

AMDAR数据在数值天气预报中的影响评估

吕文忠¹ 蔡秀华² 孙京利³

(1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081; 2 中国气象科学研究院, 北京 100081;

3 北京玖天气象科技有限公司, 北京 100081)

摘要: 简要回顾了飞机自动化气象观测发展的历程, 讨论了飞机观测数据的质量和偏差校正方法, 评估了飞机观测数据对地区和全球数值天气预报的积极作用, 特别是在急流附近的高动能地区的重要性, 并介绍了国内航空器气象数据中继 (AMDAR) 的发展状况。

关键词: AMDAR观测, 校正方法, 数据质量

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.008

Impact Assessment of AMDAR Data in NWP

Lyu Wenzhong¹, Cai Xiuhua², Sun Jingli³

(1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 3 Beijing Jiutian Meteorological Technology Co. Ltd., Beijing 100081)

Abstract: This paper briefly reviews the development of aeroplane automatic meteorological observation, and discusses the quality and deviation correction methods of aeroplane observation data. The positive effect of aeroplane observation data on regional and global numerical weather prediction, especially the importance of aeroplane observation data in high kinetic energy areas near the jet stream is evaluated. The development of AMDAR in China is introduced finally.

Keywords: AMDAR observation data, correction method, data quality

0 引言

低成本、自动化的飞机观测, 现在已经是继地面观测站和卫星之后的第三大气象数据来源。常规高空观测虽然历史长, 资料质量稳定, 但局限于固定台站固定时次, 其资料时空分辨率有限^[1]。飞机气象观测在飞机航线上具有采样频率高、探测层次密集^[2]等特点, 对常规高空气象观测具有重要补充作用。飞机观测主要集中在急流高度附近, 对于确定很多天气系统的驱动力或者说动能来源尤其有效。飞机观测数据不仅能对常规高空数据进行补充, 还提供了在水平和垂直方向其他设备很难观测到的气象要素。航空器气象数据中继 (AMDAR) 资料可以在天气预报和航线气象服务中用于一些极端天气现象的预警^[3]。高时空分辨率的飞机气象资料是天气预报重要的资料来源之一, 可为机场终端区的强对流天气短临预报提供高时间密度的垂直探测信息^[4]。可结合卫星资料用于研究浅层积云的分布和动力学特征^[5]。利用飞机和风廓线雷达观测资料可以分析低层大气的风场结构^[6]。AMDAR

资料可以提高大尺度的短期和中期天气预报能力^[7], 提高海洋上空的高层风场预报, 这种提高效果在探空资料稀疏的地区更明显。在大雾天气的数值模拟和分析过程中, AMDAR资料对气温场分析有显著影响^[8]。由于飞机观测资料时空密度较大, AMDAR资料可以弥补现有常规探空资料在时空分布上的不足, 是目前气象行业发展垂直观测业务的重要研究内容。通过世界气象组织 (WMO) 的AMDAR计划, 各国的飞机观测气象资料已经实现全球交换。本文回顾了AMDAR业务的发展历史, 介绍并研判AMDAR资料在数值预报业务中的应用, 希望对相关部门提供一定的参考价值。

1 飞机自动化观测的发展历程

利用飞机进行气象观测始于20世纪30年代, 最初是手动记录观测数据, 由于在转录和远程通讯中易出错及飞机的位置和地球风速不准确, 观测数据的参考价值不大。首次自动记录观测数据是1974年在“全球大气研究计划” (GARP) 的“大西洋热带试验”项目上实现的。当时观测数据被保存在飞机的记录系统里, 而实时传输观测数据则是从1978—1979年进行的“GARP第一次全球试验” (FGGE) 开始的。飞机观测数据最初仅用于科研上, 但随着其量与质的迅速提

收稿日期: 2019年10月21日; 修回日期: 2019年11月28日

第一作者: 吕文忠 (1961—), Email: wzhlh@sohu.com

通信作者: 蔡秀华 (1963—), Email: caixha@126.com

升,应用范围也大大拓展。飞机观测数据质量提升的关键是应用了精准长距离导航系统(Loran)和惯性导航系统(INS),它们可提供准确的飞机位置及相关地球风速^[9]。

FGGE之后,“飞机至卫星数据中转”(ASDAR)项目的专用观测设备被安装在了商用飞机上,至此飞机观测和数据传输全部实现了自动化。在随后的20年里,隶属8个航空公司的20架安装了ASDAR的飞机源源不断地提供观测数据报告,这些报告证明了高质量的风速和温度观测数据可以利用商用飞机上获取,特别是在可以影响气旋生成和风暴进化的急流附近的高动能地区。

20世纪80年代,数值天气预报(NWP)模式对北半球短期高空风速预测的误差在9~10 m/s(均方根风速向量误差),这些误差增加了航空公司的运营成本。联邦航空管理局(FAA)为此设立了“航空天气预报工作队”项目,以提高全球区域预报中心(WAFCs)和美国气象局(NWS)应用NWP模式预报的准确度。相应地,5家美国航空公司允许WAFCs实时获取和使用它们的飞机观测报告。之后的20年里,全球范围内风速预报的准确性得到明显提高,其中北半球的风速误差下降了约40%,从10 m/s下降到了6 m/s。更重要的是,在急流附近(风速大于40 m/s的地区),风速误差从大于13 m/s降至小于8 m/s,减少了约45%的误差,从而使飞机更为有效地避开意外强顺风或强逆风,航空公司的运营效率和燃油使用率因此得到显著提高。

从20世纪90年代末开始,AMDAR项目扩展到了全球10多个国家的39家航空公司的超过3500架飞机上,每天提供超过680000个风速和温度观测报告。其中数据覆盖密度最大的地区是北美和欧洲空中交通繁忙的地区。海洋观测则局限于跨洋航线覆盖的高对流层地区。根据WMO协议,AMDAR报告由NCEP进行监测。

近年来,AMDAR资料在全球范围内都得到大力普及,包括一些发展中国家。许多研究^[10-14]表明,在AMDAR资料的辅助下,飞机气象观测所具有的特点和优势使其成为天气分析以及数值预报中非常重要的资料。

2 AMDAR气象要素观测特点

目前的常规观测系统中对于高空的探测主要依赖于每日两次的探空气球观测(个别区域站或汛期时次数有适当增加),缺点是时间间隔过长,而风廓线、微波辐射计等新型仪器探测高度相对较低,准

确性也还不能得到很好的保证^[15]。相对于气球探空观测、雷达遥感观测等高空气象观测,飞机观测有其独特的气象观测特点,飞机气象观测的主要目标是探测高空大气状况及气象要素分布,垂直分辨率相对较高^[6],AMDAR资料可按高度进行细化:<1000 m、7000~8000 m、8000~9000 m和10000~11000 m。6000 m以下的AMDAR资料可用来监测、采集和分析机场上空对流层及中下层的大气垂直结构;6000 m以上高度的AMDAR资料可体现飞行器飞行路线中对流层上层大气的结构特点。AMDAR资料水平分辨率为百米量级,时间分辨为几秒至几十秒,高于常规观测资料的分辨率^[16];探测高度可达100~200 hPa。飞机气象观测的项目一般包括:飞机位置和时间、经纬度、气压高度、温度、湿度、水平风矢量、垂直阵风、湍流扩散率等。Moninger等^[16]指出民用飞机观测还包括:高空风速、露点温度、结冰和湍流;有时还包括大气的水汽资料、飞机颠簸和积冰^[17]。飞机探测资料配合其他气象资料可以连续和有效地监视机场及其附近区域的天气演变趋势,捕捉到一些常规资料难以发现的中小尺度天气系统,有助于极端天气的预警,如低空风速切变现象。因为飞机起飞和降落期间的气象观测相当于探空,观测结果具有较高的时空分辨率,经过质量控制后的飞机观测数据可以是常规探测数据很好的补充。

3 AMDAR观测的质量评估和偏差纠正

为提高NWP的预报准确性,全球各NWP中心必须对所有进入数据库的数据进行检测和质量控制(QC)。为保证错误的AMDAR数据不被放入数据同化(DA)系统,所有飞机观测报告会经常被更新并传输到其他的NWP中心进行交叉比对,消除因机载设备和通信系统产生的误差。

AMDAR数据通常只有很小的系统误差。系统误差会随着季节和不同的飞机型号而波动。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)采用了Isaksen等^[18]2012年设计的纠正系统误差的方案,明显提高了对流层顶和平流层温度分析的水平及与卫星测量的契合度。其他NWP中心也计划实施类似的误差纠正方案。

4 AMDAR观测对短时区域预报的影响

第一个短时区域数值预报(NWP)模型是由NOAA的地球系统研究实验室(ESRL)研发,并在NCEP以小时为单位运行。为考察AMDAR数据对短时地区预报的影响,Benjamin等^[19]对比了一个80 km分辨率的快速更新循环(Rapid Update Cycle,RUC)预报模式中的MDCRS数据和由NWS操作的嵌套网格模型

(NGM) 依赖于探空观测(探空)信息的一天两次的预报数据。结果表明,连续的飞机数据使得250 hPa的风速预报误差减少了约10%。

2000年, Schwartz等^[20]分析了模型分辨率和物理环境对MDCRS观测的效用影响。通过比较一个60 km分辨率的RUC与一个40 km分辨率的RUC-2发现: RUC-2包括了更复杂的地表物理环境、地形状况、更高的垂直分辨率。结果是: RUC-2在所有长、中时预测都有更好的表现,最大的差别体现于短时预测。在300 hPa以上、700 hPa以下的提高主要是由于更高的垂直分辨率以及更好的边界层参数,然而在中等高度,由于当时上升和下降阶段资料的缺失,并没有很好的提高。

在认识到飞机上升和下降阶段数据的重要性后, NWS和FAA在20世纪90年代末期一起与一些美国航空公司合作,增加了观测频率。Petersen^[21]用当时20 km分辨率的RUC对这些高频率的风速和温度报告的影响进行了对比和测试。结果表明,飞机上升和下降阶段的温度和风速观测数据对所有高度的温度和风速预报都有不同程度的提高作用,其中对300 hPa以下的影响最大(图1),相当于把模型分辨率提高了两倍。

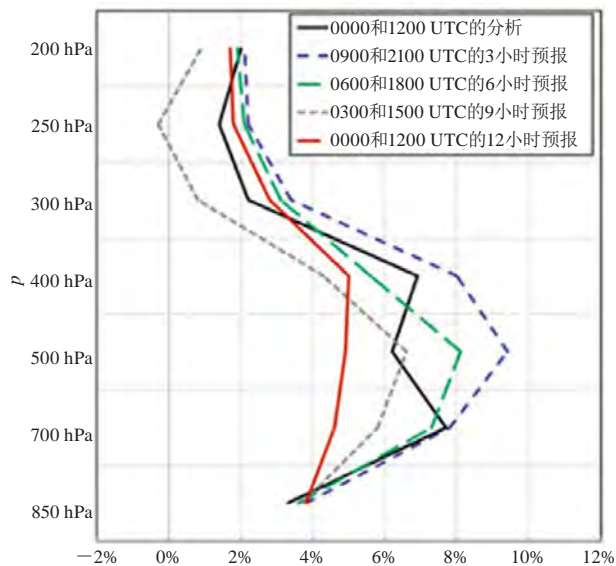


图1 飞机上升和下降阶段观测数据对NWP预报准确性的影响程度(基于Petersen 2004年测试^[21])

Fig. 1 The impact of the observation data on the NWP prediction accuracy in the rising and falling stages of the aircraft (Based on Petersen test in 2004^[21])

通过把包括和不包括上升和下降阶段数据进行RUC 12 h预测对比,即可以分析得出AMDAR观测的整体影响: AMDAR数据使所有高度风速预报精度提高了0.2~1.2 m/s,相当于从低层的5%一直提高到高层的20%。

近期的更多测试进一步展示了飞机自动化观测报告对美国短时预报的影响。在这些测试中,飞机观测报告不止局限于在WMO全球电信系统(GTS)上的AMDAR报告,还包括了其他来源的数据。最值得关注的是,10%~15%的观测数据是由装载了“对流层空气气象数据报告”(TAMDAR)系统的飞机提供的,主要设计为在500 hPa以下和机场附近。

5 AMDAR观测对全球数值预报的影响

评估AMDAR对全球数值预报准确性的影响与评估其对地区数值预报准确性的影响方法相同。首先,全球数据同化系统必须把飞机的观测报告与其他不同形式的大量观测报告(大多基于卫星并提供全球海洋数据)进行整合;其次,结合数值预报模型进行“数据拒绝”式测试。早期的评估多专注于ECMWF的报告,近期则基于更为广泛的全球各数值预报中心的报告。

Kelly等^[22]进行的一个长时全球研究,使用了ECMWF全球分析和预测系统对2002年8—9月、12月和2003年1月的数据进行了分析,全球15家航空公司提供了相应时段的AMDAR数据;Petersen^[23]利用这些数据和ECMWF全球数值预报模型,对北半球以及AMDAR数据密度最大的北美地区做了更详细的短时(12~48 h)预报分析,发现AMDAR温度和风速观测对高层对流层的短时预报精度有显著的影响(图2)。

当评估AMDAR对整个北半球数值预报的影响时,发现对至少48 h内的预报精度都有提高作用,第一天的提高幅度最大,从200、300~500 hPa,12 h平均温度和风速预报误差分别减小了14%和8%。而在没有AMDAR数据可用的高度上,预测精度的提高幅度则较小(例如在100 hPa温度预报误差只减小了3%~6%,风速预报误差只减小了2%~5%)。

当只对北美进行评估的时候,因为AMDAR数据覆盖密度大,对100 hPa以下的所有高度的预报精度都有影响,同时持续时间长,并且比对整个北半球的影响要高。在第一天中,200~300 hPa的温度预测误差减少了约23%,风速预测误差减少了12%~14%。对200~300 hPa温度和风速预测的提高一直持续两天。

进一步的研究表明,AMDAR数据对温度和风速预报精度的提高不仅限于北半球,对热带地区和南半球同样有益。显然,随着以后AMDAR数据越来越多,所有地区和全球的数值预报精度也将相应提高。

6 AMDAR观测影响的近期测试

近年来,虽然全球数据同化系统可用的卫星观

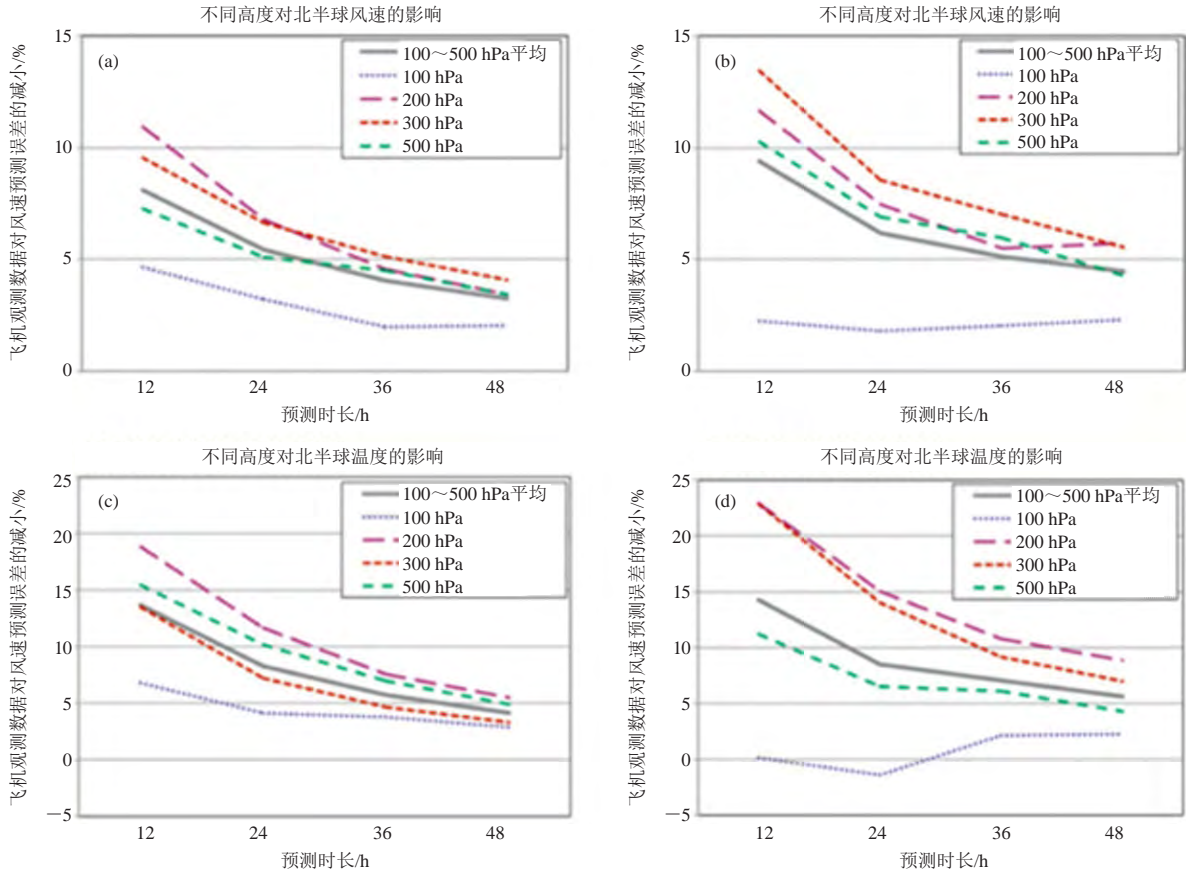


图2 AMDAR对ECMWF在不同高度的温度和风速短时预测的影响
(a, c) 北半球结果; (b, d) 北美地区结果 (基于2002年8—9月和2002年12月—2003年1月的ECMWF试验)

Fig. 2 The impact of AMDAR on the short-term prediction of ECMWF at different altitudes
(a, b) the results for the Northern Hemisphere; (c, d) the results for North America (based on the ECMWF data from August to September 2002 and December to January 2003)

测数据增加了很多, 但总体看只有不到5%的辐射 (Radiance) 数据得到了利用。相反, 只有5%参与AMDAR计划的飞机自动化观测现在是DA最大的非卫星数据来源, 这说明了其质量和重要性都在上升。

2012年, 5个NWP中心 (包括WAFCS, NCEP, ECMWF, Météo-France和GMAO) 用不同来源的数据比较减少24 h预报误差的贡献。其中AMDAR排行第三, 仅次于微波卫星观测 (AMSU-A) 和探空报告 (Raobs)。相对其他数据, AMDAR数据表现最为连贯和稳定。在飞机起降过程中获得的机场、急流和大气能量源附近的数据非常稀缺和重要, 且很容易地被纳入全球数据同化系统里。同一航线的不同飞机带来的报告还可以用来进行交叉测试。

对于独立事件, AMDAR的影响更大。例如在监测和预报热带气旋的发展和运动, 以及风暴的结构和风力分布时, AMDAR的作用是非常重要的, 因为自动站气象资料只能获得近海的气象情况, 并且空

间覆盖很有限, 卫星资料的覆盖范围及时间也比较有限, 而飞机自动化观测数据能提供高空气象情况和拥有较高的空间分辨率。Hoover等^[24]使用海军全球环境模型 (NGEM) 和海军研究实验室变异DA系统, 应用AMDAR数据对预报Hurricane Sandy的影响作了研究。结果表明, AMDAR系统在预报登陆的地点和时间上都比其他数据来源有着更大的影响, 是探空数据的两倍。

7 我国AMDAR资料概况

我国从2002年开始建立AMDAR资料的数据物理链路及接收平台及实时收集、处理业务流程。2003年以来, 我国每月获得的AMDAR资料数量占全球AMDAR资料数量的百分比为5%~20%。2003—2007年我国AMDAR资料数量并不稳定, 部分月份的缺报日数偏高, 甚至出现整月资料缺报的情况。直至2007年11月, 我国AMDAR资料的收集和传输进入稳定状态。总的来说, 早期AMDAR资料的资料量少, 稳定

性较差,但可为一些中短期天气系统的研究提供数据源。

2003年,我国参加AMDAR计划的航空公司很少,资料主要集中在以北京为中心的几条航线。随着我国航空运输业的迅速发展,大量配有气象观测仪器和信号处理软件的飞机投入运行,加入AMDAR计划的航空公司也开始增加,AMDAR报量迅速增加,并形成了以北京、上海和深圳等航空运输量较大的机场为中心的多个资料集中地区。早期资料主要集中在105°E以东地区,从2008年开始,西部地区的资料有所增加。2009年4月以后,云贵川地区以及新疆地区每月也能获得一定数量的飞机观测资料。

AMDAR资料质量的好坏是直接影响其在天气预报业务中的应用的的重要因素,为此美国NOAA开展了AMDAR资料与探空数据的相关比对研究,多年比较显示飞机观测的温度误差量级在1℃左右,而国内在这方面开展的工作却相对较少,一些学者^[25-26]对AMDAR数据进行了误差特性分析及应用探讨。为了确保AMDAR资料的质量,国家气象信息中心借鉴了美国AMDAR资料质量控制方案的经验,设计了针对中国AMDAR资料的6项控制流程,对原始的资料进行质量检验(图3),包括重复观测记录的剔除和处理、元数据信息检查、极值检查、飞机飞行状态检查机修订、空间一致性检查、时间一致性检查。

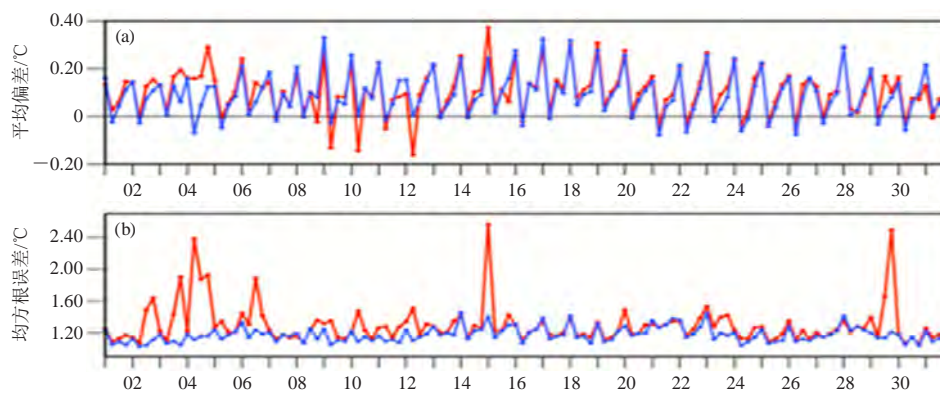


图3 AMDAR数据质控前后的质量对比(红线:质控前;蓝线:质控后)

Fig. 3 Quality comparison of AMDAR data before and after quality control (red line: before quality control; blue line: after quality control)

图3显示,不管是平均偏差,还是均方根误差,质量控制前的观测数据(红线)波动明显大于质量控制后的数据(蓝线),所以相对于质量控制前,质量控制后观测数据的质量更加稳定。随着AMDAR数据质量的不断完善,在现有类型的气象资料源中对提高数值天气预报的准确性,AMDAR数据占有了重要的地位。

2014年10月,我国正式参与WMO的GTS交换,通过GTS实现了我国AMDAR资料的全球交换,并通过实时数据库和卫星广播系统向各级气象部门提供实时的全球AMDAR资料。近年来,我国的AMDAR工作进展快速,获得了大量的相关气象资料,包含了温度、经纬度、高度、风速和风向信息,提高了天气预报包括数值预报的准确率。目前国家气象信息中心整合全球9套历史飞机报文资料,通过质量控制评估,建成1973年以来的全球飞机观测数据集(图4),包含商用飞机飞行阶段观测的温度、风场和湿度数据。其中,2003年以来,欧洲、美国、日本、加拿大、韩国等地的观测数量显著提升,相对早期发布的同类产

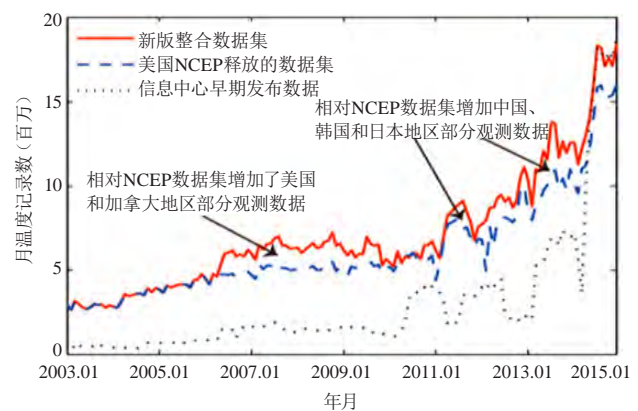


图4 整合后的月温度记录数

Fig. 4 Number of integrated monthly temperature records

品,数据增量超过72.5%。

由图4可见,多源、多类报文整合后,相对美国NCEP释放数据集,在中国、日本、韩国及北美地区的数据量优势明显。

随着我国AMDAR数据在质量和数据上的不断提高,其应用也不断增加。周显敬等^[28]设计发明了一种

基于物联网的民用航空机场气象监测系统已经比较成熟,通过能见度观测仪、风速仪、雨雪传感器、摄像头、温度传感器和湿度传感器将收集到的机场航道气象数据经过CPU分析处理后,由信号发射器发射信号传输给监控中心,扩展天线加强信号传输便于监控中心人员了解机场的气象状况,方便指挥控制飞机的降落起飞,提高飞机的安全性。王晓峰等^[29]将AMDAR数据用于局地强对流快速更新同化数值的模拟。尹金方等^[30]搜集了常规观测、雷达、地基GPS、飞机报等资料,将其进一步优化完善后,构建了东亚区域大气再分析数据集。采用多组物理过程参数化方案组合,开展了批量个例和长时间模拟试验,试验结果表明再分析系统初步具有在全球再分析的基础上提高区域再分析资料性能的能力,可将本再分析系统用于今后再分析数据的研制。

虽然飞机观测资料在我国已有广泛的应用,但国内的AMDAR观测应用技术的研究相对较为缓慢,自己的商用飞机探测、信息收集、处理系统还需要提高。

8 结论

AMDAR资料凭借高精度及大数据量已成为数值天气预报分析中不可或缺的一部分。AMDAR温度和风速观测数据对地区和全球短时和短时数值预报质量有明显提高作用。AMDAR在欧美已经得到了很大的发展,而在发展中国家并没有得到很好的规划。对于在数据稀缺地区扩大AMDAR观测网络,合作和增加飞机数量是很好的方法。

AMDAR资料现已成为我国高空气象观测资料的重要组成部分,在国家及地区的资料同行、数值预报业务中具有较高的应用价值。建议有关部门加大我国的民用飞机的气象探测项目的投入,借鉴国外比较成熟的飞机探测技术,尽快制定国家层级的飞机观测系统发展规划和配套政策,构建具有中国特色的飞机自动化观测系统。

参考文献

[1] 罗林艳,罗宇,钟艳雯,等. AMDAR气温资料和常规高空观测气温资料的对比分析. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 115-119.
 [2] 贾朋群,胡英,王金星. 民用航空气象观测综述. 气象科技, 2004, 32(4): 213-218.
 [3] NOAA. Status Report on AMDAR Programme in USA. The 8th Meeting of the AMDAR Panel, Santiago, 2005.
 [4] 周元,魏鸣仙,宋立雪. AMDAR资料的风温信息在机场终端区强对流天气分析中的应用. 大气科学学报, 2019, 42(2): 303-310.
 [5] Stefaan M A Rodts, Peter G Duynkerke, Harm J J Jonker. Size distributions and dynamical properties of shallow cumulus clouds from aircraft observations and satellite data. Journal of Atmospheric

Sciences, 2003, 60: 1895-1912.
 [6] 魏伟,叶鑫欣,王海霞,等. 飞机测风资料在大气边界层研究中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 24-34.
 [7] Cardinali C, Isaksen L, Andersson E. Use and impact of automated aircraft data in a global 4D-var data assimilation system. Monthly Weather Review, 2003, 131: 1865-1877.
 [8] Liang Aimin, Zhang Qinghong, Liu Kaiyu, et al. The 3D-var data assimilation experiments on a dense fog event the central Plain of China. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 23(1): 116-117.
 [9] Ralph A P. On the impact and benefits of AMDAR observations in operational forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 585-602.
 [10] 仲跻芹,陈敏,范水勇,等. AMDAR资料在北京数值预报系统中的同化应用. 应用气象学报, 2010, 21(1): 19-28.
 [11] Ballish, B A, Kumar, V K. Systematic differences in aircraft and radiosonde temperatures. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 11(11): 1689-1707.
 [12] 黄超凡,周林,宋帅,等. 南海周边海域越洋航线晴空颠簸的数值预报研究. 气象科学, 2015, 35(3): 317-322.
 [13] 龚俊强,刘朝顺,刘延安,等. 探空和飞机观测资料联合同化对台风“苏迪罗”(2015)数值模拟的影响研究. 热带气象学报, 2019, 35(1): 99-112.
 [14] 易军,王峰云,阎凤霞. 上海机场终端区AMDAR资料系统及应用. 气象科技, 2016, 44(4): 542-547.
 [15] Drtle C, Frey W, Hoff A, et al. Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 134: 229-239.
 [16] Moninger W R, Mamrosh R D, Pauley P M. Automated meteorological reports from commercial aircraft. American Meteorological Society, 2003, 84(2): 203-216
 [17] 黄卓,李延香,王慧,等. AMDAR资料在天气预报中的应用. 气象, 2006, (9): 42-48.
 [18] Isaksen L, Vasiljevic D, Dee R, et al. Bias correction of aircraft data implemented in November 2011. ECMWF Newsletter, 2012.
 [19] Benjamin S G, Brewster K A, Brummer R, et al. An isentropic three-hourly data assimilation system using ACARS aircraft observations. Monthly Weather Review, 1991, 119: 888-906.
 [20] Schwartz B E, Benjamin S G, Green S M, et al. Accuracy of RUC-1 and RUC-2 wind and aircraft trajectory forecasts by comparison with ACARS observations. Weather Forecasting, 2000, 15: 313-326.
 [21] Petersen R A. Do automated meteorological data reports from commercial aircraft improve forecasts? ICAO Magazine, 2004, 59: 4-7.
 [22] Kelly G, McNally T, Thepaut J N, et al. OSEs on all main data types in the ECMWF operation system. Proc Third Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction, Alpbach, March 9-12, 2004. WMO, 2004.
 [23] Petersen R A. Impact of AMDAR data on numerical prediction models. Proc Third Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction, Alpbach, March 9-12, 2004. WMO, 2004.
 [24] Hoove B T, Velden C S, Langland R H. Adjoint-based analysis of observational impact on tropical cyclone forecasts. 31st Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Orlando. American Meteorological Society, 2014.
 [25] 廖捷,熊安元. 我国飞机观测气象资料概况及质量分析. 应用气象学报, 2010, 21(2): 206-213.
 [26] 王瑞文,龚建东,韩威,等. AMDAR温度资料的偏差订正及对GRAPES系统的影响. 高原气象, 2017, 36(5): 1346-1356.
 [27] 江勤,张蕾,王晓峰,等. 飞机气象探测资料(AMDAR)质量控制与质量分析. 气象, 2017, 43(5): 598-609.
 [28] 周显敬,汪寒雨,李朝义,等. 一种基于物联网的民用航空机场气象监测系统. 北京博仁华盟科技有限公司, 2018.
 [29] 王晓峰,王平,张蕾,等. 上海“7-31”局地强对流快速更新同化数值模拟研究. 高原气象, 2015, 34(1): 124-136.
 [30] 尹金方,梁旭东,陈锋,等. 东亚区域大气再分析技术研究及数据集建设. 气象科技进展, 2018, 8(1): 79-84.