

王瑞文, 叶冬, 李莉. 2014. AMDAR 资料质量分析及对 GRAPES 系统同化和预报影响 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 683–692, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13204. Wang Ruiwen, Ye Dong, Li Li. 2014. Analysis of AMDAR data quality and its impact on assimilation and forecast by GRAPES system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 683–692.

# AMDAR 资料质量分析及对 GRAPES 系统 同化和预报影响

王瑞文<sup>1</sup> 叶冬<sup>2</sup> 李莉<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国家气象中心, 北京 100081

<sup>2</sup> 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

**摘 要** 为了研究 AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) 资料对 GRAPES (Global Regional Assimilation and Prediction System) 系统的影响, 针对从国家气象信息中心实时库检索的业务 AMDAR 资料, 分析了该资料的偏差和标准差等质量特性; 利用 GRAPES 数值预报系统, 做了两个月的同化预报循环试验。选取资料和试验的时间是 2013 年 5 月、6 月, 同化窗口 6 h, 预报时效 7 d。结果表明, 与背景场该资料的温度要素的平均偏差在 0.2 °C, 标准差在 2 °C, 风的平均偏差在 0.2 m/s, 标准差在 3 m/s, 偏差基本符合正态分布; AMDAR 资料对同化和预报效果均有改善。

**关键词** AMDAR 资料 GRAPES 系统 资料同化 数值预报

文章编号 1006–9585 (2014) 06–0683–10

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13204

## Analysis of AMDAR Data Quality and Its Impact on Assimilation and Forecast by GRAPES System

WANG Ruiwen<sup>1</sup>, YE Dong<sup>2</sup>, and LI Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

<sup>2</sup> Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

**Abstract** In order to research the validity of using the AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) data in the GRAPES (Global Regional Assimilation and Prediction System) numerical forecast system, the bias and standard deviation of the operational AMDAR data from the National Meteorological Information Center (NMIC) were calculated, and the impact of the AMDAR data on GRAPES was analyzed. We conducted our study using data from May to June 2013 (two months), with an assimilation window of 6 h and a validity period of 7 d. The bias of the temperature was 0.2 °C, and the standard deviation was 2 °C. The bias of the wind was 0.2 m/s, and the standard deviation was 3 m/s. The AMDAR data error distribution is almost normal. The results show an improvement in the assimilation and forecast by GRAPES when using the AMDAR data.

**Keywords** AMDAR data, GRAPES system, Data assimilation, Numerical forecast

收稿日期 2013-11-26 收到, 2014-04-23 收到修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201106008、GYHY201206007

作者简介 王瑞文, 男, 1979 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事数值天气预报的研究。E-mail: wangrw@cma.gov.cn

## 1 引言

数值天气预报是目前天气预报的主要手段。数值天气预报能力除依赖于模式本身的物理基础外,观测资料的同化也具有十分重要的作用。在常规观测资料中,探空观测是一种精度相对较高对预报有重要影响的资料,但常规探空观测时间间隔过长、空间分布过稀。航空气象数据转发(简称 AMDAR)是通过民航班机上的自动观测仪器获得的自动气象报告。AMDAR 资料具有高时间分辨率的特点,一定程度弥补了探空观测的不足,对提高数值天气预报效果可起到很好的作用(Pouponneau et al., 1999; Cardinali et al., 2003; Fournier and Holden, 2005; Benjamin et al., 2007; 陶士伟等, 2009)。因此,AMDAR 资料是除卫星遥感、地面加密自动站外,中尺度、短时效天气预报重要的不可缺少的气象资料来源之一。

国际上,在 20 世纪 90 年代飞机观测资料的应用研究就已经开展(Schwartz and Benjamin, 1995; Benjamin et al., 1999),并在数值天气预报中的应用广泛,且效果明显(Rukhovets et al., 1998)。由于以前我国 AMDAR 观测资料较少,模式的同化系统对资料的吸收应用能力不足,AMDAR 观测资料的作用没有得到充分发挥。自从 2004 年我国成为国际航空气象资料合作成员国以来,我们获得了大量国外航空气象资料;随着中国气象局与民航总局 AMDAR 合作项目的开展,气象部门获得国内的 AMDAR 观测资料逐渐增加,质量和数量都有较大改善。这些资料很快应用到预报业务中,袁子鹏等(2006)分析了辽宁、内蒙古区域 AMDAR 资料的时空分布规律,并结合一次天气过程分析了 AMDAR 资料的特点;拓瑞芳等(2006)分析了机场附近 AMDAR 资料的特点以及对一次冷锋过境所起的作用,黄卓等(2006)利用 AMDAR 资料分析了几次重大的天气过程,刘小魏等(2007)利用统计学方法,分析了 AMDAR 资料的时空分布特征,发现 AMDAR 资料的时间密度大约是探空资料的 10 倍,并且质量上接近探空资料,梁科等(2007)利用 GRAPES 区域模式对华南地区的一次致灾暴雨过程进行模拟分析,发现有 AMDAR 资料加入的同化分析场不仅能够模拟出主要的降水区域,而且降水强度与实况更加吻合,仲跻芹等

(2010)利用北京市气象局使用 WRF (Weather Research and Forecasting model)模式的快速更新循环同化系统进行短期数值天气预报的影响研究,发现 AMDAR 资料对预报系统的 24 h 和 12 h 的 TS 评分有明显提高,对中雨区偏大现象有所改善。以上研究主要集中在一些特殊天气过程的短时和临近天气预报的分析和模拟,很少使用我国自主研发的 GRAPES 全球数值预报系统在准业务环境下进行长时间的影响试验。本文在分析了 AMDAR 资料的特征和质量的基础上,利用 GRAPES 全球数值预报系统,在准业务环境下进行两个月的同化预报循环试验,分析研究了 AMDAR 资料对同化和预报的影响。分析和预报结果同美国国家环境预报中心全球分析资料(FNL)相比,比较结果有助于我们对 AMDAR 资料重要性的认识以及对我们 GRAPES 系统对 AMDAR 资料的吸收应用情况有个定量评估。

## 2 AMDAR 资料

### 2.1 观测资料量及其分布

AMDAR 资料是民航飞机上的自动观测仪器观测的,以 WMO 规定的统一电码格式进行国际交换的观测资料。国家气象信息中心通过 GTS (Global Telecommunication System)接收 AMDAR 资料,进行解码的处理存入要素库。AMDAR 资料的观测要素是不同高度层的风、温度。AMDAR 资料的国家主要是来自北美、东亚、西欧、澳大利亚等发达国家。近年,国家信息中心接收到的 AMDAR 资料量显著增加,到 2013 年每天大约有  $20 \times 10^4$  多份(图 1)其中在 00:00 (世界协调时,下同)和 12:00 资料最多,6 h 时间窗内大约在  $5 \times 10^4$  份,经过质量控制和稀疏化后进入同化系统的份数 6 h 的同化时间窗口内大约是  $2 \times 10^4$  份。

AMDAR 资料的数量在垂直方向上的分布如图 2。从图中可以看出在 1000 m 以下 AMDAR 资料的数据量是较大的,6 h 时间窗口内大约是 7000 多份,因为在这个高度以下多是飞机场附近的观测,飞机多在起降阶段,观测密度较大,随着高度的增加,飞机进入了爬升阶段,观测数在减小,在 2000~10000 m 之间,每 1000 m 观测数大约是 3000~4000 份。当高度在 10000~12000 m 的平飞阶段,观测数稳定在每 1000 m 5000~6000 份。

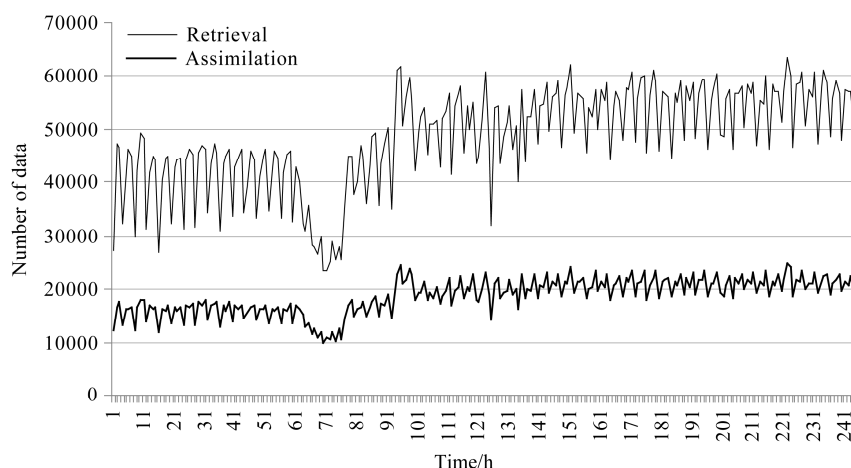


图 1 2013 年 5 月 1 日至 6 月 30 日每 6 h 间隔获取的全球 AMDAR 观测份数以及进入同化系统的份数

Fig. 1 The number of retrieval data and the data used in assimilation system in global scope from 1 May 2013 to 30 Jun 2013, time interval is 6 h

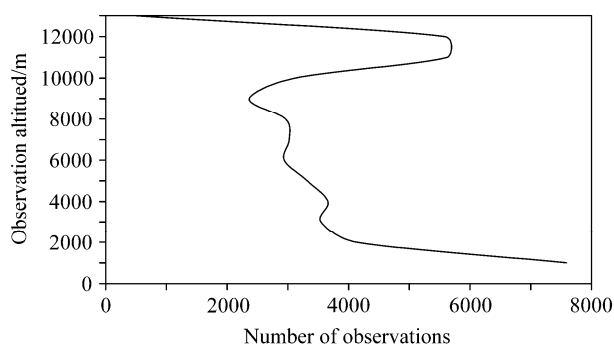


图 2 2013 年 5 月 1 日至 6 月 30 日每 6 h 间隔的全球 AMDAR 观测数在垂直方向上的平均分布

Fig. 2 Mean distribution of AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) observation numbers in the vertical profile from 1 May 2013 to 30 Jun 2013, time interval is 6 h

## 2.2 观测资料水平分布

AMDAR 资料的分布主要在东亚、西欧、澳大利亚和北美这四大区域的航线上,如图 3,我们给出了 2013 年 5 月 18 日 12:00 AMDAR 资料在 6 h (前后 3 h) 时间窗内的水平分布情况。

## 2.3 观测资料质量分析

观测资料的质量直接决定了同化系统的分析值的好坏,而作为模式初值的分析场也最终影响了预报效果,因此对观测资料的质量评估也是数值预报中重要的一步。为了评估 AMDAR 资料的质量情况,我们先给出全球范围内 AMDAR 资料变量在垂直层次上两个月的观测和背景场差的平均偏差和标准差(图 4),从图中可以看出温度的平均偏差在  $0.2^{\circ}\text{C}$  左右,标准差在  $2^{\circ}\text{C}$  以内。风的平均偏差和

标准差如图 5。从结果可以看出风的平均偏差在  $0.2\text{ m/s}$  以内,标准差在  $500\text{ hPa}$  以下是  $3\text{ m/s}$  以内,而  $500\sim 200\text{ hPa}$  稍大,大约是  $4\text{ m/s}$ 。探空资料风偏差统计结果如图 6 平均偏差在  $0.2\text{ m/s}$  以内,标准差在  $3\sim 4\text{ m/s}$ ,这表明 AMDAR 资料的精度和探空资料是相当的。在 3D\_VAR 同化系统中,要求观测误差的分布是正态的,结果表明 AMDAR 资料的观测余差的分布接近正态和无偏的如图 7,基本满足 3D\_VAR 的理论要求。

## 3 AMDAR 观测资料在数值预报系统应用效果分析

### 3.1 模式系统简介

本文的数值试验利用了我国自行研发的 GRAPES 全球数值预报系统(庄世宇等, 2005; 薛纪善等, 2008),模式水平分辨率是  $0.5^{\circ}$ (经度) $\times 0.5^{\circ}$ (纬度),采用可压的、非静力、半隐式—半拉格朗日的时间积分方案,水平方向离散采用 Arakawa-C 跳点格式,垂直方向离散采取 Charney-Phillips 跳层分布,垂直坐标选取高度地形追随坐标,垂直层次 36 层,模式层顶为  $10\text{ hPa}$ 。模式变量是温度、风和比湿。同化系统是三维变分同化分析系统,分析系统中垂直层次是等压面 29 层,分析变量是高度、风和相对湿度,同化时间窗是 6 h。同化系统得到的分析场要经过垂直插值和变量转换提供给模式。本文做了两组试验:试验 1 为控制试验,同化资料地面、船舶、探空、飞机和云导风

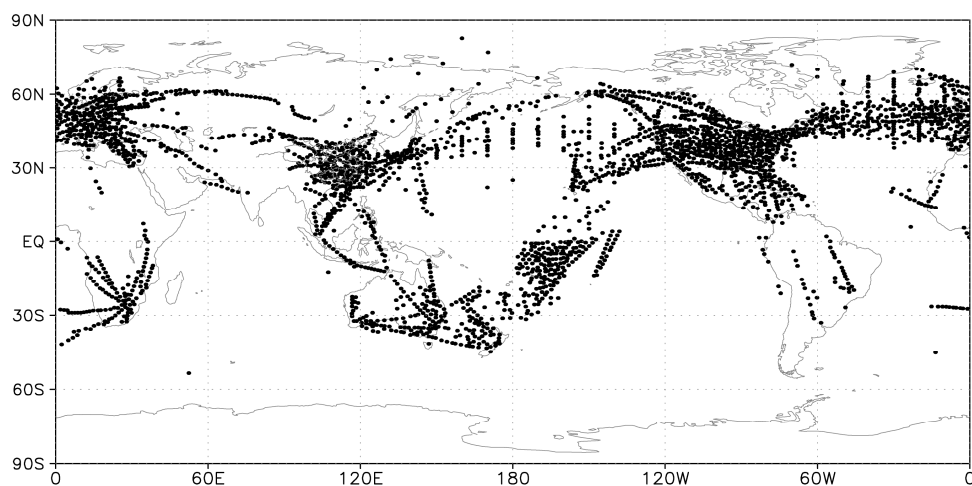


图3 2013年5月18日12:00从实时库检索到的AMDAR资料站点水平分布,时间窗口是6h,总共55012份

Fig. 3 AMDAR data horizontal distribution from in global scope at 1200 UTC 18 May 2013, time window is 6 h, total number is 55012

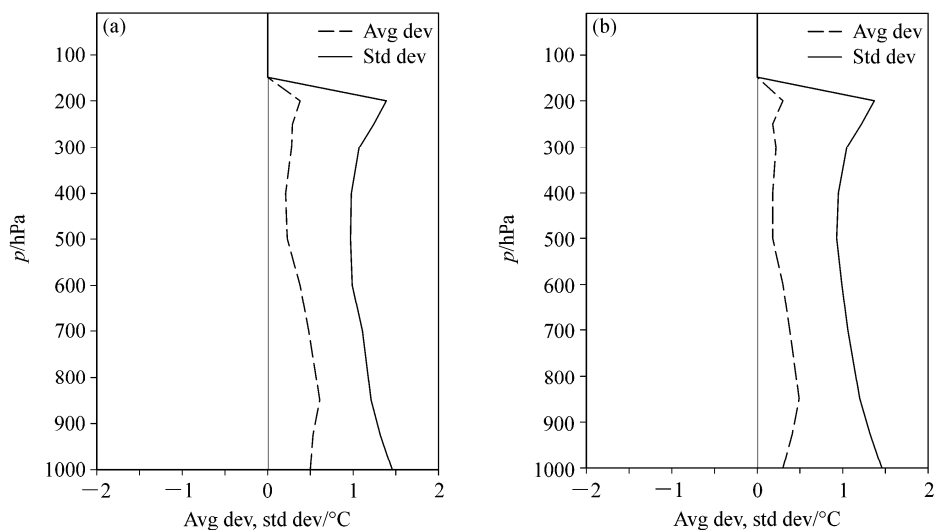


图4 AMDAR资料温度观测和背景场差值(观测余差)的平均偏差和标准差:(a) 00:00;(b) 12:00

Fig. 4 Average deviation and standard deviation of temperature difference between observation and back ground in AMDAR data: (a) 0000 UTC; (b) 1200 UTC

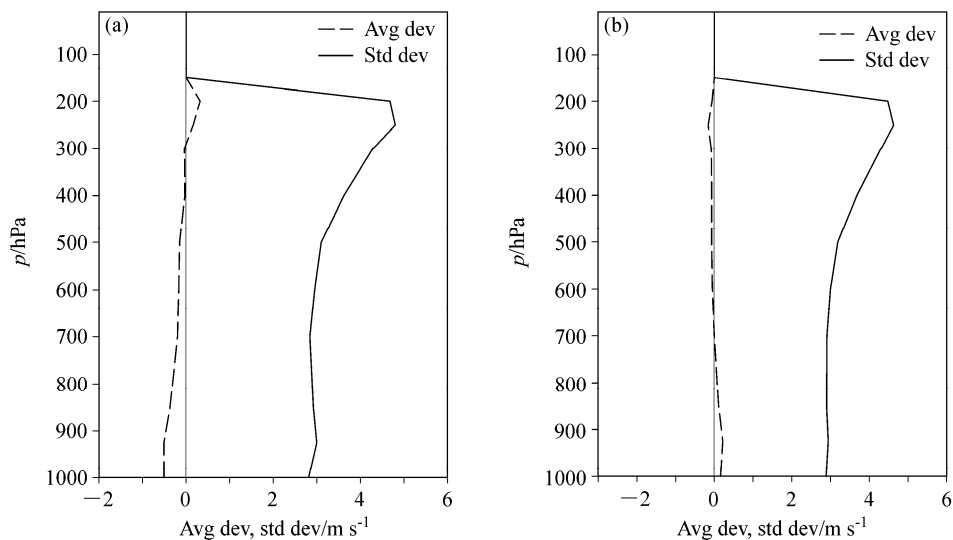


图5 AMDAR资料风的观测和背景场差值(观测余差)的平均偏差和标准差:(a)  $u$  风分量;(b)  $v$  风分量

Fig. 5 Average deviation and standard deviation of (a)  $u$  wind and (b)  $v$  wind in AMDAR data

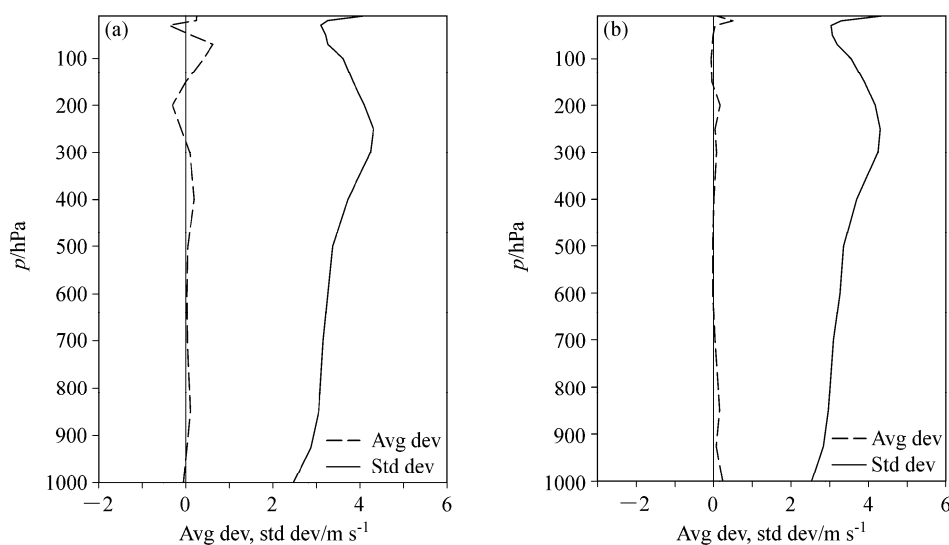
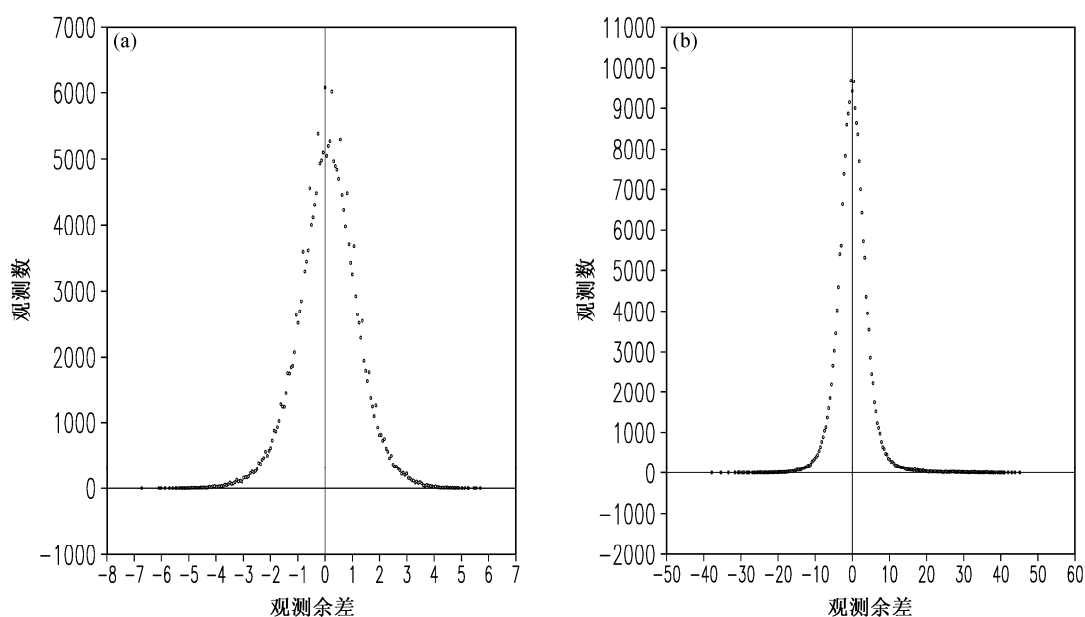


图 6 同图 5, 但为探空资料风的平均偏差和标准差

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for wind in radiosonde data

图 7 AMDAR 资料 12:00 的 (a) 温度 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和 (b) 风 (单位:  $\text{m/s}$ ) 观测余差的频率分布Fig. 7 Frequency distribution of temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and wind ( $\text{m/s}$ ) differences from AMDAR data at 1200 UTC

观测资料及卫星资料包括 NOAA 系列和 METOP 系列的卫星资料; 试验 2 在试验 1 中扣去飞机观测资料。试验时段是 2013 年 5 月 1 日 00:00 至 6 月 30 日 18:00。3D\_VAR 中的背景误差协方差矩阵是利用美国 NMC (National Meteorology Center) 方法估计得到, 此方法假设在一定预报时效内预报模式误差的统计结构变化很小, 背景场误差由模式同一预报时刻不同预报时效 (比如 24 h 和 12 h) 的预报场之差的长期统计得到 (Parrish and Derber,

1992)。为说明 AMDAR 资料的影响效果, 给出了全球和飞机观测密集的北美、欧洲区域作为检验区域。

### 3.2 同化效果分析

以美国 NCEP 业务中心同化系统的 FNL 资料作为参照场, 比较同化结果和参照场的差别。图 8 为全球 500 hPa 高度分析场。从图 8 可以看出, 与 FNL 相比, 试验 1 的同化结果比试验 2 的同化结果平均偏差和均方根误差都小。图 9 至图 11 是北美

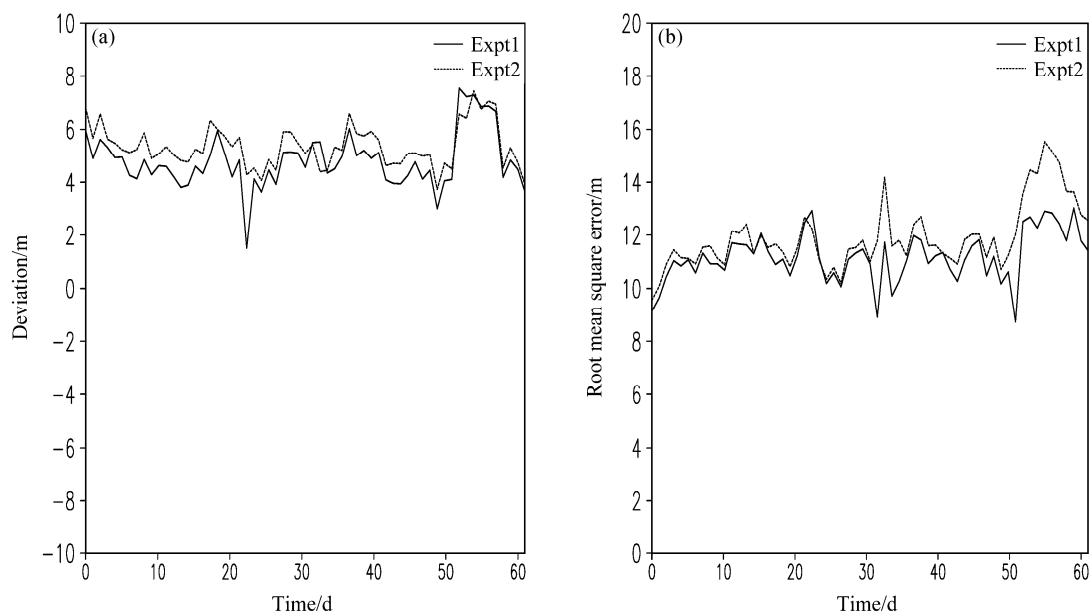


图 8 全球 500 hPa 高度场 (a) 偏差和 (b) 均方根误差 (FNL 资料作为参考值)

Fig. 8 (a) Deviation and (b) root mean square error of height analysis compared with FNL in global at 500 hPa

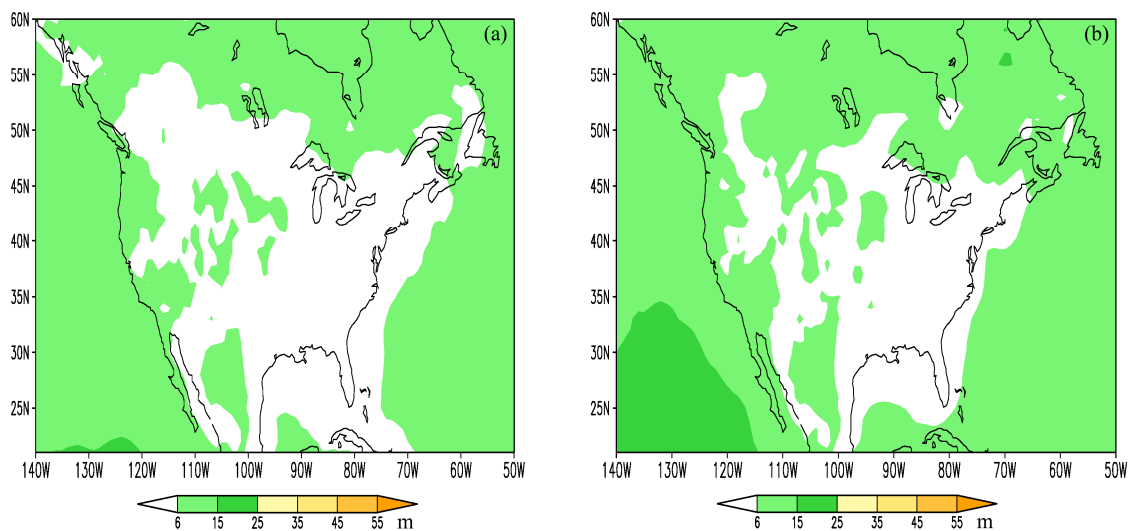


图 9 北美区域 500 hPa 高度场均方根误差 (FNL 资料作为参考值) 水平分布 (单位: m): (a) 试验 1; (b) 试验 2

Fig. 9 Horizontal distribution of root mean square error of 500-hPa height (m) compared with FNL in North America

区域 500 hPa 高度和风的同化分析场同 FNL 作为参考值的均方根误差的水平分布。从图中可以看出, 试验 1 里的高度场比试验 2 的高度场主要改进的地方是在加拿大的西南部、美国的东部和东南部, 以及靠近美国的东太平洋部分区域。整个北美区域风场都有较明显的改进。图 12 是全球分析场和 FNL 均方根误差的垂直廓线图。从图 12 可见, 无论是高度场还是风场, 试验 1 好于试验 2, 高层均方根误差减小更明显。

### 3.3 预报效果分析

在试验时段, 每天 00:00 和 12:00 做预报, 预报时效为 7 d, 检验内容包括和 FNL 的距平相关系数和预报均方根误差, 检验的量是高度和风场。距平相关系数取值范围为 0~1.0, 越接近 1.0 越好, 预报均方差越小越好。下面给出了全球、北美和欧洲区域 500 hPa 高度和风的距平相关系数以及预报均方根误差。图 13、14 显示, 全球范围内的 7 d 预报同 FNL 相比, 无论高度场还是风场, 试验 1 的距

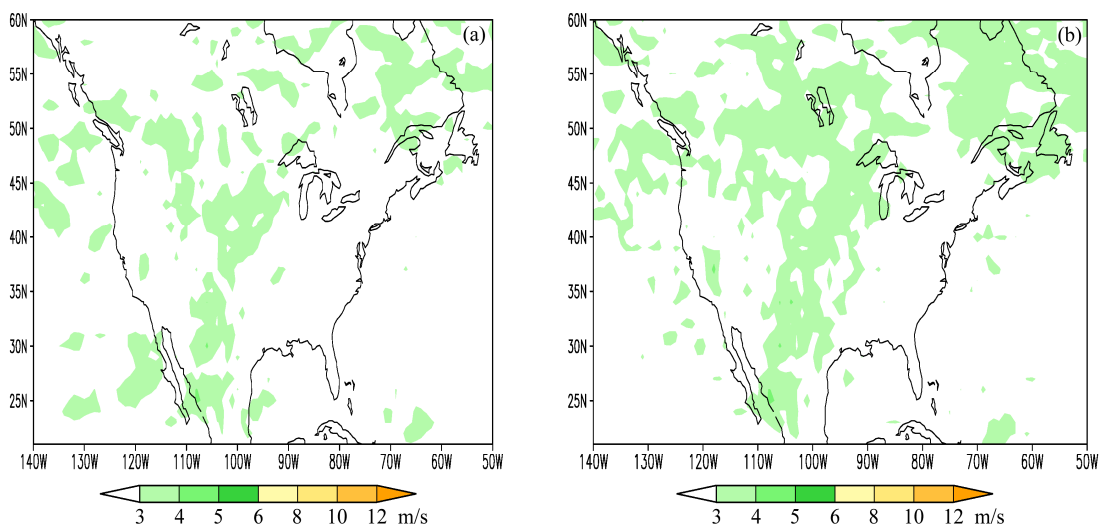


图 10 北美区域 500 hPa 的风场  $u$  分量全球同化分析场均方根误差 (FNL 资料作为参考值) 水平分布: (a) 试验 1; (b) 试验 2  
Fig. 10 Horizontal distribution of root mean square error of  $u$  wind analysis compared with FNL at 500 hPa in North America

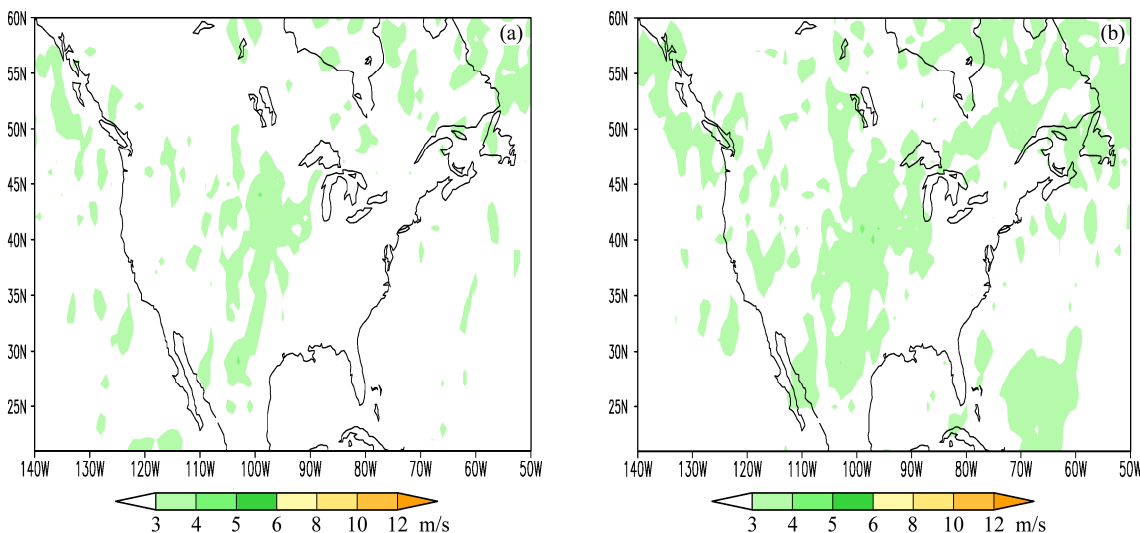


图 11 同图 10, 但为风场  $v$  分量  
Fig. 11 Same as Fig. 10, but for  $v$  wind

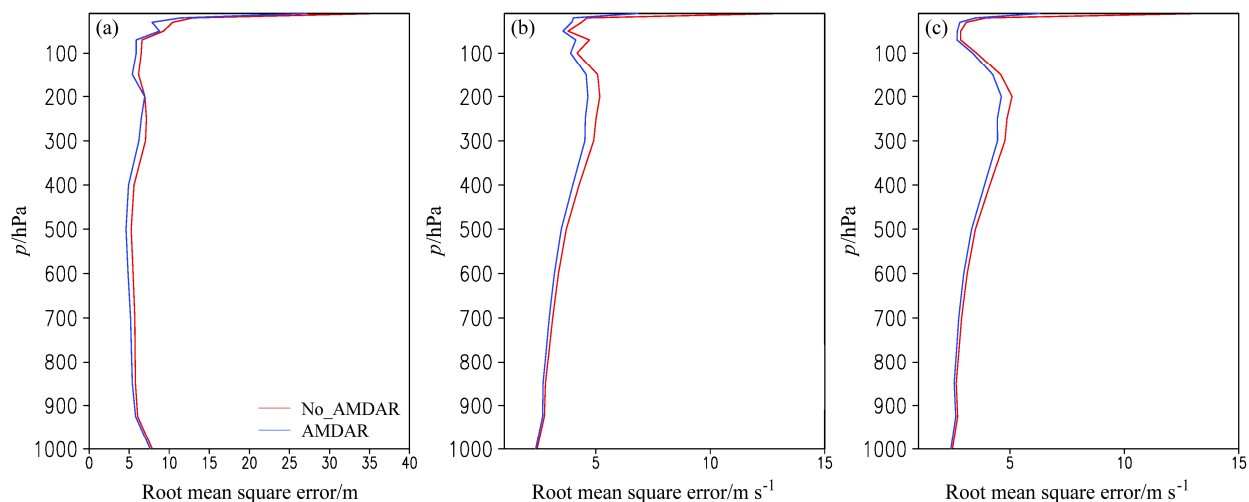


图 12 (a) 高度场、(b) 风场  $u$  分量和 (c)  $v$  分量全球同化分析场均方根误差 (FNL 资料作为参考值) 的垂直廓线  
Fig. 12 Vertical profile of root mean square error about (a) height, (b)  $u$  wind, and (c)  $v$  wind compared with FNL in global

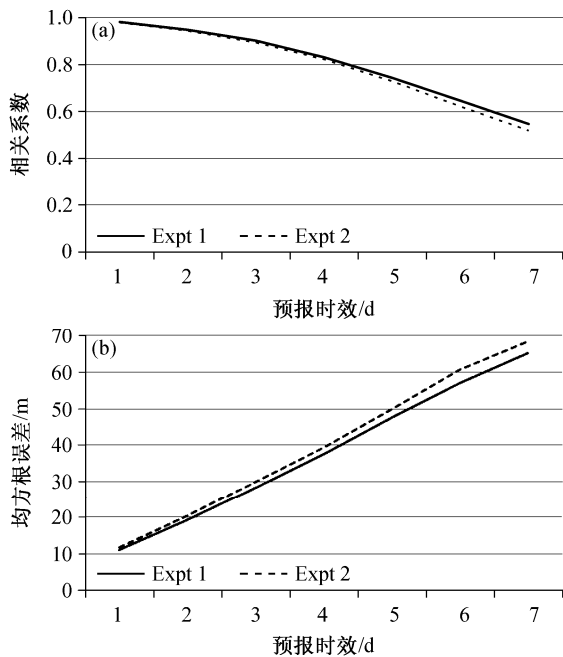


图 13 2013 年 5~6 月全球 (a) 高度场预报和 FNL 的距平相关系数以及 (b) 高度场均方根误差 (FNL 资料作为参考值)

Fig. 13 (a) Anomaly correlation coefficient and (b) root mean square error of height forecast compared with FNL in global from May to June 2013

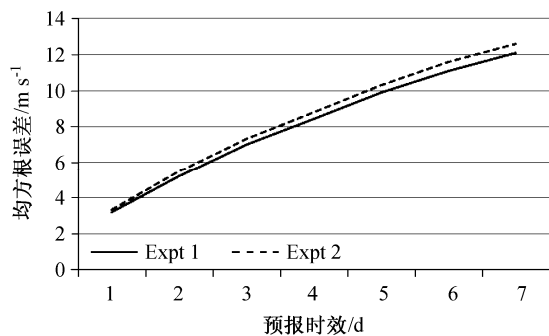


图 14 2013 年 5~6 月全球风场预报均方根误差 (FNL 资料作为参考值)

Fig. 14 Root mean square error of wind forecast compared with FNL in global from May to June 2013

平相关系数和均方根误差均比试验 2 的有所改进。试验 1 的高度场预报时效比试验 2 的预报时效提高了 0.3 d。随着预报时效的增加, 试验 1 的均方根误差比试验 2 的减小越明显, 高度场的均方根误差减小可达 3~4 m, 风场的均方根误差减小可达 0.5 m/s。北美区域预报效果比全球范围的改进更加明显 (图 15、16), 试验 1 比试验 2 的高度场预报时效提高了 0.5 d, 均方根误差减小大约 4 m, 风场的均方根误差减小可达 0.5 m/s, 这说明北美区域密集的 AMDAR 资料对预报的改进起到了重要作用。欧

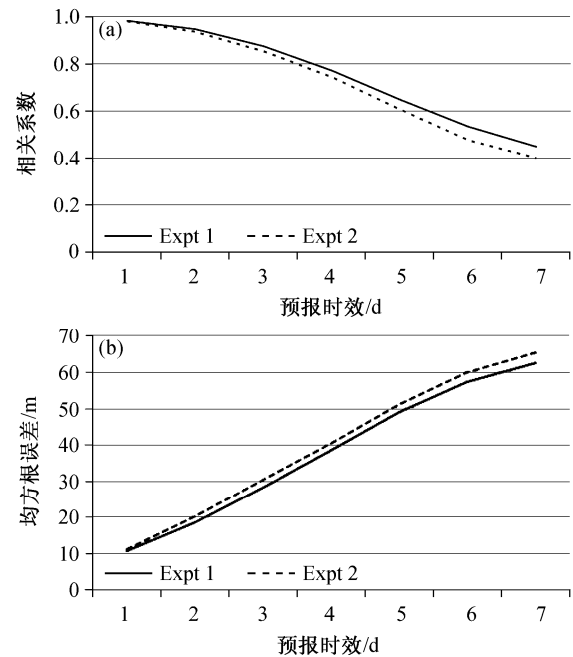


图 15 2013 年 5~6 月北美区域 (a) 高度场预报和 FNL 的距平相关系数以及 (b) 高度场预报均方根误差 (FNL 资料作为参考值)

Fig. 15 (a) Anomaly correlation coefficient and (b) root mean square error of height forecast compared with FNL in North America from May to June 2013

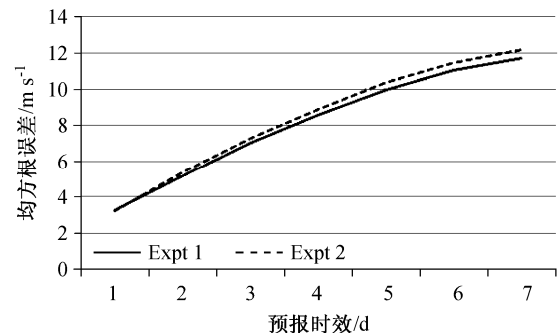


图 16 2013 年 5~6 月北美区域风场预报均方根误差 (FNL 资料作为参考值)

Fig. 16 Root mean square error of wind forecast compared with FNL in North America from May to June 2013

洲区域 AMDAR 资料对预报也有明显正贡献, 尤其高度预报场的改进略高于全球区域 (图 17), 预报时效提高了 0.4 d, 风场的改进和全球范围的基本相当 (图 18)。亚洲区域和欧洲、北美区域的结果类似 (图略)。

## 4 结论和讨论

本文分析了 AMDAR 资料的特性和分布, 并利

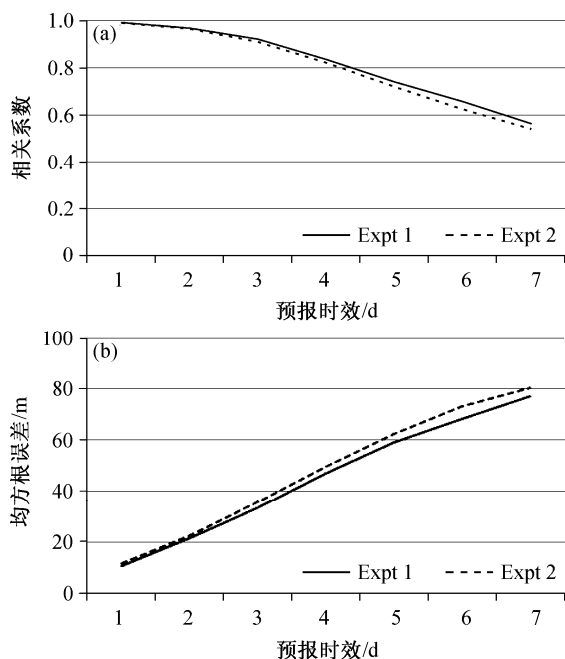


图 17 同图 15, 但为欧洲区域

Fig. 17 Same as Fig. 15, but for Europe

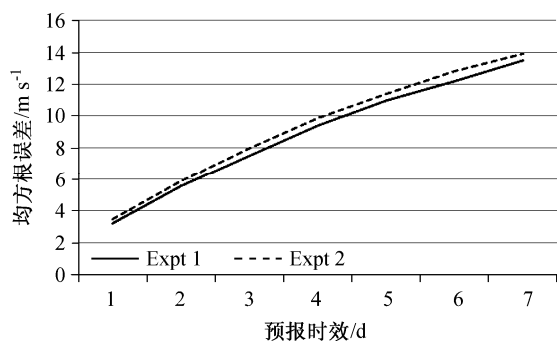


图 18 同图 16, 但为欧洲区域

Fig. 18 Same as Fig. 16, but for Europe

用我国自主研发的 GRAPES 数值模式系统,研究了全球范围内 AMDAR 资料对高度场、风场的同化和预报效果的影响。主要结论如下:

(1) AMDAR 资料主要分布在北美、西欧、东亚和澳大利亚地区的航线上。

(2) AMDAR 资料的系统性偏差很小,精度较高,和探空资料的精度相当,且基本上是正态无偏的误差结构。

(3) 用 AMDAR 资料比不用 AMDAR 资料同化得到的高度和风的分析场要更接近 FNL 资料。

(4) 从预报的效果来看,AMDAR 资料对预报效果有正贡献。主要体现在,距平相关系数提高,预报时效延长,预报的均方根误差减小,并且

AMDAR 资料比较密集的北美、欧洲和东亚地区的预报改善效果要高于全球的预报改善效果。

本文没有分别分析 AMDAR 资料在起降阶段和平飞阶段的资料质量和对数值预报的影响,以及在区域模式中的表现,这将是我们要进行的工作。

## 参考文献 (References)

- Benjamin S G, Schwartz B E, Cole R E. 1999. Accuracy of ACARS wind and temperature observations determined by collocation [J]. *Wea. Forecasting*, 14: 1032–1038.
- Benjamin S, Moninger W R, Smith T L, et al. 2007. TAMDAR Impact Experiment Results for RUC Humidity, Temperature, and Wind Forecasts [C]// 11th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS). San Antonio, Texas: Amer. Meteor. Soc.
- Cardinali C, Isaksen L, Andersson E. 2003. Use and impact of automated aircraft data in a global 4DVAR data assimilation system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 1865–1877.
- Fournier C, Holden S D. 2005. Development of the Canadian Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Program and Plans for the Future [C]// 13th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation. Savannah, GA.
- 黄卓, 李延香, 王慧, 等. 2006. AMDAR 资料在天气预报中的应用 [J]. *气象*, 32 (9): 42–48. Huang Zhuo, Li Yanxiang, Wang Hui, et al. 2006. Application of AMDAR data to weather forecast [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 32 (9): 42–48.
- 梁科, 万齐林, 丁伟钰, 等. 2007. 飞机报资料在 0506 华南致灾暴雨过程模拟中的应用 [J]. *热带气象学报*, 23 (4): 313–325. Liang Ke, Wan Qilin, Ding Weiyu, et al. 2007. The application of assimilated aircraft data in simulating the heavy rain over South China in June 2005 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 23 (4): 313–325.
- 刘小魏, 曹之玉, 兰海波. 2007. AMDAR 资料特征及质量分析 [J]. *气象科技*, 35 (4): 480–483. Liu Xiaowei, Cao Zhiyu, Lan Haibo. 2007. Analysis of characteristics and quality of AMDAR data [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 35 (4): 480–483.
- Parrish D F, Derber J C. 1992. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 1747–1763.
- Pouponneau B, Ayrault F, Bergot T, et al. 1999. The impact of aircraft data on an Atlantic cyclone analyzed in terms of sensitivities and trajectories [J]. *Wea. Forecasting*, 14: 67–83.
- Rukhovets L, Tenenbaum J, Geller M. 1998. The impact of additional aircraft data on the Goddard earth observing system analyses [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 2927–2941.
- Schwartz B, Benjamin S G. 1995. A comparison of temperature and wind measurements from ACARS-equipped aircraft and rawinsondes [J]. *Wea. Forecasting*, 10: 528–544.
- 陶士伟, 郝民, 赵琳娜. 2009. AMDAR 观测资料分析及质量控制 [J]. *气*

- 象, 35 (12): 65–73. Tao Shiwei, Hao Min, Zhao Linna. 2009. Quality control procedures and its application in AMDAR observation data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (12): 65–73.
- 拓瑞芳, 金山, 丁叶风, 等. 2006. AMDAR 资料在机场天气预报中的应用 [J]. 气象, 32 (3): 44–48. Tuo Ruifang, Jin Shan, Ding Yefeng, et al. 2006. Airport weather short-range forecasting using AMDAR data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (3): 44–48.
- 薛纪善, 陈德辉, 等. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 230–269. Xue Jishan, Chen Dehui, et al. 2008. Scientific Design and Application on Numerical Forecast System GRAPES (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 230–269.
- 袁子鹏, 陈艳秋, 陈传雷, 等. 2006. 辽宁内蒙古 AMDAR 资料统计及个例预报应用 [J]. 气象与环境学报, 22 (1): 64–67. Yuan Zipeng, Chen Yanqiu, Chen Chuanlei, et al. 2006. Statistical analysis on the AMDAR data of Liaoning and Inner Mongolia and case studies [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 22 (1): 64–67.
- 仲跻芹, 陈敏, 范水勇, 等. 2010. AMDAR 资料在北京数值预报系统中的同化应用 [J]. 应用气象学报, 21 (1): 19–28. Zhong Jiqin, Chen Min, Fan Shuiyong, et al. 2010. Assimilation application of AMDAR data to the operational NWP system of Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (1): 19–28.
- 庄世宇, 薛纪善, 朱国富, 等. 2005. GRAPES 全球三维变分同化系统—基本设计方案与理想试验 [J]. 大气科学, 29 (6): 872–884. Zhuang Shiyu, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. 2005. GRAPES global 3D-var system—Basic scheme design and single observation test [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 872–884.