

雷达 VAD 风廓线资料质量控制研究

朱晨¹ 远芳¹ 王蕙莹¹ 张志森¹ 祝婷²

(1 国家气象信息中心, 北京 100081; 2 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081)

摘要 多普勒天气雷达 VAD(Velocity Azimuth Display)风廓线资料可以提供高时间分辨率的高空风场信息。本文针对中国雷达 VAD 风廓线资料,设计发展了面向资料同化应用的 NMIC(国家气象信息中心)质量控制方案,该方案改进了 NCEP(国家环境预报中心)方案中存在的问题。利用 2020 年 2—8 月的 L 波段秒级探空风场资料,分别对比质量控制前、经过 NCEP 质量控制方案、以及经过 NMIC 质量控制方案的 VAD 风廓线资料,统计分析结果表明经过 NMIC 质量控制方案的 VAD 风廓线资料最接近观测,准确度最高,并且在各个高度上其偏差和均方根误差最小,充分说明了 NMIC 质量控制方案的有效性。相对背景场偏差分析表明,经过 NMIC 质量控制方案的 VAD 资料偏差和均方根误差最小,与背景场的偏差更接近高斯分布,更能满足资料同化的要求。本文的研究有助于推进 VAD 风廓线资料在数值预报科研和业务中的应用。

关键词 多普勒雷达;VAD 风廓线;质量控制;探空;统计分析

中图分类号: P413.2 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20210332 **文献标识码:** A

引言

多普勒天气雷达能够探测到散射体的径向速度,由于其时间分辨率很高,对风场的研究极有价值^[1]。如何从单部多普勒雷达速度资料中提取风矢量场信息,前人已经提出了多种方法^[2-4],其中 VAD(Velocity Azimuth Display)方法可以从一个距离圈上的多普勒速度随方位角的分布特征中提取风场的大尺度信息,应用此方法得到的风场资料通常称为 VAD 风^[5]。VAD 风表示的是指定高度上的风向风速,而 VAD 风廓线数据是在 VAD 产品的基础上得到的不同高度上的平均风向风速。VAD 风廓线作为多普勒雷达径向速度的反演资料,反映了雷达站上空水平平均风场的垂直分布状态,具有很高的时间频次(6 min)和垂直分辨率(约 300 m)^[1]。由于多普勒雷达测速依赖于有回波处降水粒子的径向运动,当降水回波在雷达站周围分布比较均匀时,VAD 方法效果很好,但当降水回波在雷达站周围分布不均匀(如集中分布于某一方位)时,该方法的反

演效果不好,甚至无法反演^[6]。

尽管 VAD 方法存在一定的问题,但是有研究表明,在数值模式中有效同化应用 VAD 风可以弥补风场的垂直廓线,尤其是对流层风场资料不足的状况,从而改善预报结果^[5]。美国 NCEP(国家环境预报中心)、英国气象局等已经实现了该资料的业务同化应用^[7]。李华宏等利用 GRAPES-Meso(区域数值预报业务系统)的三维变分同化系统对 VAD 风廓线数据进行同化,改善了风场的初始场并且提高了 6 h 降水预报准确率^[8];李华宏等还利用 WRF(天气研究与预报模式)及其变分同化系统对 VAD 风廓线资料进行同化试验,对区域模式累计降水预报有一定改进作用^[9]。张红华等运用四维同化方法将风场资料应用到 WRF 模式研究发现,加入风场资料以后,模式对风速的预报效果有明显提高,对风向的预报也有一定程度的改进^[10]。但是,数据同化对观测资料的质量有较高的要求,如果观测资料不能满足均质、无偏随机误差高斯分布等要求,将会对同化结果造成明显的负面影响^[11]。例如,美国

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家气象信息中心青年基金项目课题(NMICQJ9-202103)、国家气象科技创新工程攻关任务“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”(CMAGGTD003-5)资助

作者简介:朱晨,男,1985 年生,硕士,高级工程师,研究方向资料质量控制与基础资料产品研制,Email:zhuchen@cma.gov.cn

收稿日期:2021 年 7 月 21 日;定稿日期:2022 年 2 月 25 日

NCEP 从 1995 年开始处理 VAD 风廓线资料,并应用到同化系统中,然而由于资料质量问题,1999 年 1 月在所有业务模式中停止应用,同时分析同化效果不佳的原因并研发质量控制技术,待解决质量问题后再次投入业务应用^[12]。

目前,我国正在业务运行的多普勒天气雷达有 224 部,这些雷达来源于不同生产厂家且型号多样。VAD 风廓线资料作为雷达径向速度的反演资料,误差来源复杂^[5]。在我国新一代天气雷达软件中应用的质量控制算法主要是依据反演有效数据点数,拟合均方根误差及对称性^[13]。邵爱梅等根据有效数据点数、数据空缺的最大间隔、相对离差、高波项能量分量 4 个判据来判别 VAD 风的可靠性,并综合四个判据的质量控制标准,进而得出判断 VAD 风适用性的两种判断策略^[14]。面向同化应用的 VAD 资料质量控制算法主要有美国 NCEP 的 VAD 综合质量控制技术(以下简称 CQCVAD)^[15]以及国家气象中心朱立娟的逐步拟合质量控制方案^[16]。其中 CQCVAD 面向的是 VAD 风廓线的产品,逐步拟合质量控制方案是逐步筛选出用以反演 VAD 的径向速度数据,从而提取出数据中的简谐波特征。

我国学者利用探空资料与 VAD 风廓线数据进行对比分析,用统计学的方法检验 VAD 反演风场相对于探空风的偏差,发现二者之间具有较好的相关性,变化的趋势基本一致,从一定程度上说明了 VAD 反演风场资料的可用性^[17-25]。这些研究中,大部分是针对单一或者部分雷达站的资料进行对比评估,型号主要是 S 波段雷达,区域集中在中东部地区;缺乏全国性的,不同型号雷达的评估;大部分评估的参考对象使用的是传统的垂直层数较少的探空报文资料,相对于垂直分辨率达到 300 m 的雷达风场资料,其精度低于高垂直分辨率的秒级探空数据^[26];此外,作为评估对象的 VAD 风廓线资料,采用的质量控制算法较为简单,尤其缺乏面向同化应用的质量控制效果评估。

2019 年,NMIC(国家气象信息中心)开始进行区域实况业务的研究,该研究内容包括了同化 VAD 风廓线资料。在研发过程中,NMIC 参考了美国 NCEP 的 CQCVAD 技术对观测资料做同化前的预处理,但是中国的 VAD 风廓线资料经过该方案的质量控制以后没有达到预期的同化效果。为了分析原因,提出解决办法,真正实现中国 VAD 风廓线资

料在区域实况业务中的同化应用,本文首先解析 CQCVAD 综合质量控制算法,分析算法存在的问题,然后针对 NMIC 实况业务需求,设计新的质量控制流程,最后利用 L 波段探空秒级风资料(以下简称探空资料)^[27],对我国多普勒天气雷达 VAD 风廓线资料进行质量分析,评估质量控制流程改进前后的效果。

1 质量控制方案介绍

1.1 NCEP 质量控制方案

CQCVAD 质量控制方案包括增量计算、高度-时间余差计算和决策算法^[12],检查过程如下。在质量控制之前需将雷达反演的风向风速统一计算为 U 分量和 V 分量, U 分量用 u 表示, V 分量用 v 表示。

首先,借助背景场信息,进行增量计算,得到所有待检样本与背景场之间的差异:

$$I_{\text{NCR}} = o - Hf \quad (1)$$

其中 I_{NCR} 表示增量, o 表示观测值, f 表示背景场, H 是内插函数。 u 分量与背景场的差异用 U_{INCR} 表示, v 分量与背景场的差异用 V_{INCR} 表示, U_{INCR} 与 V_{INCR} 中的最大值用 $\max(U_{\text{INCR}}, V_{\text{INCR}})$ 表示。

接着进行高度-时间余差计算。高度-时间余差计算利用当前时间窗内各高度上作为参考点的观测值与待检样本时空距离最近的 9 个点计算得到待检测点的余差。需要说明的是,如果待检测数据附近没有足够的参考点,不能计算得到余差,则该部分待检数据不参与后续决策算法的判断。时空距离 d 的定义是:

$$d_{ij} = (t_i - t_j)^2 + r^2(z_i - z_j)^2 \quad (2)$$

其中, i 表示待检测数据的位置, j 表示作为参考点的观测数据位置, t 表示时间, z 表示高度, r 是常数,取 1.5。

数据 i 和 j 的协方差 c 表示为:

$$c_{ij} = a + b \left(1 + \frac{d_{ij}}{l} \right) \exp \left(-\frac{d_{ij}}{l} \right) \quad (3)$$

其中, a , b 和 l 都是常数,分别为 0.25, 0.67 和 2.3。

通过增量、距离和协方差计算得到待检测点 u 分量和 v 分量的余差 R_{GU} 和 R_{GV} ,其赋值过程为:

$$R_{\text{GU}} = R_{\text{GU}} - cU_{\text{INCR}} \quad (4)$$

$$R_{\text{GV}} = R_{\text{GV}} - cV_{\text{INCR}} \quad (5)$$

其中, R_{GU} 和 R_{GV} 的初始值设为 U_{INCR} 和 V_{INCR} ;

第 3 步计算得到待检点标准化正态变量 V_{ECZT}

和 V_{ECIN} :

$$V_{\text{ECZT}} = \sqrt{\left(\frac{R_{\text{GU}}}{1.4}\right)^2 + \left(\frac{R_{\text{GV}}}{1.4}\right)^2} \quad (6)$$

$$V_{\text{ECIN}} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{INCR}} - X_{\text{MU}}}{S_{\text{DU}}}\right)^2 + \left(\frac{V_{\text{INCR}} - X_{\text{MV}}}{S_{\text{DV}}}\right)^2} \quad (7)$$

其中 X_{MU} 和 X_{MV} 分别表示这 9 个点 u 分量和 v 分量的均值, S_{DU} 和 S_{DV} 分别表示这 9 个点 u 分量和 v 分量的标准差;

最后计算待检测点系数 W_{P} :

$$W_{\text{P}} = \frac{W_{\text{PVECZT}} + W_{\text{PVEGIN}}}{2} \quad (8)$$

如果 $V_{\text{ECZT}} \geq 5$, $W_{\text{INT}} = 0$; 如果 $V_{\text{ECZT}} < 5$, W_{INT} 从查找表中获取对应的经验值。

$$W_{\text{PVECZT}} = \frac{0.93W_{\text{INT}}}{(0.93W_{\text{INT}}) + 0.0035} \quad (9)$$

同样的公式可计算得到 W_{PVEGIN} 。

决策判断算法的流程图见图 1。决策算法针对同时满足增量和高度-时间余差计算的观测资料。首先进行小风速的阈值判断: 如果 $u^2 + v^2 < 1 \text{ m/s}$, 则判断数据错误, 不参与后续检查; 否则待检数据进入检测系数判断, 根据待检点的系数 W_{P} , 以及比待检点低一个高度的数据点的系数 W_{PL} 进行阈值判断, 如果 W_{P} 大于 0.3 且 W_{P} 和 W_{PL} 的最大值大于 0.55, 则判断数据正确, 参与后续检查, 若不满足上

述条件则不参与后续检查; 最后判断背景场差异 $\max(U_{\text{INCR}}, V_{\text{INCR}})$ 的阈值是否小于等于 12 m/s, 满足条件判为正确, 不满足判为错误。

本文分析认为 NCEP CQCVAD 质量控制方案存在以下几方面的问题。首先, 和背景场差异超出阈值的错误数据参与了高度-时间余差的计算。增量计算得到了所有待检样本与背景场之间的差异, 在决策算法中, 差异超过 12 m/s 的 VAD 资料被认为是错误的, 所以通过增量计算, 我们已经能够甄别出一定量的错误数据, 但是无论待检数据与背景场的差异是否超过阈值, 所有能够找到临近参考点的待检数据都参与了高度-时间余差计算, 也就将可能的误差带到后续的检查步骤中。其次, 高度-时间余差计算必须能够找到当前时间窗内各高度上与待检样本时空距离最近的 9 个点, 但是作为反演风场资料, 有时反演的水平风数据较为稀疏, 并不能够满足这样的条件, 导致这种情况的可能原因包括以下几方面^[5]: ①雷达径向速度基数据的质量, 主要问题是距离折叠和噪声点。②实际用于 VAD 反演的距离圈上资料覆盖率代表性, 主要体现在资料样本数量和覆盖率。③径向风序列实际资料与 VAD 算法假设条件之间的矛盾, 如实际风场不完全满足线性变化的假设条件。最后, 也是很重要的一点, 决策算法只针对参与时间-余差计算的待检样本进行判断。在 VAD 风场数据稀疏条件下, 不满足时间-余差计算条件的待检数据, 没有经过决策算法的判断就被输出出来, 算法对这部分资料的质量状况无法进行有效甄别。

1.2 NMIC 质量控制方案

为解决 NCEP CQCVAD 质量控制方案中存在的问题, 本文设计发展了 NMIC 质量控制方案, 其流程如图 2 所示。其中虚框表示的是 NCEP 的 CQCVAD 算法检查步骤。

方案首先对输入待检数据进行增量计算, 得到所有待检数据与背景场之间的差异。本文使用的背景场是国家气象信息中心自主研发的逐小时中国区域大气实况分析系统的分析场资料。增量计算后进入背景场差异检查, 这一步的阈值参考了 CQCVAD 中决策算法设定的参数^[15], $\max(U_{\text{INCR}}, V_{\text{INCR}})$ 大于 12 m/s 的数据视为未通过背景场差异检查, 质控码标为错误, 通过了背景场差异检查的数据进入高度-时间余差计算。

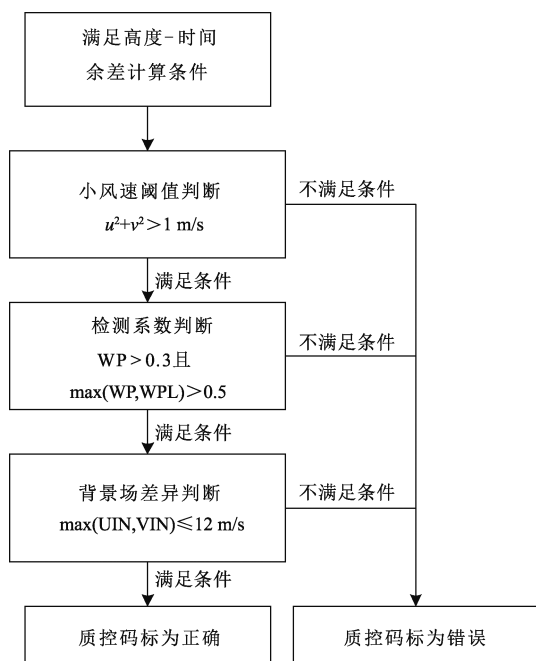


图 1 NCEP 的质量控制方案决策判断流程图

通过了上一步的背景场差异检查,并能够满足余差计算条件的数据,将参与决策算法判断,未通过决策算法判断的数据质控码标为错误,通过的数据质控码标为正确。

针对找不到满足条件的临近参考点,无法参与高度-时间余差计算的待检数据,本文设计了小风速检查的步骤,这一步的阈值参考了 CQC-VAD 中决策算法设定的参数^[15], $u^2 + v^2$ 小于 1 m/s 的数据视为未通过小风速检查,质控码标为错误,通过了该步骤检查的数据质控码判为正确并输出。经过所有质量控制步骤之后,输出最终结果。本文针对检查过程中每一步判断条件都设计了相应的过程码,便于后续对质量控制结果的分析,最终输出的质量控制结果参考 NCEP 的相关规定进行赋值^[28]。

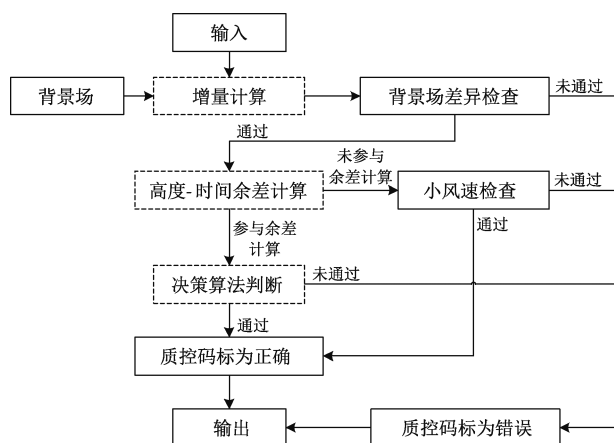


图2 NMIC 研制的质量控制方案流程

2 质量控制的效果分析

2.1 与秒级探空资料对比分析

本文的研究对象是中国区域多普勒天气雷达 VAD 风廓线资料,评估所使用的参考数据是 2020 年 2—8 月北京时 08:00、14:00、20:00、02:00 的探空资料,统计计算的指标包括平均偏差、均方根误差、相关系数等。

研究资料选取的标准包括时间匹配、空间匹配和高度匹配 3 项。以北京时 08:00 的放球为例,放球时间为 07:15,探空气球规定的升空速度为每分钟 400 m。雷达完成一个体扫约需 6 min,这意味着我们所得到的某一个时间的雷达风廓线序列,实际上是 6 min 内从低仰角到高仰角雷达根据 VAD 算法求出的平均风,而并非发生在同一时刻。到

07:30,在雷达完成这次体扫的 6 min 时间里,探空气球所在的高度约为 3.42~5.7 km^[29]。考虑到雷达反演风场的数据质量和代表性,时间匹配选取所有最接近 07:30 的单列自低空到高层的风廓线作为研究对象。空间匹配的标准为雷达站和探空站之间的空间距离小于 30 km^[20],海拔高度差异小于 100 m。全国共有 47 个天气雷达站满足条件。由于秒级探空资料的垂直分辨率很高,高度匹配按照最邻近的原则,将 VAD 风廓线资料与探空资料进行匹配。雷达站和探空站的分布如图 3 所示。

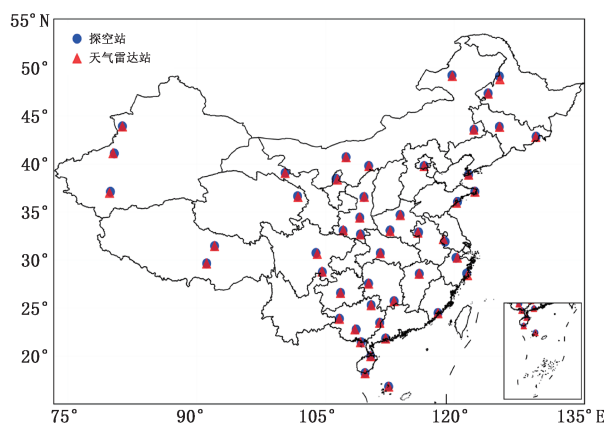


图3 中国区域天气雷达站及临近探空站空间分布

图 4 给出了在质量控制以前,经过 NCEP 方案质量控制以后,以及 NMIC 方案质量控制以后,所有匹配样本、所有高度上的 VAD 风廓线资料与探空资料的 U 分量和 V 分量对比的散点图。

(1) U 分量。在质量控制前,平均偏差为 -2.14 m/s,均方根误差为 6.56 m/s,相关系数 0.72;从图中可以看到 VAD 风廓线资料在零值附近有相当数量的数据点,这些量级非常小的风当中包含了一定量的错误数据,并且这些错误的风资料可能出现在任意高度^[12]。因此,参考 NCEP 的判断方法,本文方案中所有风速小于 1 m/s 的资料都被判为错误。此外还有一些异常数据,不能从图上直接识别,可以借助背景场信息以及同一站点相邻高度、相邻时间的参考点资料加以判断。经过 NCEP CQC-VAD 质量控制以后,平均偏差降低为 -1.39 m/s,均方根误差降低为 4.77 m/s,相关系数提高到 0.83;但是从图中能够明显看出,小风速数据并没有被完全剔除,原因在于,在待检数据较为稀疏情况下,有一部分数据不能够满足高度-时间余差计算条件,也就不能参与决策算法判断。本文的质量控制方案

弥补了这个不足,在对全部的待检数据进行质量控制以后, U 分量的平均偏差降低到 -0.98 m/s ,均方根误差降低到 3.38 m/s ,相关系数提升到 0.91 。

(2) V 分量。从统计值上看, V 分量与探空的差异相对 U 分量较小。在质量控制前, V 分量的平均偏差为 0.3 m/s ,均方根误差在 4.25 m/s ,相关系数 0.72 ;经过 NCEP CQCVAD 质量控制以后, V 分量的平均偏差为 0.29 m/s ,均方根误差为 3.78 m/s ,相关系数为 0.78 ;经过本文的质量控制以后, V 分量的平均偏差降低为 0.22 m/s ,均方根误差降低为 3.41 m/s ,相关系数达到了 0.81 。有研究发现面向

资料同化的风廓线雷达风场资料 V 风质量优于 U 风,且整体而言风廓线雷达探测的 V 风与模式背景场的偏差要明显小于 U 风^[30]。尽管是不同雷达探测的风场资料,但是也从一定侧面支持了本文的研究结论。

从图 4 中看出,经过本文质量控制, U 分量和 V 分量都呈现近纺锤形分布,主流的资料点分布在对角线上。从平均偏差、均方根误差和相关系数 3 方面统计结果都说明,经过本文质量控制以后的 VAD 风廓线资料与探空资料有更好的一致性。

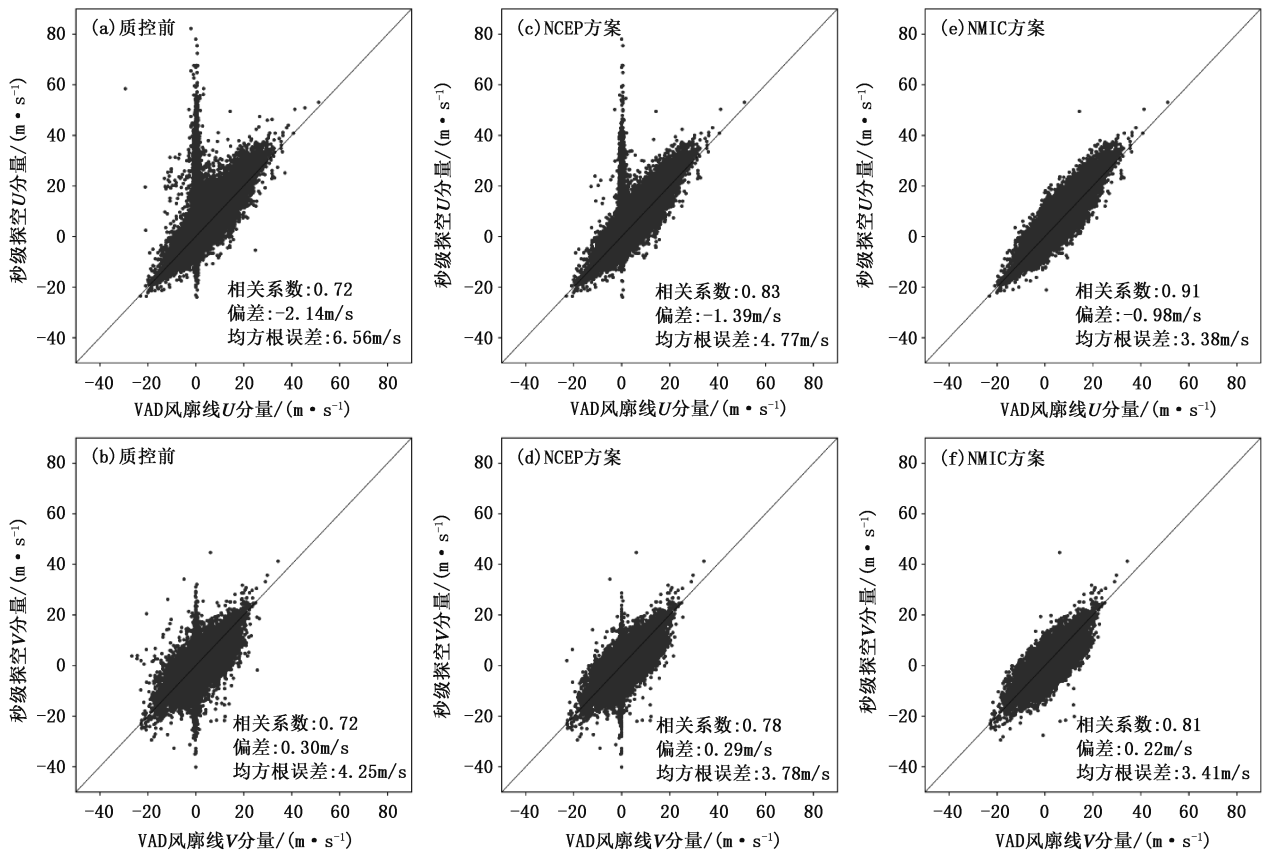


图 4 2020 年 2—8 月全部检验样本中 VAD 风廓线资料与探空风资料对比结果:

(a)质量控制以前 U 分量,(b)质量控制以前 V 分量,(c)经过 NCEP 方案质量控制的 U 分量,(d)经过 NCEP 方案质量控制的 V 分量,(e)经过 NMIC 方案质量控制的 U 分量,(f)经过 NMIC 方案质量控制的 V 分量

本文结合质量控制过程,对判断为错误的数据按照错误类型进行分析。质量控制前匹配的记录有 53430 条,经过本文的质量控制检查,标记为错误的的数据有 7014 条,占待检数据量的 13.13% 。其中 NCEP 的 CQCVAD 方案判为错误的的数据有 5195 条,分别为没有通过小风速检查的数据 3563 条,没

有通过系数检查判断的数据 645 条,没有通过背景场差异检查的数据 987 条。经过本文改进的质量控制检查方案,没有通过背景场差异检查的数据有 1097 条;没有通过小风速检查的数据有 722 条。

从上述质量控制的结果看, 60% 左右的数据是因为不满足小风速的阈值判定被剔除;此外,没有通

过背景场差异检查的比例占错误数据的大约 30%; 决策算法判断中未通过检测系数判断的比例占错误数据大约 10%。整体来看,本文的质量控制流程对 U 、 V 分量都起到了很好的效果,有效的弥补了 NCEP 方案的不足,经过本文质量控制以后的数据,与探空数据有较好的一致性,资料的质量得到了明显提升。

2.2 误差垂直分布情况

为了分析 VAD 风数据在不同高度的质量控制效果,图 5 给出了 VAD 风与探空资料在质量控制前后随高度的对比结果。从图中可以看出, U 分量和 V 分量,在不同高度上,经过 NMIC 方案质量控制以后,相比于质量控制以前以及经过 NCEP 方案

的质量控制都更接近于探空资料。 U 分量在 700 hPa 以上,改进非常明显;质量控制以后各高度的偏差基本一致,平均偏差在 -3 m/s 以内,均方根误差在 4 m/s 以下,相关系数大于 0.8,绝大部分高度相关系数都超过了 0.9。 V 分量经过质量控制,在各个高度上都有一定的效果,其中平均偏差在 0.5~1.5 m/s 之间,均方根误差在 4 m/s 以下,相关系数在 0.8 左右。VAD 风廓线资料作为雷达径向风的反演资料,在对流层低层的有效数据点更多,反演效果较好;经过本文的质量控制以后,将对流层中高层的错误数据有效地剔除,因此经过本文质量控制以后的数据与在各个高度都与探空资料更为接近。说明在不同高度上,针对中国的 VAD 风廓线资料,本

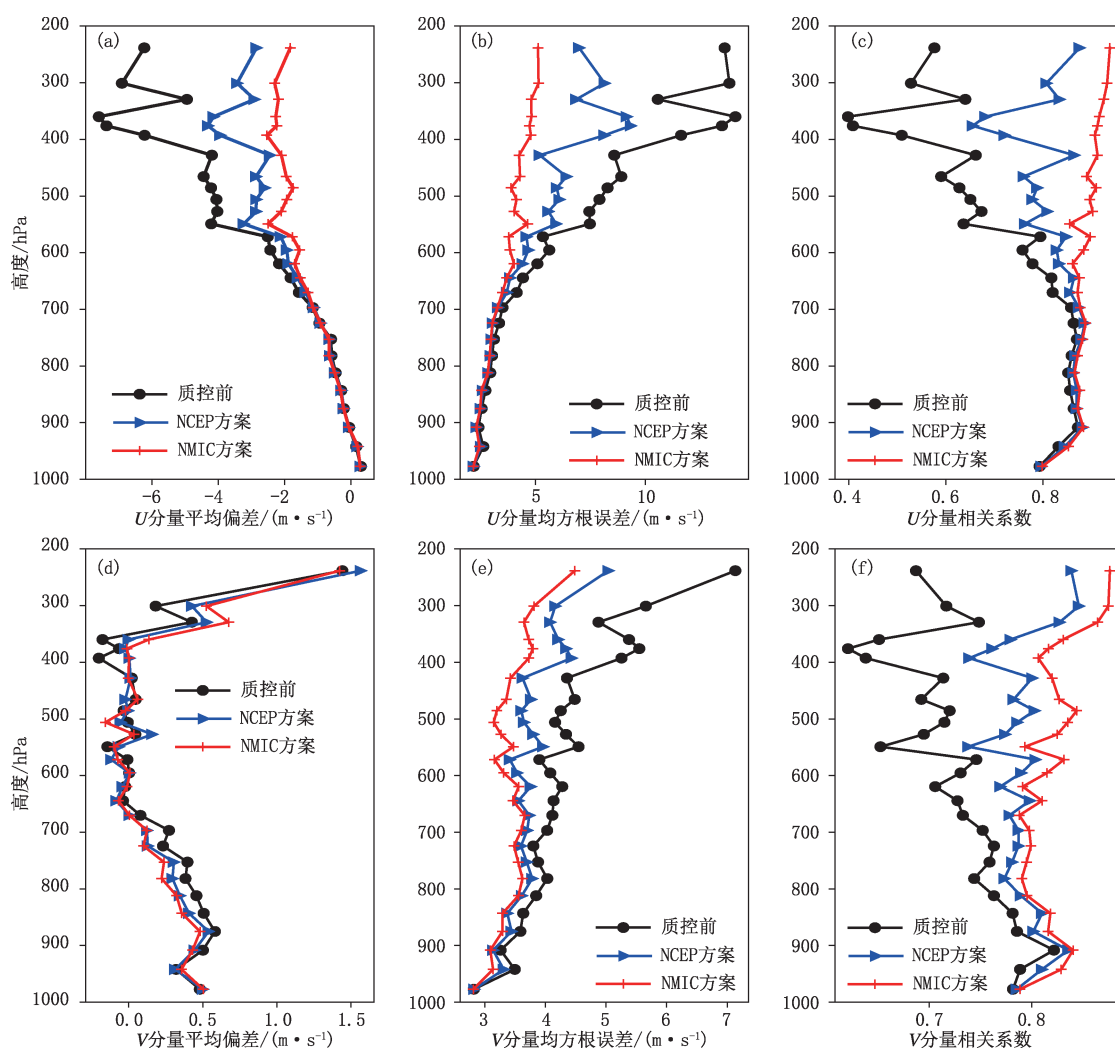


图 5 2020 年 2—8 月全部检验样本中 VAD 风廓线资料与探空风资料误差随高度变化情况:
(a) U 分量的平均偏差, (b) U 分量的均方根误差, (c) U 分量的相关系数, (d) V 分量的平均偏差,
(e) V 分量的均方根误差, (f) V 分量的相关系数

文的质量控制方案较 NCEP 的方案更为合理和有效。

2.3 相对背景场的偏差分析

设计的质量控制方案能否满足资料同化的需求,需要经过相对数值预报背景场偏差的分析检验^[31]。本文使用的背景场是国家气象信息中心自主研发的逐小时中国区域大气实况分析系统的分析场资料,雷达资料为上述 47 部雷达 VAD 资料,时间范围 2020 年 2—8 月。分别统计质量控制以前, NCEP 方案和 NMIC 方案质量控制以后, VAD 资料相对背景场的平均偏差、均方根误差和相关系数,结果如表 1 所示。

表 1 2020 年 2—8 月全部检验样本 VAD 风廓线资料与背景场资料误差统计

试验方案	偏差		均方根误差		相关系数	
	(m · s ⁻¹)		(m · s ⁻¹)			
	U 分量	V 分量	U 分量	V 分量	U 分量	V 分量
质控前	-2.03	0.26	6.42	4.12	0.71	0.72
NCEP 方案	-1.29	0.26	4.63	3.66	0.83	0.77
NMIC 方案	-0.89	0.2	3.23	3.29	0.91	0.81

由表 1 可见,在质量控制前, VAD 风相对背景场存在较大的偏差,其中 U 分量超过了 2 m/s,经过 NCEP 方案质量控制以后,偏差有所降低,经过 NMIC 方案质量控制以后,偏差进一步降低;根据资料同化的基础理论,观测资料相对背景场应当呈现无偏分布,因此相对背景场偏差的减小,更满足于资料同化中对观测资料的要求。同时, U 分量和 V 分量的均方根误差也分别减小,说明资料相对背景场的发散度减小,即资料质量有所提高^[5]。

为了分析 VAD 风与背景场偏差分布情况,图 6 给出了 U 分量和 V 分量相对于背景场偏差的概率分布。从图中可以看出,经过 NMIC 方案的质量控制,观测相对背景场偏差的概率分布更接近正态分布,适应同化无偏的要求。

3 同化效果的初步讨论

目前,国家气象信息中心在区域实况业务同化系统中,已经实现 VAD 资料的同化。本文应用了 2020 年 6 月 20—30 日的 VAD 风廓线资料,初步开展了同化试验并分析误差特征,为后续业务应用提供参考。

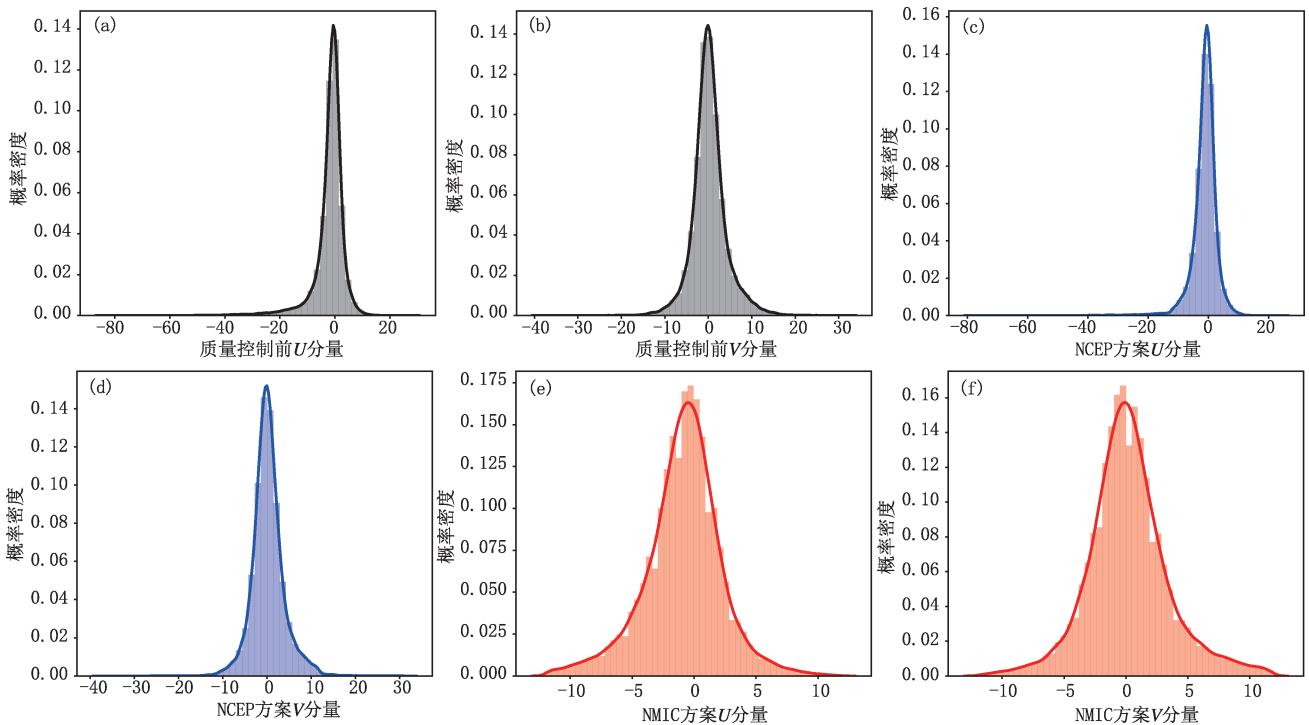


图 6 2020 年 2—8 月全部检验样本 VAD 风廓线资料与背景场资料偏差的概率分布:

(a)质量控制以前 U 分量,(b)质量控制以前 V 分量,(c)经过 NCEP 方案质量控制的 U 分量,(d)经过 NCEP 方案质量控制的 V 分量,(e)经过 NMIC 方案质量控制的 U 分量,(f)经过 NMIC 方案质量控制的 V 分量

图7给出了区域实况系统采用的 WRFDA(天气研究与预报模式同化系统)同化 VAD 风廓线资料以后,中国区域各个高度上观测减背景场(OMB)的平均偏差与均方根误差。从图中可以看出,在 300 hPa 以下,温度、U 分量和 V 分量在不同高度上,经过 NMIC 方案质量控制以后,相比于 NCEP

方案的质量控制,OMB 平均偏差和均方根误差有所减小,说明 NMIC 的质量控制方法对同化背景场有一定的改进。本文只是针对该个例对 NMIC 方案的同化效果进行了较为初步的讨论,将这一方法用到实际业务中效果究竟如何还需要进行大批量的试验和分析。

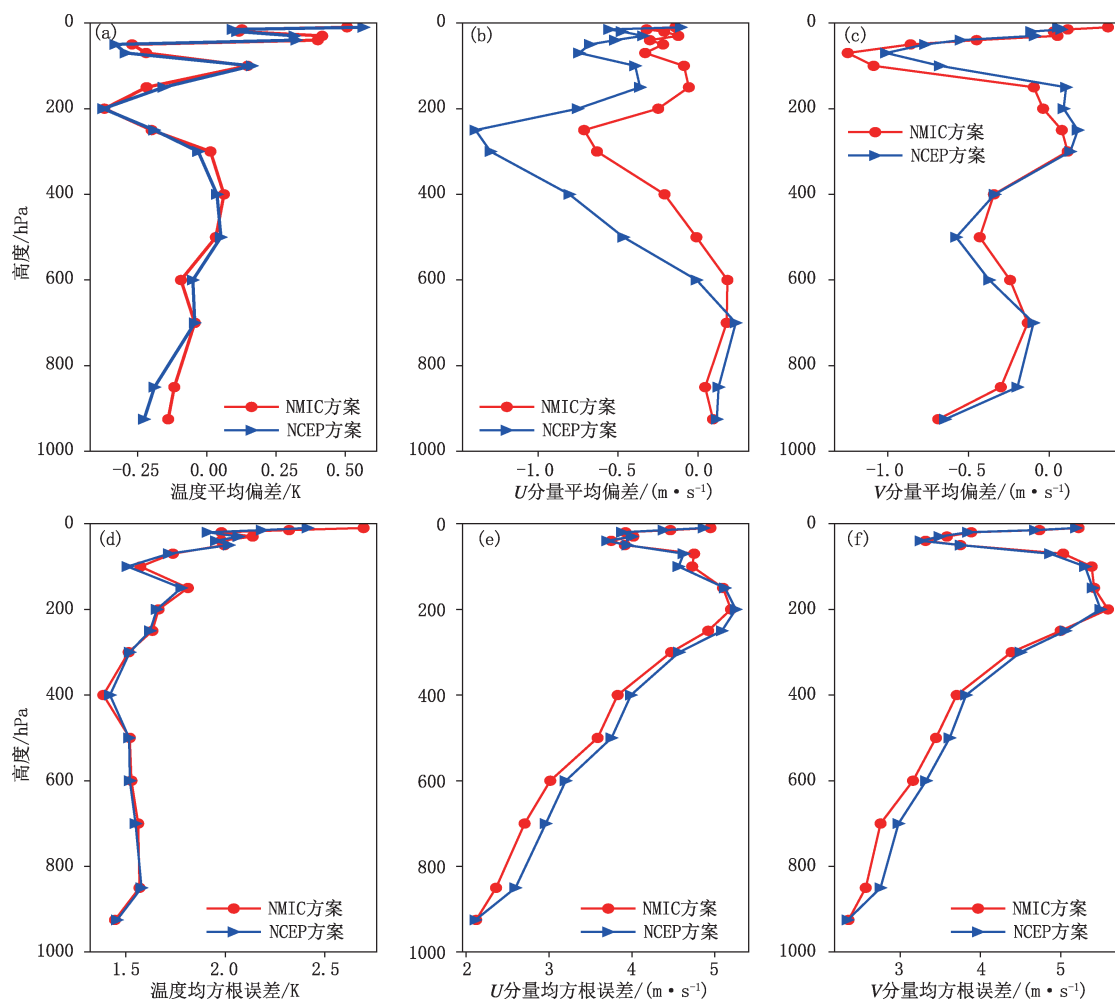


图7 2020年6月20—30日中国区域观测减背景场的平均偏差和均方根误差随高度变化情况:

(a)温度平均偏差,(b)U分量平均偏差,(c)V分量平均偏差,(d)温度均方根误差,(e)U分量均方根误差,(f)V分量均方根误差

4 结论与讨论

根据国家气象信息中心实况业务需求,本文从美国 NCEP 的 VAD 综合质量控制方案中发现的问题出发,分析该方案对中国的 VAD 风廓线资料质量控制效果不佳的原因,对算法流程加以改进,设计了一套 NMIC 的 VAD 风廓线资料质量控制方案。利用 2020 年 2—8 月全国 47 个多普勒天气雷达站

的 VAD 风廓线资料与 L 波段探空秒级风资料,对比分析了在质量控制以前、经过 NCEP 的质量控制、以及经过本文的质量控制之后的平均偏差、均方根误差和相关系数。得到结论如下:

(1)NCEP 的质量控制方案存在一定问题,主要是未参与时间-余差计算的待检样本,没有经过决策算法的判断,没有对质控码做任何的标注就输出,对这部分资料的质量无法进行甄别,影响了最终的数

据质量。

(2) 本文发展的 NMIC 质量控制方案,有效解决了 NCEP 方案中的问题。在 NMIC 方案中所有待检资料都得到了检查;与背景场差异超过阈值的错误数据,不再参与高度-时间余差计算;NCEP 算法没有判断的与背景场差异较大的错误数据和小风速错误数据均被剔除。

(3) VAD 风廓线资料经过 NMIC 质量控制以后,与探空资料相比, U 、 V 分量的平均偏差为 -0.98 m/s 和 0.22 m/s ,均方根误差为 3.38 m/s 和 3.41 m/s ,相关系数达到了 0.91 和 0.81 ;并且在不同高度上都取得了较好的效果,说明该质量控制方案有效性,提升了资料的使用价值。

(4) 相对背景场的偏差分析显示,经过 NMIC 方案的 VAD 资料相对背景场的发散度减小明显,资料质量有明显提高。偏差和均方根误差均减小。VAD 相对背景场偏差的概率密度分布更接近高斯分布,更适应资料同化的无偏性要求。

(5) 初步的同化试验表明,经过 NMIC 方案质量控制以后,温度的平均偏差和均方根误差均有一定程度的降低。但这一方法在实际同化应用中的效果究竟如何还需要继续研究和检验。

参考文献

- [1] 周小刚,费海燕,王秀明. 基于多普勒雷达 VAD 算法的业务应用讨论[J]. 气象,2015,41(1):113-120.
- [2] Rabin R M, Zrníc D. Subsynoptic-scale vertical wind revealed by dual Doppler-radar and VAD analysis [J]. Appl Meteor, 1980,37:644-654.
- [3] 雷茂生. 单多普勒风场反演若干技术和进展[J]. 气象科技, 2000,28(3):19-21.
- [4] 常亚楠,戴建华,黄兴友,等. 单多普勒雷达反演涡旋风场方法分析[J]. 气象科技,2019,47(5):719-730.
- [5] 朱立娟,龚建东,李泽椿. 资料同化中雷达 VAD 风质量控制研究[J]. 高原气象,2012,31(6):1731-1738.
- [6] 杜晓勇,张鹏,胡明宝. VAD 技术反演水平风向风速的研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(3):81-84.
- [7] Lindskog M K, Salonen H, Jarvinen, et al. Doppler radar wind data assimilation with HIRLAM 3DVAR [J]. J Amer Meteor Soc, 2003, 132: 1081-1092.
- [8] 李华宏,薛纪善,王曼,等. 多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验[J]. 应用气象学报,2007,18(1):50-57.
- [9] 李华宏,曹杰,王曼,等. 单多普勒天气雷达反演风场高原低纬区域同化应用[J]. 气象科技,2014,42(5):823-831.
- [10] 张红华,王桂臣,曾明剑,等. 风廓线与测风塔资料在地面风场预报中的应用研究[J]. 气象科技,2014,42(3):451-459.
- [11] Eugenia K. 大气模式资料同化和可预报性[M]. 北京:气象出版社,2005:1-300.
- [12] William G C. The quality control of velocity azimuth display (VAD) winds at the National Centers for Environmental Prediction Preprints [C]//11th Symp On Meteorological Observations and Instrumentation, Albuquerque, NM, Amer Meteor Soc,2001:317-320.
- [13] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:1-314.
- [14] 邵爱梅,乔小湜,邱崇践. VAD 技术反演水平风廓线的质量控制标准[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(5):57-62.
- [15] Prepbufr Processing at NCEP [EB/OL]. (2018-02-12). https://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/prepbufr.doc/document.htm
- [16] 朱立娟,龚建东. OIQC 技术在雷达反演 VAD 廓线资料退模糊中的应用研究[J]. 高原气象,2006,25(5):862-869.
- [17] 杨梅,李玉林,单九生,等. 新一代雷达风廓线与探空风廓线资料相关分析[J]. 气象,2006,32(6):20-24.
- [18] 吴举开,周武,黄小丹. 多普勒雷达风廓线资料可用性评估[J]. 广东气象,2007,29(3):56-58.
- [19] 黄祖辉,陈丽红,王燕. 多普勒天气雷达风廓线与探空综合测风结果的对比分析[J]. 气象水文装备,2008,19(2):11-13.
- [20] 薛双青,杨洪平,高玉春,等. VAD 反演风与探空资料的对比分析[J]. 气象科学,2010,30(6):856-861.
- [21] 肖艳姣,万玉发,吴涛,等. 基于多普勒天气雷达的两种垂直风廓线反演方法的对比分析[J]. 高原气象,2015,34(1):288-297.
- [22] 阮征,高祝宇,李丰,等. 风廓线雷达与天气雷达风廓线数据的融合及应用[J]. 气象,2017,43(10):1213-1223.
- [23] 李华宏,曹杰,杞明辉,等. 雷达风廓线反演在云南强降水预报中的应用[J]. 高原气象,2012,31(6):1739-1745.
- [24] 安晶晶,邱兴,王曙东. 天气雷达组合风场显示产品的检验评估[J]. 气象科技,2019,47(4):552-562.
- [25] 董德保,张统明,芮斌. 风廓线雷达大气风场观测误差分析[J]. 气象科技,2014,42(1):48-53.
- [26] 李伟,刘凤琴,徐磊,等. L 波段高空气象探测系统软件[J]. 气象科技,2008,36(2):237-239.
- [27] 李庆雷,远芳,廖捷,等. 基于 ERA-Interim 的 L 波段探空秒级风速算法检验[J]. 气象科技,2018,46(5):855-860.
- [28] Code table for observation quality markers [EB/OL]. (2018-02-14). https://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/prepbufr.doc/table_7.htm
- [29] 裴丽丝,邱崇践. 多普勒雷达 VAD 风廓线资料的质量评估[J]. 热带气象学报,2013,29(4):597-606.
- [30] 王红叶,张伟,赵玉春. 面向资料同化的风廓线雷达风场特征分析及其质控方法[J]. 大气科学报,2021,45(1):123-147.
- [31] Jarvinen H. Observations and diagnostic tools for data assimilation [M]. Meteorological Training Course Lecture Series, ECMWF, 2002:19.

Quality Control and Assessment of VAD Wind Profile of Doppler Weather Radar

ZHU Chen¹ YUAN Fang¹ WANG Huiying¹ ZHANG Zhisen¹ ZHU Ting²

(1 National Meteorological Information Center, Beijing 100081; 2 Center for Earth System Modeling and Prediction of CMA, Beijing 100081)

Abstract: The Velocity Azimuth Display (VAD) winds provide wind field information with high temporal resolution. A quality control scheme, called the NMIC scheme, is developed for VAD winds from CINRAD Doppler radar, which improves the NCEP CQCVAD scheme. Compared with L-band sounding winds, the VAD data after the NMIC scheme is more accurate than those after the NCEP CQCVAD scheme and the data before quality control. The bias and root mean square error of the VAD data after the NMIC scheme are smaller than those after the NCEP CQCVAD scheme and the data before quality control at most height levels, which confirms the validity of the NMIC scheme. The VAD winds after quality control are also compared with the background. The distribution of the deviation between background and the VAD data after the NMIC scheme fits the Gaussian distribution better than the NCEP CQCVAD scheme. The results reveal that the VAD data after the NMIC scheme can meet the quality control requirements for data assimilation. This study would support and further improve the application of VAD winds in the numerical weather forecast.

Keywords: Doppler weather radar; VAD wind profile; quality control; sounding data; statistical analysis