循环同化模拟结果在此处也预报出大雾,位置及范围接近,但其他地方的虚假雾区太大,6 h

循环同化也有同样的问题。随着积分时间的延长,预报及实况中的雾区均有所扩大,比照实况,方案 6 最准确,方案 4、5 预报雾区过大,其中方案 4 比 5 稍好。积分到 15 h(图 8)时,方案 6 中液态水含量 0.05—0.60 g/kg 的区域在山东半岛西部以及北京以南和东南部的河北和天津,渤海湾没预报出来雾区,但从雾区的形状和范围来看,与实况还是比较接近的;方案 4 预报在山东境内及河北中部与实况相符,而河北东部有大片雾区空报,方案 5 预报的雾区无论在位置及形状上看差别均较大。

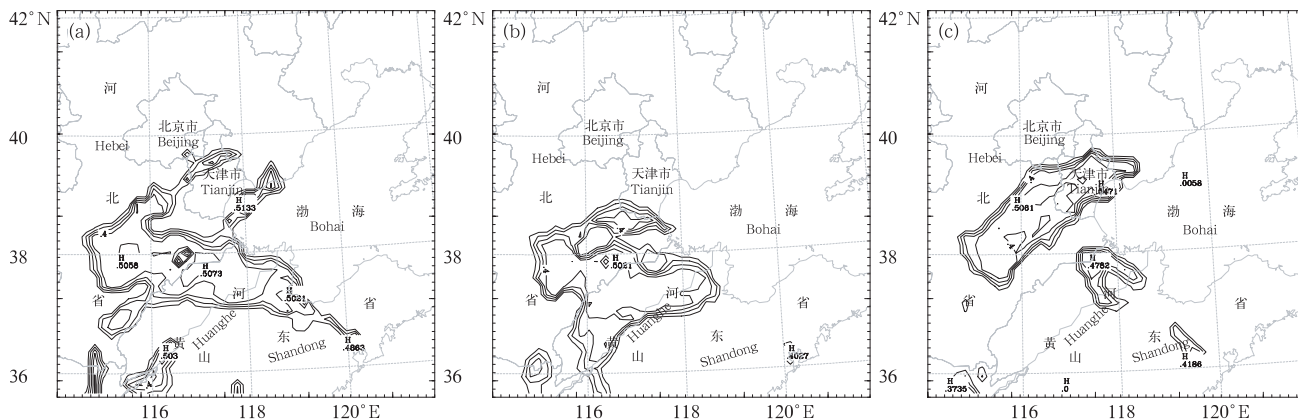


图 8 同化方案 4(a)、5(b)、6(c)模拟 15 h(2006 年 1 月 14 日 03:00 UTC)地面液态水含量分布(单位: g/kg)  
Fig. 8 Simulated surface liquid water content (g/kg) distributions at 03:00 UTC 14 January 2006 using the three data assimilation schemes including (a) dagp9a6h, (b) dagp9a3h and (c) dagp9a1h, respectively

综上所述,3 种不同时间频率循环同化方案的模拟结果对雾区的分布均有不同程度的修改,但与实况还是有些差距。同化方案 6 与实况最为接近,其次是方案 4,而方案 5 与实况相差较大。这与前述分析的方案 6 同化分析增量 RMSE 在低层最明显,而方案 4、5 的同化分析增量 RMSE 在低层的大小相当,且有些要素(如气压)方案 5 比方案 4 还要小是一致的。

在多时次循环同化(尤其是 3 和 1 h 周期循环同化)中,Spin-up 的问题不得不考虑,但张大林等<sup>[25]</sup>认为若在中尺度数值模式的初始场中同化进更多的中尺度信息,则能够在一定程度上解决上述问题。因此同化 AMDAR 和 9210 资料后,加入了更多的中尺度信息,可能在一定程度上减弱虚假噪音。为了更进一步深入分析此问题,下一步应该用数字滤波技术来研究高时间频率循环同化中是否有以及有多大虚假噪音的问题。

## 5 结论

本文通过利用 WRF 3D-Var 系统对不同资料(GTS、AMDAR、9210)进行了同化试验,在此基础上又进行了不同时间频率的循环同化试验,并用同化后的分析场通过 WRF 模式做了 36 h 模拟试验,分析比照结果,得到以下主要结论:

(1) 同化资料与不同化资料相比,分析场有明显的改变,但同化不同资料之间的分析增量差异不是很大。

(2) 同化资料后对雾区的模拟结果均有局部不

同程度的修正,进一步分析表明起修正作用的原因是因为对低层的湿度改善和层结趋稳性的改善。

(3) 同化 GTS 资料对低层的增湿贡献明显,但对层结趋稳性贡献不大;而同化 AMDAR 资料主要使低层降温明显,即使层结趋稳性明显,但由于无湿度要素,对增湿无贡献;9210 资料对低层湿度和层结趋稳性均有贡献。

(4) 不同时间间隔的循环同化试验表明,多时次的循环同化比单时次的同化分析增量要大,而逐时循环同化比 6 和 3 h 循环同化效果明显。

雾的模拟对初值是敏感的,而对低层大气信息的改变(包括地温)可能更敏感。本文仅从一个个例得到的结论未必具有普遍性,今后需要对更多的个例进行研究。

## 参考文献

- [1] Kalnay E. Atmospheric modeling data assimilation and predictability. Cambridge University Press, 2003; 341pp
- [2] Rabier F, Jarvinen H, Klinker E, et al. The ECMWF implementation of four-dimensional variational assimilation I: Experimental results with simplified physics. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 1143-1170
- [3] 张华, 薛纪善, 庄世宇等. GRAPeS 三维变分同化系统的理想试验. *气象学报*, 2004, 62(1): 31-41
- [4] 曾智华, 马雷鸣, 梁旭东等. MM5 数值预报引入 GRAPeS 三维变分同化技术在上海地区的预报和检验. *应用气象学报*, 2004, 15(5): 534-542
- [5] Barker D M, Huang W, Guo Y-R, et al. A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with

- MM5. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-453STR, 2003, 68pp
- [6] Barker D M, Huang W, Guo Y-R, et al. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results. *Mon Wea Rev*, 2004, 132:897-914
- [7] 张昕,刘月巍,王斌等. “98·7”特大暴雨降水资料的四维变分同化研究. *自然科学进展*,2003,13(12):1329-1333
- [8] 潘宁,董超华,张文建. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究. *气象学报*,2003,61(2):226-236
- [9] 张朝林,陈敏,范水勇等. “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*,2005,63(6):922-932
- [10] 李元平,梁爱民,张中锋等. 北京地区一次冬季平流雾过程数值模拟分析. *云南大学学报(自然科学版)*,2007,29(2):167-172
- [11] Parrish D, Derber J C. The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Mon Wea Rev*, 1992,120:1747-1763
- [12] Hong S-Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon Wea Rev*, 2004,132: 103-120
- [13] Janjic Z I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Mon Wea Rev*, 1994, 122: 927-945
- [14] Janjic Z I. Comments on “Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models”. *J Atmos Sci*, 2000, 57:3686
- [15] Janjic Z I. The step-mountain coordinate: physical package. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 1429-1443
- [16] Janjic Z I. The surface layer in the NCEP Eta model. Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction. Norfolk, VA, 19-23 August; Amer Meteor Soc, Boston, MA, 1996: 354-355
- [17] Janjic Z I. Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note, No. 2002, 437: 61pp
- [18] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res*, 1997, 102 (D14): 16663-16682
- [19] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 3077-3107
- [20] 马振华,王绍武,王明星等. 大气科学辞典. 北京:气象出版社,1994: 677pp
- [21] Cotton W R, Anthes R A. Storm and cloud dynamics. San Diego: Academic Press, 1989
- [22] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *J Appl Meteor*, 1984, 23: 34-41
- [23] Thierry B, Daniel G. Numerical forecasting of radiation fog. Part II: numerical model and sensitivity tests. *Mon Wea Rev*, 1994,122:1218-1230
- [24] Chibe Russell J. The numerical simulation of fog with the RAMS@CSU cloud-resolving mesoscale forecast model. Thesis of Colorado State Univ, Paper No. 741, 2003
- [25] Zhang D L, Fritesh J M. A case study of the sensitivity of numerical model simulation of mesoscale convective systems to varying initial condition. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 2481-2431

### 3D VARIATION DATA ASSIMILATION EXPERIMENTS ON A DENSE FOG EVENT OVER NORTH CHINA

Liang Aimin<sup>1,2</sup> Zhang Qinghong<sup>1</sup> Liu Kaiyu<sup>1,3</sup> Shen Hongxi<sup>2</sup>

*1 Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing, 100871*

*2 Beijing Meteorological Center, CAAC, Beijing, 100621*

*3 Guiyang Air Traffic Management Center, CAAC, Guiyang, 550012*

#### Abstract

With the development of numerical weather simulation and forecasting, the spatial and temporal resolution of numerical model become much higher and the data assimilation updating cycle much shorter. Assimilation of more meteorological data has recently received an increasing interest to improve the numerical weather forecasts all over the world. But it is still facing many challenging issues, including how to process various data with appropriate data quality control, how to specify the spatial interpolation and discretization errors, and how to extract the meteorological information from various observations and unconventional meteorological data with the accuracy needed by numerical model. Three-dimensional variational data assimilation(3D-Var) allows these data to be assimilated into the model initial fields directly, which employs the non-linear model as a dynamic constraint to improve the analysis field. The WRF 3D-Var system, which is based on the nonhydrostatic mesoscale model WRF and developed from MM5 3D-Var, is a famous three-dimensional variational data assimilation system. In this paper, the nonhydrostatic mesoscale WRF and its 3D-Var system were used to study a dense fog event occurred in 13–14 January 2006. Three different observation data sets include the GTS(Global Telecommunication System) data, AMDAR(Aircraft Meteorological Data Relay) data and 9210 data were assimilated into the initial analysis fields in three experiments. Also the experiments of different time interval (1 h, 3 h, 6 h) assimilation were performed to get the six different analysis fields needed by the six simulation experiments. While the control simulation experiment was performed without assimilation, and its initial fields were taken only from the National Center for Environmental Prediction (NCEP) re-analysis data. The results indicate that three assimilation experiments using 3 different kinds of data sets have to different extent corrected the analysis fields, thus showing obvious positive effect on fog simulation. Further study shows that the humidity and stratification stability of the boundary layer have been improved obviously in all assimilation experiments, although different data sets made different contribution to the analysis fields. In the assimilation experiment, the low level humidity fields were obviously improved while the stratification stability had no significant change. The AMDAR data assimilation obviously improved the stability of the boundary layer but not humidity because the humidity information is not included in AMDAR data. The 9210 data assimilation improved both the humidity and stability. The data assimilation experiments of different time intervals show that the analysis increments of multi-times cycle assimilation are better than only one time, the forecast effect of 1 h interval is better than those of 3 h and 6 h interval.

**Key words:** Dense fog, Variational assimilation, Numerical simulation, AMDAR data, RMSE.