

探空温度偏差订正技术调研报告

李庆雷 陈哲 廖捷 周自江
(国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 探空资料在数值预报、资料同化、天气分析、气候变化、卫星资料校准等研究中发挥着重要作用。探空温度偏差大小持续受到太阳辐射等自然因素、观测系统改变等历史人为因素的叠加耦合作用影响, 使得其偏差订正工作变得非常复杂, 给上述众多研究应用带来较大的困扰和不确定性。本文调研了国内外主要探空温度偏差订正技术和相关产品的发展现状, 重点对比分析国外不同科研业务单位的技术方法, 同时结合中国探空温度偏差订正技术的发展现状和国内外差距, 对未来工作提出展望。

关键词: 探空温度, 太阳辐射, 观测系统, 不确定性, 偏差订正

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.004

Research Report on Radiosonde Temperature Bias Correction

Li Qinglei, Chen Zhe, Liao Jie, Zhou Zijiang
(National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

Abstract: Sounding data play an important role in numerical prediction, data assimilation, weather analysis, climate change, satellite data calibration and other research. The magnitude of sounding temperature bias is continuously affected by natural factors such as solar radiation and historical human factors such as changes in observation system, which make the bias correction work very complex. It has brought great trouble and uncertainty to the above research fields. Based on the investigation of the development status of the main technologies and related products of the sounding temperature bias correction in domestic and overseas, this paper focuses on the comparison and analysis of the technical methods of different foreign scientific research institutions, discusses the development status of the sounding temperature bias correction in China, puts forward relevant suggestions for future research plans.

Keywords: radiosonde temperature, solar radiation, observation system, uncertainty, bias correction

0 引言

常规探空可以给出观测站点上空一定范围内、垂直大气不同高度、多个气象要素的精准描述, 能够有效反映大气物理要素的垂直变化结构, 在数值预报、资料同化、天气分析、气候变化、卫星资料校准等研究方面发挥重要作用。与卫星资料相比, 探空资料的垂直分辨率更高且历史时间序列更长, 一直作为数值模式、天气预报和气候变化研究的重要数据基础。探空温度作为最常用的气象要素之一, 其重要性不言而喻。数值模式的发展及气候变化研究的深入更是对探空温度精准性提出了越来越高的要求。然而, 探空温度的精准性不仅一直受到太阳辐射的影响, 而且持续受到不同厂家生产的探空仪温度传感器换型升级和太

阳辐射误差订正算法逐渐改善的影响。这些因素会导致同一规定等压面层温度的长时间序列存在明显不均一现象。这种现象具体表现为, 在仪器换型或算法改进前后, 探空温度的均值或方差出现显著的跳变, 给数值预报资料同化、气候变化等研究带来极大的不确定性。因此, 近年来国内外许多气象科研业务单位都针对此问题开展了一系列深入的技术研究。

本文旨在介绍国内外主要探空温度偏差订正技术和相关产品的发展现状, 重点对比分析了国外不同业务科研单位的技术方法, 同时探讨了我国探空温度偏差订正技术发展现状及未来研究计划。本文第1部分介绍影响探空温度偏差大小的两个主要因素: 太阳辐射误差和观测系统改变。国际目前探空温度偏差技术相关经验将在第2部分中给出。在第3部分中, 介绍了国家气象信息中心在探空温度偏差订正方面的工作进展。第4部分对全文进行概述总结并对将来的工作进行展望。

收稿日期: 2019年11月27日; 修回日期: 2020年3月13日

第一作者: 李庆雷(1987-), Email: liql@cma.gov.cn

资助信息: 国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”(CMAGGTD003-5)

1 影响探空温度偏差大小的主要因素

探空温度时间序列的研究结果表明,影响温度偏差大小的主要因素包括两方面。一方面是自然因素,太阳辐射对于任何类型的探空仪器都具有明显的影响,其影响程度的大小不仅与探空仪所处观测点的太阳高度角有关,而且与不同探空仪器温度传感器响应性能有关。同时,太阳辐射误差的大小不仅与太阳辐射加热量有关,还取决于观测时的风速及云量等因素,如风速越大,带走的热量越多,可降低太阳辐射的加热作用^[1]。另一方面是历史人为因素,不同厂家的探空仪温度传感器换型升级以及相应的太阳辐射误差订正算法改进,亦将显著影响探空温度偏差大小^[2-7]。可以说,以上两个因素是耦合在一起共同影响探空温度偏差大小,使开展探空温度偏差订正工作变得非常复杂。具体来说,自然因素的影响是持续存在的,不同类型探空仪受太阳辐射影响的程度不同;而人为因素的影响尽管看起来是间断性的——某一历史时刻即完成换型或算法升级,但是它将通过自然因素的影响持续作用到整个探空温度时间序列——该间断点前后受太阳辐射影响程度显著变化。因此,本文首先对这两种因素及其影响进行介绍。

1.1 太阳辐射误差

所谓探空温度太阳辐射误差,是指传感器在高空气象探测时,通过吸收太阳辐射造成的温升将叠加在传感器所测真实大气温度上,太阳辐射使温度升高产生的测量误差。研究表明,若没有进行有效的辐射误差订正,白天与夜间的100 hPa高度处的两条探空温度时间序列将存在非常明显的差异^[8]。太阳辐射误差大小的决定因素主要是太阳高度角,而太阳高度角大小由太阳和地球上观测点的相对位置决定:观测地点的经纬度、观测时间、观测的海拔高度等等。此外,观测点不同温度传感器的响应性能、高空风速大小、云量多少等变化因素^[9],都将会对太阳辐射误差大小产生影响。

因此,太阳辐射对探空温度的影响是全方位的,这不仅表现在,对同一类型探空仪器而言,其垂直上升高度和观测站点分布引起的太阳辐射偏差大小差异,而且表现在,针对不同国家的不同类型探空仪,其温度传感器受太阳辐射影响程度亦显著不同。例如,下图1所示,欧洲中尺度数值预报中心(ECMWF)对2015—2016年期间分布于北半球20°—50°N的主要探空仪器类型进行对比统计分析,在不同标准等压面高度(hPa)的探空温度观测值与模式背景场之差(O-B)。可以非常明显地看出,不同类型的探空仪器表现出不

同的温度偏差,而且对于同一类型的探空仪器,其温度偏差的大小在不同的探空高度处亦显著不同。

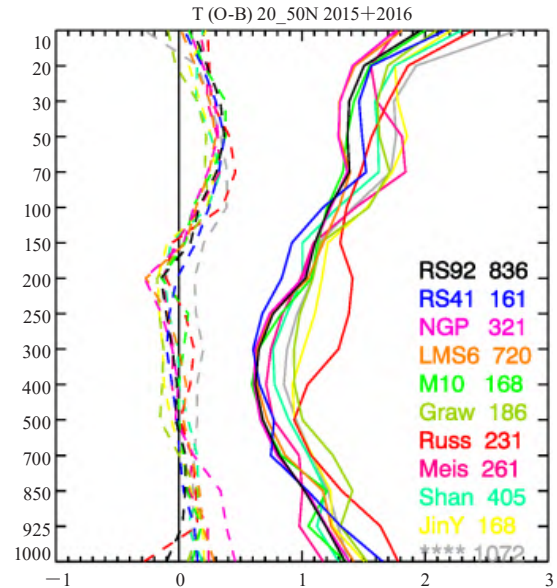


图1 2015—2016年期间,针对分布于北半球20°—50°N的主要探空仪器类型,ECMWF统计的不同标准等压面高度(hPa)的探空温度O-B,其中虚线代表平均值,实线代表方差。图中的彩色标注代表不同的仪器类型,其中数字代表统计的探空报数目(单位:百条)^[10]

Fig. 1 In 2015–2016, the sounding temperature O–B of different standard isobaric surface heights (hPa) calculated by ECMWF, for the main types of sounding instruments distributed in the Northern Hemisphere 20°–50°N. The dotted line represents the average value and the solid line represents the variance. The color mark in the figure represents different instrument types, and the number represents the number of statistical sounding reports (unit: 100)^[10]

1.2 观测系统改变

本文涉及观测系统改变,主要包括:一方面不同厂家生产的探空观测仪器温度传感器不断换型升级^[10],另一方面,即使是探空观测仪器的类型没有发生变化,其涉及的太阳辐射误差订正算法也会逐渐改进完善。当然,这种观测系统变化亦有一些其他表现,例如,由于探空台站迁移,由原来靠近城市迁至远离城市,亦会造成近地面的探空温度的观测偏差。但有研究表明,相对而言其影响幅度较前面两者显著偏小。

如下图2显示在1958—2009年期间^[11],位于英国的探空站点Camborne (Cornwal, UK)所使用4种不同的探空仪器类型随时间变化,及不同探空仪器在200 hPa (图2a)和700 hPa (图2b)处的月平均温度异常。其中,图2c表示这段时间内探空仪器换型情况,从左往右依次是:Phillips Mark IIb (1950—1970年);Phillips MK3 (20世纪70—90年代);

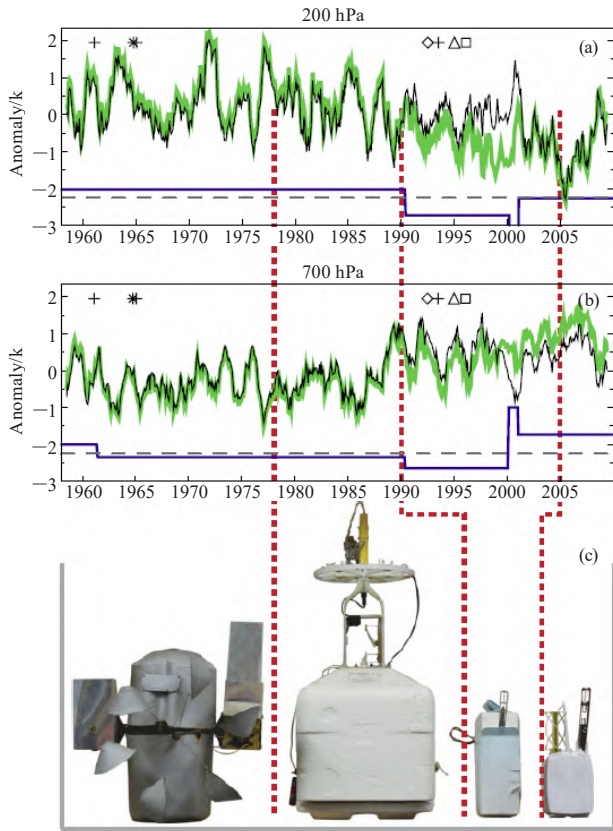


图2 1958—2009年，探空站点Camborn (Cornwall, UK) 所使用4种不同的探空仪器类型随时间变化，及其在200 hPa (a) 和700 hPa (b) 处的月平均温度异常，其中黑线代表原始数据，而绿线代表经Hadley Centre (HadAT) 订正后数据。(c) 这段时间内用到的探空仪器，从左往右依次是：Phillips Mark IIb (1950—1970年)；Phillips MK3 (20世纪70—90年代)；Vaisala RS-80 (20世纪90年代至2005—2006年)；Vaisala RS-92 (2005—2006年) (图中的十字代表辐射误差订正方法改变，星号代表数据截断位数改变，菱形代表气压传感器改变，三角代表测风仪器的改变，方框代表相对湿度传感器的改变)^[11]

Fig. 2 During 1958–2009, four different types of radiosonde instruments used in Camborn (Cornwall, UK) changed with time, and their monthly average temperature anomalies at 200 hPa (a) and 700 hPa (b), where the black line represents the original data, while the green line represents the data revised by Hadley centre (HadAT). (c) the sounding instruments used in this period, from left to right: Phillips mark IIB (1950–1970); Phillips MK3 (1970s–1990s); Vaisala RS–80 (1990s to 2005–2006); Vaisala RS–92 (2005–2006). In addition, the cross in the figure represents the change of radiation error correction method, the asterisk represents the change of data truncation digit, the diamond represents the change of air pressure sensor, the triangle represents the change of wind measuring instrument, and the box represents the change of relative humidity sensor^[11]

Vaisala RS-80 (20世纪90年代至2005—2006年)；Vaisala RS-92 (2005—2006年)。可以对比看出，原

始观测 (图中黑线) 与经Hadley Centre (HadAT) 订正后数据 (绿线) 在不同的时间段的差异非常明显。尤其是在Phillips MK3型号向Vaisala RS-80型号探空仪器换型的20世纪90年代以后，订正前后的数据显著不同。

2 国际探空温度偏差订正技术经验

国际上已有探空温度偏差订正工作主要分成两方面的内容：一是面向历史探空资料的温度偏差订正，其主要是针对气候变化分析，尤其是对流层上层及平流层温度趋势变化规律研究^[12-15]。例如，由于探空仪器改变或辐射误差订正方法改变等原因，造成探空温度长时间序列在上述改变 (断点) 前后的均值和方差存在明显的跳变 (资料不均一或不连续)，以中国探空为例，上述不均一现象在探空温度序列中的2000年后以及2010年前后两个时间点尤其明显。前一个时间点主要是由于观测系统统一升级，其中包括太阳辐射误差订正方法改变等一系列订正参数的调整，而后一个时间点则是由于59-701探空系统升级成为L波段探空系统。

二是面向实时探空观测的温度偏差订正^[16]，其主要是针对天气预报模式应用，在数值模式资料同化应用过程中，必须对太阳辐射引起的探空温度系统偏差进行有效订正。ECMWF在历代再分析数据产品制造过程中，都是在上述两个方向“面向历史资料再分析”和“面向实时业务系统”上，对彼此相对独立的两套探空温度偏差订正方案进行不断优化完善^[17-18]。因此，接下来将从上述两个方面对国际目前探空温度偏差技术经验进行总结阐述，具体可参见表1。

表1 国际主要气象数据产品中所应用到的探空温度偏差订正方案 (对历史和实时资料分别进行)

Table 1 Correction scheme of radiosonde temperature deviation applied in major international meteorological data products (respectively for historical and real-time data)

国际主要数据产品 (机构)	面向历史的偏差订正方案	面向实时的偏差订正方案
CFSR (NCEP)	RADCOR	RADCOR
ERA-40 (ECMWF)	SE或 (且) 依据OBS-FG订正	SE
JRA55 (JMA)	RAOBCORE	SE
MERRA (NASA)	RAOBCORE	SE
ERA-Interim (ECMWF)	RASE ^[17]	滚动循环订正
ERA5 (ECMWF)	RISE ^[14, 19]	滚动循环订正
CRA-40 (CMA)	RAOBCORE+RADCOR	RADCOR待改进

2.1 历史探空温度偏差订正方法

最初发展的订正方案主要是针对太阳辐射误差的订正，如美国原环境预报中心 (NCEP) 在其再分析

资料的制作过程中，采用了该方案^[20-21]。该方案首先对国际上不同的探空仪器类型进行分类^[18]，统计其在不同太阳高度角条件下的太阳辐射误差订正值，针对每一种类型的探空仪器，需要提前做好一个订正量的统计表。在实际应用时，通过其探空综合质量控制系统中（Radiosonde Complex Quality Control）采用太阳辐射误差订正模块（RADCOR）对订正量表进行读取，找到相匹配太阳高度角对应的偏差订正值，对实际探空廓线进行订正^[22]。在ECMWF的ERA-40再分析产品制作过程中^[8, 18, 23]，其探空温度太阳辐射误差订正在采用如上类似RADCOR订正模块（简称SE）的同时，也会综合考虑订正前后的温度数据与模式预报场的差异（OBS-FG）大小（依据OBS-FG订正的方法），例如，若经过太阳辐射误差订正模块后，OBS-FG变大则需要将该模块关闭。综上可以看出，较NCEP而言，EC所用的订正方案更为细致复杂，需要对比叠加订正效果，从而确定最终选取哪一种订正方案。

而ECMWF在后面几代再分析数据产品制作过程中，如ERA-Interim^[24]，使用了一种面向历史探空温度订正的新方案。维也纳大学的Haimberger等^[13]以ERA-40再分析资料为参考序列统计断点和订正值，研发了全球1184个探空站点的规定等压面温度偏差订正值数据集RAOBCORE。通过与卫星资料得到的大气温度变化趋势进行对比，证实利用订正后的探空温度所得结果与前者更吻合^[25]；目前国际上多套再分析资料，如美国的MERRA^[26]，日本的JRA-55^[27]，ECMWF的ERA-Interim^[17, 24]，均采用了RAOBCORE数据集的探空温度订正值，订正效果如下图3所示。

由图3可以明显看出，经过RAOBCORE或RASE（RAOBCORE叠加太阳辐射误差）订正后，得到全球探空高层的温度差值（12UTC—00UTC）的空间一致性更好，其订正效果显著。更进一步，Haimberger等^[14]结合临近站资料计算订正值，以便独立于参与同化的卫星资料，研发RICH数据集。RICH包括两个版本，分别为RICH-obs和RICH- τ ，RICH-obs和RICH- τ 均是基于RAOBCORE数据中的断点，并借助临近站资料作为参考研制而成。不同之处在于，前者直接以临近站观测资料作为参考序列进行目标站温度的订正；而后者则基于临近站与背景场偏差构建参考序列，对目标站和背景场偏差订正后返回目标站，该方法部分保留了背景场对订正值的影响，同时可以降低插值误差。ECMWF的第4代再分析产品ERA5^[19]，就是应用RICH数据集对历史探空温度进行订正。

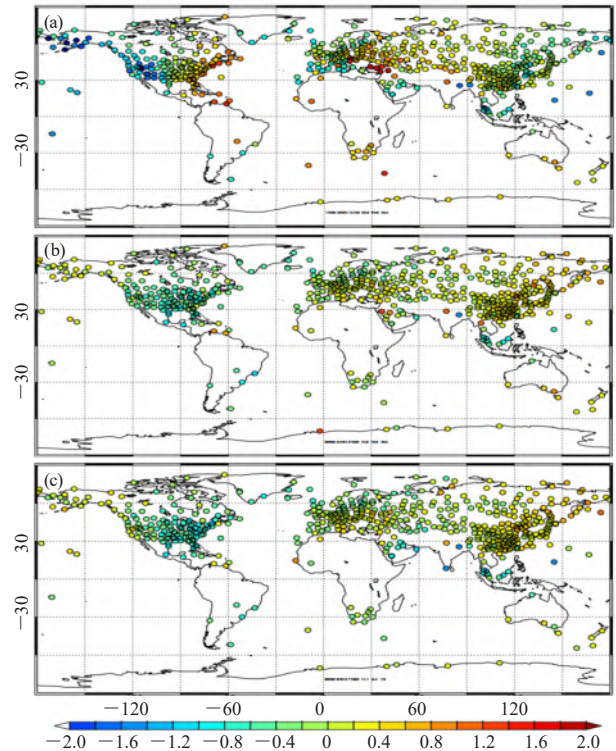


图3 1989年1月1日—1990年12月31日的50 hPa高度处，全球探空温度差值（12时—次日00时）的空间分布：（a）订正前，（b）应用RAOBCORE订正后，（c）应用RASE（RAOBCORE叠加太阳辐射误差）订正后^[17]

Fig. 3 The spatial distribution of the difference of global sounding temperature (12 UTC—00 UTC) at the altitude of 50 hpa from January 1, 1989 to December 31, 1990: (a) before the correction, (b) after the application of RAOBCORE correction, (c) after the application of RASE (RAOBCORE superimposed solar radiation error) ^[17]

2.2 实时探空温度订正方法

实时探空温度订正主要是针对太阳辐射误差，其订正量的计算统计方法主要分成两种，一种是延续传统的类似在2.1中介绍的RADCOR模块，在实时业务系统中进行应用时分类统计订正值，该订正值是探空仪器类型、观测时段、太阳高度角和位势高度等变量的函数，此处不赘述。

随着数值模式资料同化技术的不断发展，ECMWF在实时业务系统中发展了另一种更为先进的订正方法：所有的探空观测温度OBS都与相应的实时模式背景预报场FG（如6—12 h预报结果）进行比较，得到两者的差值OBS-FG。然后，为了得到订正值数值大小，分不同的探空仪器类型、不同的太阳高度角、不同的位势高度对上述（OBS-FG）进行统计，得到最近12个月的观测值减去模式的短期预报值的差值（OBS-FG）组建的数据库（订正量表）；在实时订正时，需要调取该表中相应的订正值对观测数

据进行修正。在实时业务系统中这个订正量表按月份统计，并不断逐月更新，或者根据实际需要间歇性更新^[21]（本报告中该方法简称，滚动循环订正）。在ECMWF的ERA-interim和ERA5数据产品中，均采用了该方案对实时探空温度偏差进行有效订正。

3 信息中心探空温度订正工作现状

近年来，国家气象信息中心依托国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”，自主研发了中国日定时探空规定等压面温度订正技术方案^[28]和基于历史规定等压面订正量的特性层温度订正技术^[29]，并成功应用于中国第一代全球大

气再分析产品（CRA-40）研制中^[30]，取得较好应用效果。

3.1 自主研发的中国历史规定等压面探空温度订正技术

国家气象信息中心陈哲等人用加拿大王晓兰的PMTred断点检验方法^[31]，结合较详细的元数据信息，采用QM方法计算订正量^[32]，对中国120个探空站的日定时探空规定等压面温度进行了详细的订正，形成“中国高空规定等压面日定时温度订正数据集”。其具体订正流程如下图4所示。

在上述流程中，首先进行参考序列的选取：以

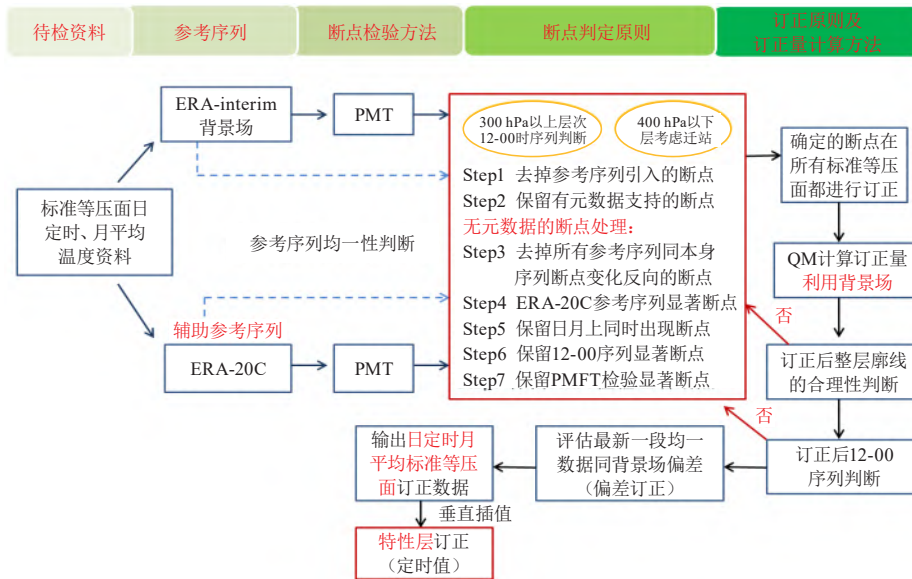


图4 国家气象信息中心（NMIC）自主研发的中国探空日定时探空温度订正流程图

Fig. 4 The flow chart of China's radiosonde daily temperature bias correction independently developed by the National Meteorological Information Center (NMIC)

ERA-Interim的12小时预报场资料作为参考序列。同时考虑采用ERA-20C资料作为辅助参考序列来帮助判断断点。其次，是断点检验方法：主要采用加拿大Wang等^[31]的PMTred断点检验方法作为日定时值断点检验的统计学方法^[31, 33]。同时在检验过程中借鉴Haimberger^[13]的做法，订正前后两个时次的差值序列（12—00 UTC）不应出现明显的资料不连续问题，因此增加昼夜差值序列的检验^[34]。第三，在断点的判定时，主要采用统计显著和断点元数据核查相结合的方式，当断点超过95%的显著性且有元数据支持时保留该断点。最后，订正量的计算：使用ERA-interim背景场资料计算订正量。主要采用QM方法^[32]计算订正量，使得订正量在4个季节上的差异与原始观测序列一致。并对订正后的（12—00 UTC）资料再进行均一性检查，对结果进行评估和进一步调整。

3.2 特性层温度订正

不管是前文提及的国外RAOBCORE和RICH数据集，还是中国日定时温度订正数据，都针对探空规定等压面层的温度长时间序列进行订正，而由于每次探空观测的特性层高度不固定，因此很难利用上述订正方法进行系统订正，其订正效果也很难通过传统的固定等压面温度变化趋势统计方法进行检验评估。而探空特性层作为描述探空气象要素垂直变化的显著拐点层，一次探空观测廓线上的特性层数目通常远远多于规定等压面层^[35]。在探空资料的研究应用中特性层一直发挥重要作用。因此，有必要基于已有订正量，发展面向特性层探空温度的偏差订正技术。图5给出了在面向中国第一代全球大气再分析（CRA-40）资料准备工作中探空温度偏差订正的技术流程。

在图5所示的订正流程中，借助探空温度订正

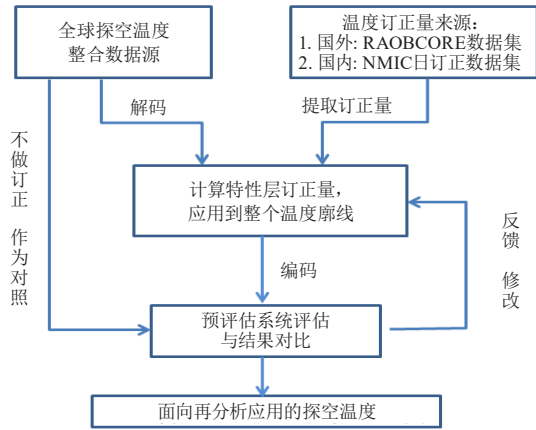


图5 基于已有规定层探空温度订正量的特性层温度偏差订正流程图

Fig. 5 Flow chart of significant layer temperature bias correction based on existing standard layer radiosonde temperature bias

“RAOBCORE-1.4数据集”和“中国高空规定等压面日定时温度订正数据集”的订正量，对解码后的探空温度整合数据进行订正。在这个过程中，需要将规定层的订正量插值计算到特性层^[18]，从而将订正量应用到整条温度廓线。经订正后的数据需要重新进行编码，并利用资料预评估系统对订正结果进行评估分析，以保证整个订正流程科学合理。

3.3 CRA-40 中的探空温度偏差订正效果

对于中国区域探空站点而言，基于上述NMIC自主研发方法的订正效果与国外水平相当、订正站点较RAOBCORE多、元数据信息更丰富等原因，国内订正采用NMIC自主研发的订正结果。而对于国外探空站点的订正，主要借鉴目前国际上已经发布的多个再分析数据集的做法——如MERRA、JRA55、ERA-Interim 均采用了RAOBCORE数据集的订正结果，最终订正效果如图6所示。

全球探空温度的偏差订正效果在温度偏差分布的空间一致性上能清楚表现出来。这种改善效果，在探空高层体现的尤其明显，如图6中，给出100~200 hPa厚度层探空温度相对于ERA-Interim再分析的Bias的空间分布。由图6a可以看出，与欧美气象发达国家比较，中国探空温度偏差较大，很多站点的探空温度偏差大小在1℃以上。图6b是应用RAOBCORE订正后的结果，订正效果尤其体现在俄罗斯、印度、中国等国家的一些探空站点，订正后这些区域内的探空温度偏差减小，与周边区域表现出更好的空间一致性。图6c是在中国应用NMIC自主研发订正量订正后的结果。对比图6b和6c，还可以明显看出，应用NMIC自主研发的日定时值订正量在中国区域订正效果的优势，

不但订正的探空站点数目增加，且很多站点的Bias由0.6℃降低到0.4℃，其空间一致性更好。

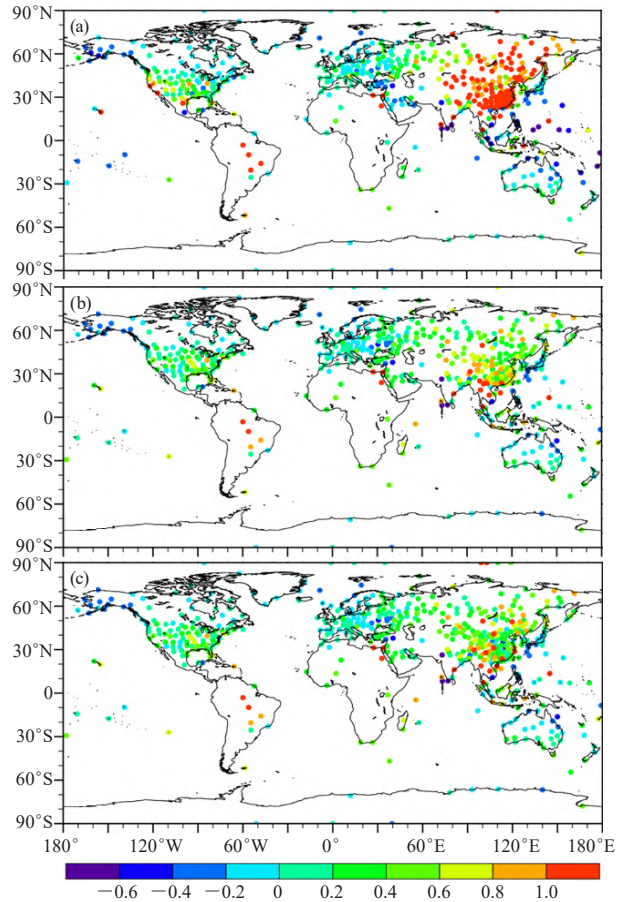


图6 1996年1月1日00时—1996年12月31日00时的全球探空温度订正效果的空间分布，100~200 hPa厚度层探空温度相对于ERA-Interim再分析的Bias的空间分布 (a) 订正前，(b) 全球探空均应用RAOBCORE订正后，(c) 国外探空温度利用RAOBCORE订正，且中国探空温度应用NMIC自主研发的日定时值订正量进行订正后

Fig. 6 The spatial distribution of the global radiosonde temperature correction effect from 00 UTC on January 1, 1996 to 00 UTC on December 31, 1996 of 100~200 hPa layer radiosonde temperature relative to the reanalyzed bias of ERA-Interim: (a) before the correction, (b) global radiosonde corrected by RAOBCORE, (c) the overseas radiosonde temperature is corrected by RAOBCORE, and the Chinese radiosonde temperature is independently corrected by NMIC

4 面临挑战与展望

综上所述，在探空温度偏差订正方法研究领域，国外气象业务单位尤其是ECMWF取得了持续发展进步。具体表现在，在面向历史探空温度订正环节，综合考虑了台站元数据信息，以数值模式预报场和探空临近站资料作为参考序列求取订正量；在实时探空温度偏差订正考虑了订正量的随时间滚动更新，使得订

正量计算结果更为合理。

相对而言,国内对探空温度的偏差订正工作起步较晚。在中国第一代全球大气再分析产品(CRA-40)研制过程中,国家气象信息中心充分吸收了国内外的研究成果,自主研发了中国日定时探空规定层温度订正技术,1979年以来的订正结果已应用于CRA-40研制。但对国外高空站点观测的历史探空温度偏差订正仍处于研究阶段,实时业务虽初步实现了针对不同探空仪器类型的统计偏差订正,但订正量尚未实现滚动更新,对数值天气预报的影响也有待深入评估。

总的来说,国内在探空温度偏差订正方面仍将面临较大的挑战。未来工作中,应结合我国业务科研工作的需要,研发适用于我国气象业务应用的探空温度偏差检测与订正方案,提高探空资料的应用水平。

1) 对历史探空温度偏差订正工作,应参照ECMWF的发展思路,对比卫星观测系统等的高空观测温度偏差,研究综合的全球探空温度偏差订正量计算方案,同时解决1979年以前中国探空日定时温度偏差订正技术中参考序列选取等一系列难题,以支撑我国下一代的全球大气再分析产品研制工作。

2) 在实时探空温度偏差订正技术研发方面,应结合实况业务需求,设计出实时探空温度偏差滚动循环订正模块,并结合同化系统发展,研究发展实时探空变分偏差订正技术。

3) 在观测系统升级过程中,开展平行观测试验和换型前后仪器观测数据的偏差评估、加强国内不同型号探空仪与国际探空仪的比对工作,为开展国内外不同型号探空仪之间的系统偏差分析提供科学参考。

参考文献

- [1] 杨旭,王慧瑜.辐射误差订正方法改变对中国探空资料温度序列的影响.气象与环境学报,2015(4):103-106.
- [2] 翟盘茂.中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题.气象学报,1997(5):563-572.
- [3] 郭艳君,丁一汇.近50年我国探空温度序列均一化及变化趋势.应用气象学报,2008,19(6):646-654.
- [4] 郭艳君,李庆祥,丁一汇.探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响.大气科学,2009,33(6):1309-1318.
- [5] 郭艳君.高空大气温度变化趋势不确定性的研究进展.地球科学进展,2008,23(1):24-30.
- [6] 陈哲,杨溯.1979—2012年中国探空温度资料中非均一性问题的检验与分析.气象学报,2014(4):794-804.
- [7] 陈哲,杨旭,刘靓珂,等.3种方法对中国探空温度资料均一性检验对比分析.气象与环境学报,2014(6):141-146.
- [8] Onogi K. The long-term performance of the radiosonde observing system to be used in ERA-40. ERA-40 Project Report Series, 2000.
- [9] Jensen M P, Holdridge D, Survo P, et al. Comparison of Vaisala radiosondes RS41 and RS92 at the ARM southern great plains site. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 8(11): 11323-11368.
- [10] Ingleby B. An assessment of different radiosonde types 2015/2016. ERA Report Series, 2017.
- [11] Thorne P W, Lanzante J, C. Peterson T, et al. Tropospheric temperature trends: history of an ongoing controversy. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 66-88.
- [12] Sherwood S C, Lanzante J R, Meyer C L. Radiosonde daytime biases and late-20th century warming. Science, 2005, 309(5740): 1556-1559.
- [13] Haimberger L. Homogenization of radiosonde temperature time series using innovation statistics. Journal of Climate, 2007, 20(7): 1377-1403.
- [14] Haimberger L, Tavalato C, Sperka S. Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations. Journal of Climate, 2012, 25(23): 8108-8131.
- [15] Seidel D J, Free M. Measurement requirements for climate monitoring of upper-air temperature derived from reanalysis data. Journal of Climate, 2005, 19(5): 854.
- [16] 陶士伟,陈晓红,龚建东. L波段探空仪温度资料误差分析.气象, 2006, 32(10): 46-51.
- [17] Haimberger L. Radiosonde temperature bias correction in ERA-Interim. ERA Report Series No. 8, 2011.
- [18] Andr e U, Sokka N, Onogi K. The radiosonde temperature bias corrections used in ERA-40. ERA-40 Project Report Series, 2004.
- [19] Hersbach H, Rosnay P D, Bell B, et al. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. Era Report, 2018. No.27.
- [20] Saha S, S. Moorthi H L, Pan X R, et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(8): 1015-1057.
- [21] Agust -Panareda A, Vasiljevic D, Beljaars A, et al. Radiosonde humidity bias correction over the West African region for the special AMMA reanalysis at ECMWF. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 135(640): 595-617.
- [22] Collins W G. The operational complex quality control of radiosonde heights and temperatures at the national centers for environmental prediction. Part I: description of the method. Berichte Des Ohara Instituts F r Landwirtschaftliche Forschungen, 2001, 40(2): 137-151.
- [23] Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. The ERA-40 reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(612): 2961-3012.
- [24] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [25] Haimberger L, Tavalato C, Sperka S. Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records: some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data. Journal of Climate, 2008, 21(18): 4587-4606.
- [26] Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. Journal of Climate, 2011, 24(14): 3624-3648.
- [27] Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2015, 93(1): 5-48.
- [28] 陈哲.中国高空规定等压面日定时温度订正数据集质量评估报告.国家气象信息中心,2018.
- [29] 李庆雷,陈哲,廖捷,等.探空特性层温度偏差订正及效果检验.专利申请实质审查,2019.
- [30] 廖捷,胡开喜,江慧,等.全球大气再分析常规气象观测资料的预处理与同化应用.气象科技进展,2018,8(1):133-142.
- [31] Wang X L, Wen Q H, Wu Y. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2007, 46(6): 916-931.
- [32] Wang X L, Chen H, Wu Y, et al. New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(12): 2416-2436.
- [33] Dai A, Wang J, Thorne P W, et al. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data. Journal of Climate, 2011, 24(4): 965-991.
- [34] 吴慧,翟盘茂,林建兴.基于昼夜温差序列非均一性的高空温度订正.气象与环境学报,2013,29(5):74-80.
- [35] 阮新,朱艳峰,鞠晓慧.融合特性层观测资料推算探空站海拔高度的方法.高原气象,2011,30(2):532-537.