

单多普勒雷达反演风场的质量控制

彭霞云, 闵锦忠, 周振波, 高斌斌

(南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用扩展 VAP 方法, 通过极值订正, 时间和空间连续性订正等方法, 对反演后的风场进行质量控制, 并与双多普勒雷达风场反演结果进行了对比。结果表明, 经过订正的反演风场中大部分有明显误差的点得到了修正, 而且订正后的风场更合理, 与双多普勒雷达风场反演结果更一致, 提高了反演风场的质量。

关键词: 雷达径向风; 风场反演; 质量控制

中图分类号: P412.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007)01-0079-07

Quality Control of Single Doppler Radar Derived Wind Field

PENG Xia-yun, MIN Jin-zhong, ZHOU Zhen-bo, GAO Bin-bin

(Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract Currently, wind retrieval with Single-Doppler radar data is still a difficult issue, and the retrieved wind is in low quality and difficult to apply. This is due to the low quality of radar data itself and the deficiency of retrieval methods. Based on a newly developed retrieval method Extended-VAP, several quality control methods including extremal check, spatial continuity check and temporal consistency check were developed and applied to the retrieval of wind field. Results show that most of the points which contain obvious errors could be corrected, the modified field seem more reasonable and consistent with Dual-Doppler radar retrieved field, and therefore the quality is much improved. However, how to determine a proper correction threshold and extra model-related procedure needs further investigation.

Key words radial velocity wind field retrieval; quality control

0 引言

新一代多普勒雷达可以对水平范围达四五百公里的大气进行扫描, 得到时、空分辨率较高的反射率和径向速度资料, 使了解风暴的三维结构, 提高对几十公里乃至几公里的中小尺度系统的认识成为可能。目前数值模式在中尺度系统的解析上还存在困难, 主要是资料分辨率的问题, 而雷达资料正好可以弥补这一点。然而多普勒雷达提供的径向风仅是实际大气风矢量的一个分量, 要了解大气真实的三维风场结构, 必须把径向风反演为模式变量 u , v , w 。

要从雷达径向风资料中准确提取三维风场信息, 从理论上说必须有三部雷达同时扫描同一块区

域才行, 但从目前我国雷达分布情况看, 大部分地区仅能被一部雷达覆盖, 故目前单多普勒雷达反演仍将是研究的主要内容之一。

单多普勒雷达风场反演的方法主要有 VAD (Velocity Azimuth Display)、EVAD (Extended Velocity Azimuth Display)、VVP (Volume Velocity Processing)、VAP (Velocity Azimuth Processing)、UW (Uniform Wind)、涡度-散度法、TREC (Tracking Reflectivity Echoes by Correlation) 方法、GBVTD (Ground-Based Velocity Tracking Display Method)、简单伴随法以及四维变分分析系统 (VDRAS) 反演等^[1-9]。

这些反演方法普遍附加了线性、局地均匀等过强的假设条件, 反演结果的质量相应受到限制。据

收稿日期: 2005-10-13 改回日期: 2006-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40575052); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2004140); 江苏省气象灾害重点实验室资助项目 (KIME050218); 教育部留学归国人员资助项目

作者简介: 彭霞云 (1980-), 女, 浙江嘉兴人, 硕士, 研究方向: 中尺度数值预报及资料同化, xypeng@nuist.edu.cn; 闵锦忠 (通信作者), 男, 教授, minj@nuist.edu.cn

周海光等^[10]对几种单多普勒雷达反演方法的比较,表明各种反演方法对简单的平直气流的反演效果都比较好,但对涡旋风场反演的精度都有限。实际大气往往是各种尺度的系统的叠加,更为复杂;另一方面由于雷达探测过程中风场受到扰动,资料易带有较大的观测误差,进一步限制了反演风场的准确性。

如何提高雷达资料的质量和使用效率,一直是雷达应用研究中的热点,国内外学者对此做了很多研究工作^[11]。近几年,Zhang等^[12]研究了雷达资料中鸟、昆虫等生物回波的辨别和消除方法。Michelson等^[13]将雷达 VAD 风廓线资料和常规探空资料进行比较,去除不合理的点,并和模式模拟值进行了比较订正,取得了一定的效果。Li等^[14]进一步发展了单多普勒雷达反演系统的质量控制部分,增加了对于噪声、雷达探测方式的非正常转换以及生物回波等的处理,并在做好原始资料质量控制的基础上,进行了反演资料的质量控制。Friedrich等^[15]发展了一套反演后水平风场的质量检查标准,可用于单、双、多多普勒雷达反演结果。

本文认为鉴于雷达资料质量控制问题的复杂性,以及反演方法的局限性,反演后水平风场的质量控制也是一个需要研究的内容。本文采用文献[16]提出的反演方法,得到水平风场,在做好资料预处理的基础上,根据质量控制的一般原则,设计了几种简单易行的反演风场质量控制方案,以提高资料的可靠性。

1 资料和方法

1.1 资料及其预处理

本文所使用的雷达资料是 2003 年 7 月 5 日 08 时 38 分合肥 CINDA-98D 多普勒雷达体扫基数据资料。方位角 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$, 径向库长 250 m, 最大库数 920 径向速度分辨率 0.5 m/s 。对原始资料进行了简单退模糊处理,填补缺测点,去除孤立点,并沿径向和切向进行 3 点平滑,以消除小尺度的噪声。这些处理在雷达资料应用前是必不可少的,对提高资料的质量有重要作用。

1.2 天气概况

2003 年 6 月下旬至 7 月上旬梅雨期,淮河流域出现了持续强暴雨。7 月 4 日 20 时—5 日 20 时滁州雨量为 351.7 mm,创 7 月历史极值。此次天气过程主要由副热带高压北侧的强西南低空急流和北方贝加尔湖地区分裂南下的小股冷空气在江淮流域交

汇,并在该地区稳定维持所造成的。

1.3 反演方法

陶祖钰^[17]在局地均匀风假设条件下提出了 VAP 方法,该方法假定相邻两根径向的实际风向和风速不变化,由此根据各距离圈上多普勒速度的分布廓线计算出风向风速。

由于 VAP 方法采用局地均匀风假设,但实际分析中常因相邻两个方位角的风场不满足该假设而造成误差,特别是当实际风向和径向的夹角趋近 90° 时,风速的误差将变得很大。周振波等^[16]在 VAP 方法基础上,提出了扩展 VAP 方法,即 E-VAP,把假定条件推广为局地非均匀风场。

本文利用该方法反演了底层 3 个仰角 (0.5° 、 1.5° 、 2.4°) 的资料,并利用三维 Crossman 插值技术将反演后的风矢量从锥面插值到迪卡尔坐标系中格距为 1 km 的 2 km 等高面上。

风场反演区域为 $90 \text{ km} \times 90 \text{ km}$,位于雷达的东偏北方向,左下角位于 (117.8°E , 31.65°N)。将反演结果(图 1a)与周海光等^[18]用双多普勒雷达资料通过 MUSCAT 技术反演的结果(图 1b)进行比较可见, E-VAP 反演风场的型式和双多普勒雷达风场反演结果基本吻合,大致模拟出了西南风与西北风辐合,辐合线的位置也基本一致,但反演区域北部差异较大,特别是在西北角出现了虚假的辐合,这可能和这一区域位置接近雷达探测范围的边缘有关。双多普勒雷达反演的风速大小在 10 m/s 左右,而图 1a 中达到 20 m/s 以上,将结果与南京探空站 2 km 高度风速(表 1)进行比较发现, E-VAP 反演结果更合理一些。另外双多普勒雷达反演风场比较均匀,而 E-VAP 反演个别区域风向风速变化比较大,风场显得凌乱。考虑到凌乱风场给应用带来困难,因此本文采用一些方法对其进行订正。

表 1 2003 年 7 月 5 日 08 时 3 个探空站

850 hPa 和 700 hPa 位势高度

和风速及插值得到的 2 km 高度的风速

Table 1 850 hPa and 700 hPa potential heights/wind velocity and the 2 km wind velocity interpolated from three Soundings at 0800B ST July 5th 2003

站名	850 hPa		700 hPa		2 km 高度
	高度 /m	风速 /(m/s)	高度 /m	风速 /(m/s)	风速 /(m/s)
南京	1445	18	3091	22	19.3
安庆	1466	15	3119	20	16.6
阜阳	1430	6	3075	11	7.7

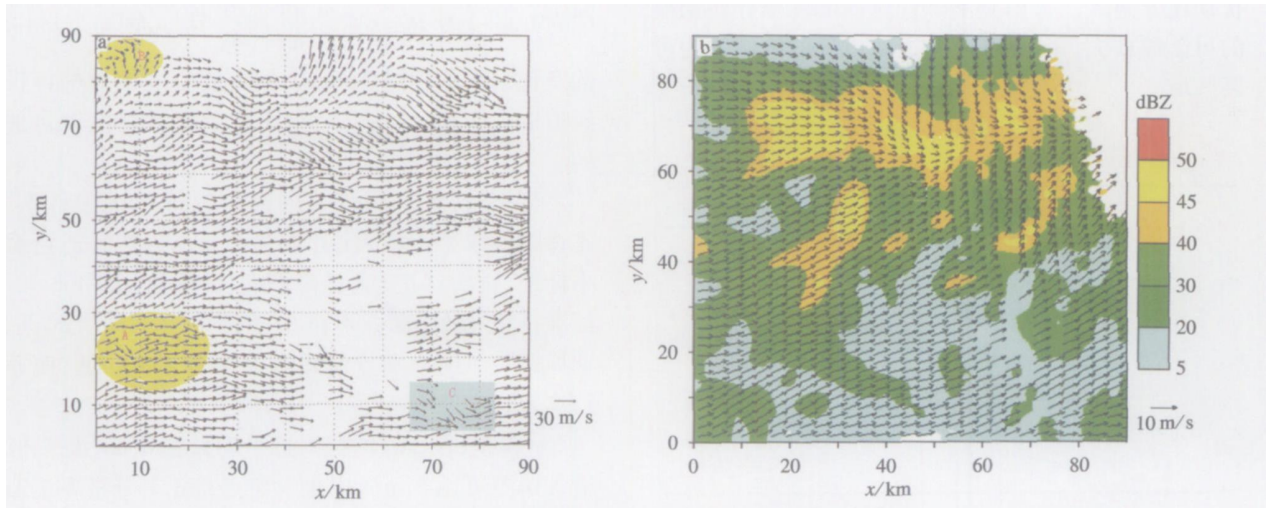


图 1 E-VAP反演的风场 (a)和双多普勒雷达反演风场 (b)

Fig 1 Horizontal wind fields retrieved by (a) E-VAP and (b) MU SCAT method

2 误差分析及质量控制

反演后风场的误差主要来源于 3 个方面: (1) 雷达原始资料的观测误差; (2) 反演误差; (3) 插值带来的误差。雷达原始资料的观测误差主要表现为小尺度噪声、速度模糊、地物杂波等, 对这些问题雷达本身已经进行了相应的质量控制, 且本文在反演之前对资料进行了沿径向平滑、填补缺测和去除孤立点等处理, 进一步减小了原始资料的误差。而插值误差可以通过选取好的插值方法来减小。最主要的误差是由于单多普勒雷达风场反演方法应用了过强的假设条件, 使反演后出现较大的偏差, 故在进行完善的原始资料质量控制的同时也需要对反演后的资料进行质量控制。

因为缺少精确可比的资料, 很多时候只能通过和探空资料的大致比较来查看结果, 但是由于探空站分布十分稀疏, 这种比较缺乏可信度, 因而从雷达资料自身寻找质量检查办法。通常质量控制遵循 3 个原则: (1) 合理性原则; (2) 连续性原则; (3) 满足诊断方程的原则^[19]。由于只有水平风场资料, 故无法采用诊断方程进行订正。基于此, 本文设计了根据历史探空资料进行的极值订正, 以及空间、时间连续性订正。

2.1 极值订正

根据历史探空资料, 在非台风的情况下, 2 km 高度风速的气候极值取为 40 m/s。因原始资料已经过预处理, 极值已经很少了, 本次订正未出现风速大于 40 m/s 的情况。

另外, 考虑到雷达资料本身的精度 (雷达资料

的分辨率为 0.5~1 m/s) 以及反演方法能力的限制, 将风速小于 1.0 m/s 的点也剔除。

2.2 空间连续性

基本思想是假定风场在水平方向变化是线性的连续的, 每一点和周围点的差应在一个合理的范围之内。计算每一个点与其局地 (周围 8 个点) 平均值的差, 作为质量检查的标准。具体公式如下:

$$\varepsilon = \left| f_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_j \right|, \quad n > 4$$

其中: f_i 为所要订正点的分量, f_j 为与其相邻点的 u, v 分量, n 为其周围参加订正点的个数, 因为有缺测情况存在, 为了保证所得的平均值具有代表性, 规定 n 必须大于 4。若不满足, 则扩大取点范围到周围的 24 个点。文中将 u 和 v 的偏差分别记为 ε_u 和 ε_v 。

定义 u 和 v 的均方根偏差 r_u 和 r_v :

$$r_u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}, \quad n > 2 \text{ 且 } 2n \leq 9$$

$$r_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}$$

式中 u_i, v_i 分别表示每个区域中各点的 u, v 值, \bar{u}, \bar{v} 表示该区域平均的 u, v 风速, n 为该区域中资料点的个数。

先分别计算每个小区域 (3 km × 3 km, 9 个点) 的 r_u 和 r_v , 以代表风场的离散程度。计算表明, 平均 r_u 值为 0.86 m/s, r_v 为 1.42 m/s。统计分布情况见表 2。由表 2 可见, 均方根偏差值较小的区域占了绝大多数, 只有少数区域风场比较凌乱, 并且 v 的扰动比 u 更大。考虑到离散程度高的区域存在误差

的可能性就大,将 r_u 和 r_v 大于 4 m/s 的区域定为可疑区域。

表 2 u 、 v 分量均方根偏差分布

Table 2 Distributions of r_u and r_v before correction

	范围 / (m/s)	区域个数
r_u	0~2	694
	2~4	47
	>4	2
r_v	0~2	590
	2~4	142
	>4	12

计算每个点的 u 与区域平均值的偏差,得到 ε_i 的平均值为 0.42 m/s 。大部分点的 ε_i (图 2a) 都在自身风速的 10% 以内,但也有少部分点偏差超过 20%,显然偏差大的点的风速不符合风场连续性原则,应对其进行订正。

对偏差大的点如何给出一个合理的量化的订正标准是问题的关键。考虑此次天气过程是中尺度系统作用的结果,对于中尺度系统,其散度范围为 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ [20],取无量纲特征数最大为 1,假设所有的散度均由 u 分量产生, $\frac{\partial u}{\partial x}$ 的范围为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,则每 1 km u 的变化范

围为 $0.1 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 。考虑 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial v}{\partial y}$ 异号,则每 1 km u 的变化最大不超过 2 m/s 。因此将空间偏差的订正阈值取为 2 m/s 。经实际验证这个阈值是比较合理的。

订正时,先采用较大的阈值进行几次预订正。先将阈值取得比较大(如取为 5 m/s),然后适当缩小标准,再次订正,反复若干次,最终再用 2 m/s 的标准订正几次,直至不再出现偏差大于该值的点。这样避免了因个别点偏差过大影响了平均值,而导致本来合理的点被订正。

v 偏差(图 2b)的绝对值平均只有 0.63 m/s 但最大偏差可达 5 m/s 以上。特点是正 v 分量多正偏差,负 v 分量多负偏差。与前面的处理类似, v 分量偏差的阈值也取为 2 m/s 。对 v 分量偏差进行预订正的标准取为 5 m/s 、 4 m/s 和 3 m/s 。最后用 2 m/s 的标准作若干次订正。

对于偏差大于阈值的点处理,给定以下两条判定标准:

(1) u 或 v 偏差的绝对值 $\geq 4 \text{ m/s}$

(2) u/v 偏差的绝对值在 $3 \sim 4 \text{ m/s}$ 之间,且局地 r_u/r_v 值大于 4 m/s

满足上述标准之一的就剔除,否则就用平均值代替。

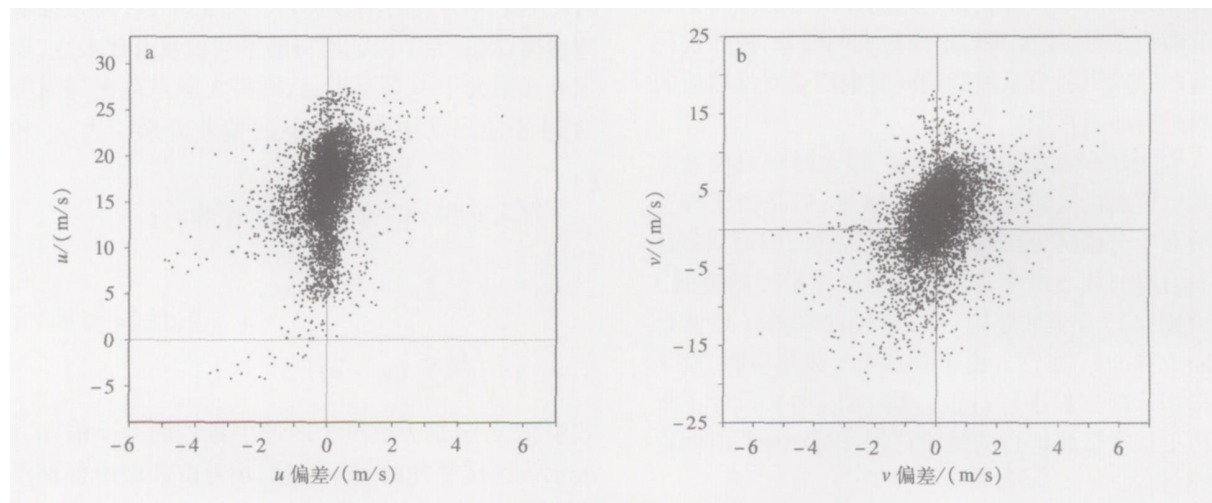


图 2 空间偏差随本身速度分量的分布 a u ; b v

Fig 2 Distributions of spatial deviation against velocity component itself a u ; b v

2.3 时间连续性检查

鉴于雷达资料具有较高的时间分辨率(5~6 min完成一次体扫)。假定在这么短的时间内,局地风场的变化是一阶线性的,则可用前后两个时次

的资料来订正中间时刻的资料。对前后两个时次的 u/v 分别平均,并和中间时刻的 u/v 作对比。从图 3a 3b 可见,绝大多数点在斜率为 1 的直线附近,且两个场的相关性很好, u 、 v 相关系数分别达到 0.85

和 0.70 这说明风场的变化基本是线性的, 用前后两个时次的风场进行订正是可行的。

对两个场进行最小二乘拟合, 结果分别为 $y = 0.97x + 0.86$ (u 场) 和 $y = 0.58x + 0.12$ (v 场) (图 3)。由图 3 可见, u 分量的拟合情况与理想情况 ($y = x$) 较为接近, 而 v 分量拟合结果不甚理想。中间时刻 u, v 与前后两个时次平均值偏差的绝对值为

2.00 m/s 和 2.62 m/s 均比空间偏差大。这是因为如果平均风速为 20 m/s 那么在 10~12 min 内空气质点经过的空间距离约为 12~14 km, 因此在采用时间连续性进行订正时, 必须非常小心, 应将阈值取得宽一点。通过试验比较, 将阈值取为 10 m/s 目的是为了订正明显不合理的点。

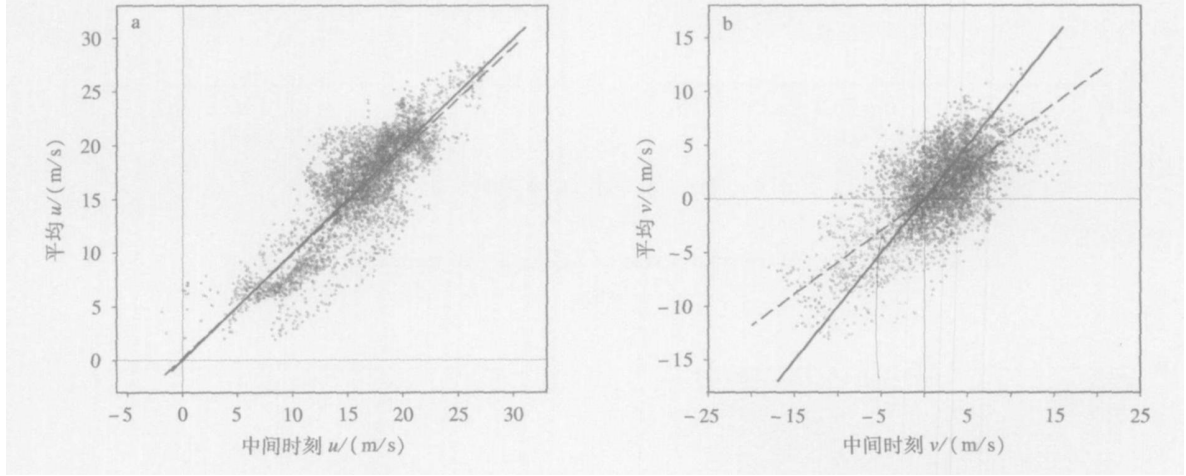


图 3 u (a) v (b) 与其前后两个时刻体扫的平均 u (a) 平均 v (b) 的散点图
(图中实线为 $y = x$, 虚线代表最小二乘拟合)

Fig 3 Scatter diagrams of (a) u / (b) v at a scan versus the averaged (a) u / (b) v over the previous and next scans
(solid line $y = x$; dash line represents the Least Square Fit)

从图 4 中可以看到, 风场时间上的偏差分布不如空间偏差那样集中, u 场偏差最大的情况出现在风速为 15~20 m/s 左右的地方, v 场偏差最大的情况出现在 v 风速最大和最小的地方。10 m/s 的阈值仅对 v 风场中偏差最大的点有修正作用。

在这一步订正中, 将偏差超过阈值的点用平均值代替而不剔除。虽然阈值取得较宽, 但仍可能使订正后风场在空间上不协调。因此, 在时间连续性检查完成之后, 必须再在空间上进一步订正、协调。

凌乱的情况未有明显改善。图中 A、B 区域订正前后风场相比有较大变化, 去除了较多的杂乱的点, 修正了不连续变化的点。从图 5b 可见除了上述 A、B 两个区域以及一些被剔除的奇异点外, 其余大部分区域风向和风速的调整幅度都比较小, 没有改变风场原来的结构, 与图 1b 更接近。

总体来说, 利用雷达反演资料自身高时空分辨率的优势, 至少可以部分地达到质量控制的目的。

3 结果比较

经过上述订正步骤后, 共剔除了 88 个点, 修正了 708 个点, 这些点占总数的 11.5%, 小区域的均方根偏差计算表明, 平均 r_u 和 r_v 分别为 0.66 m/s 和 1.05 m/s 比订正前降低了 23.2% 和 26.1%, 从表 3 中也可看到, 偏差大的小区域数量明显减少。

将图 5a 与图 1a 比较可见, 风向和风速不合理的风矢量明显减少了, 风场趋于均匀光滑。尽管还不能完全去除那些不太合理的奇异点, 特别是对那些周围没有足够点的孤立点, 如图 5a 中 C 区, 风场

表 3 订正后 u, v 分量均方根偏差分布

Table 3 Distributions of r_u and r_v after correction

	范围 / (m/s)	区域个数
r_u	0~2	714
	2~4	26
	>4	0
r_v	0~2	646
	2~4	98
	>4	1

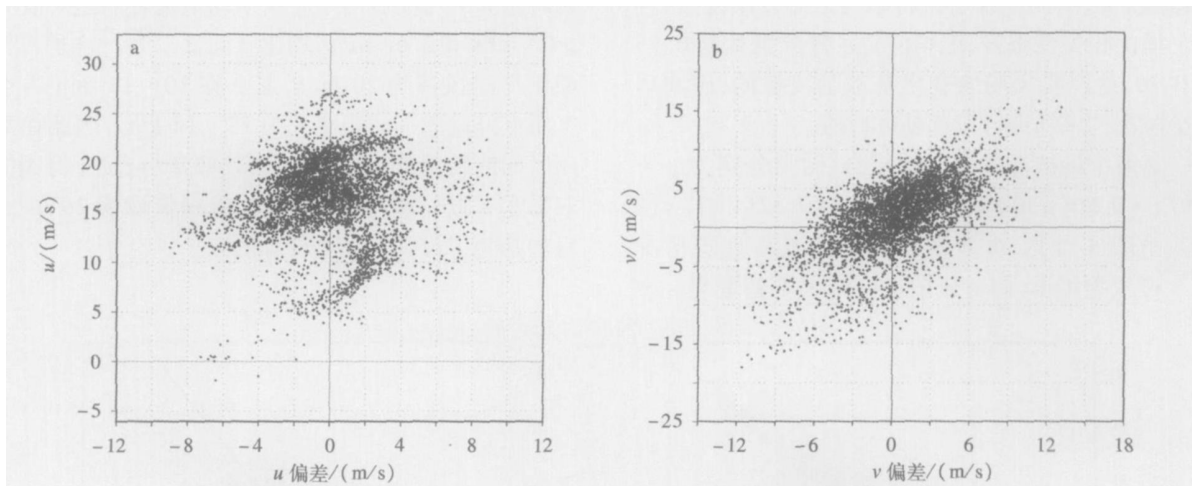


图 4 时间上偏差随 u/v 本身的分布

a $u; h v$

Fig. 4 Distributions of temporal deviations against u/v of themselves respectively

a $u; h v$

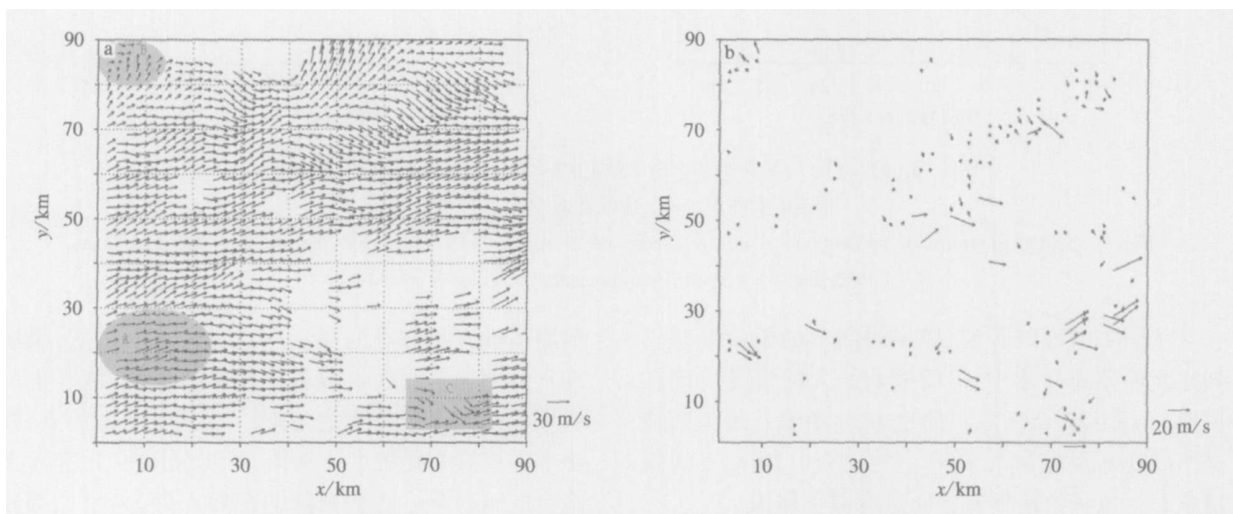


图 5 质量控制后的 E-VAP 反演风场 (a) 和质量控制前后风场差 (b)

Fig. 5 (a) Wind field after correction and (b) difference between the wind fields before and after correction

4 结论与讨论

雷达反演风场的误差较大, 这一方面需要发展更好的反演方法, 另一方面需要对反演风场进行适当的质量检查。本文着眼于第 2 个方面, 通过个别试验, 得出如下主要结论:

- (1) 利用探空资料进行的极值订正, 可以初步去掉一小部分明显违背常理的点;
- (2) 利用雷达资料的时间和空间连续性进行订正, 可以修正反演风场的不协调性, 提高资料的可靠性和一致性, 为下一步数值应用作了准备;
- (3) 通过与双多普勒雷达风场反演结果的比

较, 说明根据资料的时间和空间连续性进行质量控制, 是一个切实可行又较为有效的方法;

(4) 从散度的角度, 可以为中尺度系统风场订正阈值的选取提供一个参考。

目前的工作还存在一些问题: (1) 对于阈值的选取带有一定的主观性。如果阈值取得较大, 则达不到订正的效果; 反之, 则容易将正确的点剔除或修正, 风场的实际变化无法充分体现。理论上, 还需要通过大量的试验来确定合理的阈值。(2) 对于一些周围没有足够资料的孤立点, 还需设计更好的方案进行处理。(3) 还需结合数值模式来进一步验证或订正。

致谢: 感谢中国气象科学研究院的周海光博士为本文提供了双多普勒雷达反演资料。

参考文献:

- [1] 顾建峰, 薛纪善, 颜宏. 多普勒雷达变分分析系统概述 [J]. 热带气象学报, 2004 20(1): 1-13
- [2] 姜海燕, 葛润生. 一种新的单多普勒雷达反演技术 [J]. 应用气象学报, 2000 11(2): 219-223
- [3] 王峰云, 王燕雄, 陶祖钰. 单多普勒天气雷达的中尺度风场探测技术研究 [J]. 热带气象学报, 1991, 7(3): 291-298
- [4] Tuttle JD, Foote G B. Determination of the boundary layer air flow from a single Doppler radar [J]. J Atmos Ocean Tech 1990, 7(2): 218-332
- [5] Qiu C, Xu Q. A simple adjoint method of wind analysis for single Doppler data [J]. J Atmos Oceanic Technol 1992, 9(5): 588-598
- [6] 马翠平, 张培昌, 匡晓燕, 等. 单多普勒天气雷达反演中尺度气旋环流场的方法 [J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(4): 579-585
- [7] 胡志群, 夏文梅, 杨昌年, 等. 用改善的 EVAD 技术和变分法计算大气垂直速度 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 344-350
- [8] 石燕, 冯晋勤, 魏鸣. 一次强降雨过程的简化伴随模式风场反演 [J]. 南京气象学院学报, 2006 29(4): 533-539
- [9] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observation using a cloud model and its adjoint Part I: Model development and simulated data experiments [J]. J Atmos Sci 1997, 54(12): 1642-1661
- [10] 周海光, 张沛源. 多种单多普勒雷达风场反演方法对比试验 [J]. 气象, 2000, 26(5): 13-17
- [11] Alberoni P P, Ducrocq V, Gregoric G, et al Quality and assimilation of radar data for NWP—A review COST-717 working document EUR20600 38pp [EB/OL]. [2004-11-15]. <http://www.smhi.se/cost717/>.
- [12] Zhang P, Liu S, Bi L, et al Real-time WSR-88D velocity data quality control on bird detection [R]. Preprints Amer Meteor Soc 31th Conference on Radar Meteorology, Washington, Seattle 2003: 473-474
- [13] Michelson S A, Seaman N L. Assimilation of NEXRAD-VAD wind in summertime meteorological simulations over the Northeastern United States [J]. J Appl Meteor 2000, 39(3): 367-383.
- [14] Liu S, Zhang P, Wang L, et al Problems and solutions in real-time doppler wind retrievals [R]. Preprints Amer Meteor Soc 31th Conference on Radar Meteorology, Washington, Seattle 2003: 308-309
- [15] Friedrich K, Hagen M. Wind synthesis and quality control of multiple-doppler-derived horizontal wind fields [J]. J Appl Meteor 2004, 43(1): 38-57.
- [16] 周振波, 闵锦忠, 彭霞云. 单多普勒雷达风场反演的扩展 VAP 方法. (1): 方法与对比试验 [J]. 高原气象, 2006 25(3): 516-524.
- [17] 陶祖钰. 从单 Doppler 雷达速度场反演风矢量场的 VAP 方法 [J]. 气象学报, 1992 60(1): 81-90
- [18] 周海光, 王玉彬. 双多普勒雷达对 03.7 淮河流域特大暴雨的风场反演 [J]. 气象, 2004, 30(2): 17-21
- [19] Gandin L S. Complex quality control of meteorological observations [J]. Mon Wea Rev, 1988 116(5): 1137-1156
- [20] 杨国祥. 中小尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 1983: 42-43.