

刘梦娟, 刘舜. 2016. 上海组网风廓线雷达数据质量评估. 气象, 42(8): 962-970.

上海组网风廓线雷达数据质量评估^{*1}

刘梦娟¹ 刘舜²

¹ 上海中心气象台, 上海 200030

² 国家气象服务/环境预报及模拟中心, 马里兰州 20740 美国

提 要: 利用 2014 年 6 月美国国家环境预报中心(NCEP)的全球模式分析资料, 对上海及周边地区组网的七部边界层风廓线雷达的水平测风数据进行了初步分析和比较。由于 NCEP 全球模式分析资料并未使用上海 13:15 加密观测探空秒间隔数据, 首先用该数据对 NCEP 分析资料的准确性和代表性进行了检验。结果表明, 两者平均偏差与均方根误差均较小, 故认为 NCEP 分析资料可用于客观检验上海及周边地区组网的七部边界层风廓线雷达的水平测风数据。对比分析风廓线雷达与 NCEP 分析资料表明总体上, 风廓线雷达与 NCEP 分析资料的平均风场风速偏差为 $-0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均方根误差为 $2.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风向偏差为 -4.28° 。上海组网风廓线雷达测风资料质量与探空观测水平接近, 有较高的可用性。

关键词: 风廓线雷达, 探空, 分析资料, 对比分析

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.08.006

Evaluation of Wind Profiler Network Data in Shanghai

LIU Mengjuan¹ LIU Shun²

¹ Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

² I. M. System Group at National Weather Service/National Center of Environmental Prediction/Environmental Modelling Center, College Park, Maryland 20740, USA

Abstract: The horizontal wind observations from seven boundary layer profilers in Shanghai are evaluated by using the analysis data from the NCEP Global Data Assimilation System (GDAS) in June 2014. Since the densely-observed rawinsonde data in Shanghai has not been assimilated by GDAS, these data are used to evaluate the accuracy and representativeness of NCEP's analysis data. The results show that both bias and RMSE between rawinsonde observations and NCEP data are small, which indicates that NCEP's analysis data are accurate enough to evaluate the quality of profiler data in Shanghai. Then the profiler observations are further compared with NCEP's analysis data. The bias and RMSE are respectively $-0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $2.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for wind speed, and -4.28° is for wind direction over all heights for the whole month. The comparison shows that data quality of wind profiler in Shanghai is close to that of rawinsonde. The wind profiler observation data in the network are reliable and can be used in operation or research.

Key words: wind profiler, rawinsonde, analysis data, comparative analysis

引 言

风廓线雷达具备全天候无人值守下连续获得测

站上空高时空分辨率的风速风向、大气折射率结构常数等气象要素信息的能力(易仕明等, 1988; 孙旭映等, 2008; 胡明宝等, 2010), 在全球范围内已广泛应用于中小尺度天气的研究与预报中(顾映欣等,

* 国家自然科学基金项目(41475040)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306010)共同资助
2015 年 8 月 19 日收稿; 2016 年 2 月 7 日收修定稿
第一作者: 刘梦娟, 主要从事边界层观测资料、数值模拟研究. Email: mengjuan.liu@gmail.com

1991;翟亮,2008;汪学渊等,2013;刘莲等,2015;葛晶晶等,2008;郑永光等,2007)。美国、日本先后建立了数十部风廓线雷达组成的国家气象业务观测网(Weber et al, 1990b),资料在多个领域得到广泛应用。上海市气象局开展风廓线雷达的应用研究工作始于 20 世纪 90 年代初,在 2011 年 3 月底,上海市气象局就已基本完成了全市境内风廓线雷达的布点和组网。目前全网共有 10 台边界层风廓线雷达在运行,其主力型号是国产 TWP3 型边界层风廓线雷达,还有一部分早期 LAP3000 型边界层风廓线雷达(吴志根等,2013)。

尽管风廓线雷达网的布设越来越密,但组网风廓线雷达资料的质量如何?目前相关的研究工作还很少(董丽萍等,2014;吴志根等,2013;邵德民等,2001;徐同等,2012)。以往风廓线数据的检验通常针对单站,且直接参考探空:Weber 等(1990a)利用美国科罗拉多州机场的探空与同站址的 UHF 风廓线雷达长达 2 年测风数据进行对比分析后提出,两者所测水平风速标准差为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Weber et al, 1990a);万蓉等(2011)定义风廓线雷达资料与探空资料风向偏差在 20° 以内或风速偏差在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内的样本为有效样本,通过有效样本比例对比分析了风廓线雷达资料的观测质量。王欣等(2005)对 2002 年梅雨锋期间的风廓线雷达与同步探空仪资料进行了对比,验证了风廓线雷达资料的可信度。

如何对组网边界层风廓线雷达的资料质量进行评估,存在许多困难。上海地区的 10 台风廓线雷达,布网间距在 $20 \sim 40 \text{ km}$ 左右(吴志根等,2010),而上海地区探空只有宝山一站,仅用单部探空资料对多个站点进行对比分析存在一些缺陷:风廓线雷达与任意一处探空资料的观测高度、位置、时间都无法严格对应,各部风廓线雷达距离探空站的远近位置亦不同,仅参考同一部探空资料比较得到的结果难以避免地形与空间差异带来的影响,缺乏代表性。

美国国家环境预报中心(NCEP)提供了全球分析资料(Wu et al, 2002)。对于 NCEP 分析资料的可信度和质量问题,许多学者在不同地区,用不同方法从不同角度进行了分析、比较和评价(赵天保等,2004;袁松等,2012;戴泽军等,2011;Silva et al, 2011;赵佳莹等,2014;Wu et al, 2003)。本文首先介绍用到的观测与分析资料。由于 NCEP 分析资料并未使用上海地区 13:15 的加密观测探空基数据,可用其检验 NCEP 分析资料的准确性和代表

性。NCEP 资料在研究时段的代表性与合理性得到确认后,将其作为真实大气的代表,插值到各个风廓线雷达站点所在经纬度后,与风廓线雷达资料进行对比,以此对风廓线雷达资料在试验期间的质量进行较为全面的评估。

1 观测与分析资料

本研究所用的观测数据源自 2014 年 6 月 1—30 日上海组网边界层风廓线雷达的水平风数据和宝山探空的秒探空资料。用于比较分析的数据是基于美国国家环境预报中心(NCEP)发布的全球分析资料。

1.1 风廓线雷达

上海地区目前共布设了 11 部边界层风廓线雷达,其中 10 部由上海市气象局布设,1 部位于浦东机场,由民航部门布设。其中,位于青浦、嘉定外岗、浦东凌桥的风廓线雷达为维萨拉公司生产的 LAP3000 型风廓线雷达,其余 8 部风廓线雷达为北京敏视达雷达有限公司生产的 TWP3 型号风廓线雷达(徐同等,2012)。2014 年 6 月,11 部风廓线雷达中共有 7 部正常运行,分别是浦东 LAP3000 型和世博园区、松江、小洋山、奉贤、嘉定 F1、金山 6 部 TWP3 型风廓线雷达。两种型号的风廓线雷达空间垂直分辨率都为 60 m ,试验期间最大探测高度可达 5980 m ,每 30 min 可提供一次测风廓线。图 1 是试验期间正常运行的 7 部风廓线雷达的站址布局

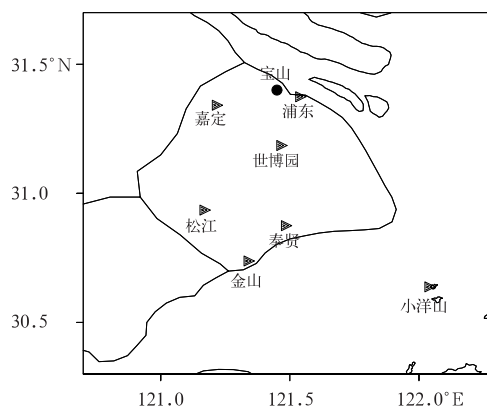


图 1 上海市组网风廓线雷达及探空布局示意图

Fig. 1 Distribution of wind profiler network and rawinsonde in Shanghai

以及宝山站探空的地理示意,图中三角为风廓线雷达站地理位置,边界层风廓线雷达组网的间距基本上设在 20~40 km,圆点为宝山站地理位置。

由于组网的测风设备均为边界层风廓线雷达,测风资料的取样高度限定为 160~3940 m 的范围内,一共分为 64 个比较层,垂直分辨率取 60 m,其中不同型号的风廓线雷达资料的高度误差匹配在 30 m 以内。本研究所用资料均未经过质量控制处理。

1.2 模式资料

美国国家环境预报中心发布的全球分析资料采用了先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对各种资料来源的观测资料(地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等)进行质量控制和同化处理,获得一套完整的分析资料集,数据均为经纬度格点数据(袁松等,2012)。本研究所用的资料为 2014 年 6 月间每日 4 时次(00、06、12 和 18 UTC),分辨率为水平 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (经纬网格),垂直 64 层 eta 层,经度范围 $0^\circ \sim 360^\circ$,纬度范围 $90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$ 的资料。

1.3 探空观测

上海市宝山(31.4°N , 121.45°E)探空站在试验期间每日释放探空气球 3 次,观测站点上空的气压、温度、相对湿度、风向风速等气象要素。其中 07:15 与 19:15 时两次为常规观测,13:15 一次加密观测。该站作为上海地区唯一一个探空站,对上海地区上空的大气具备一定代表性。本文所用数据为探空基数据,因采样周期约为 1.2 s,也称秒间隔数据,按照 $400\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升速计算,探空数据垂直采样间隔为 8 m,探测高度可达 10 hPa。因每日两次常规观测中的部分信息已用于 NCEP 分析资料的同化中,故本研究只使用了 13:15 的加密观测秒间隔数据。因秒探空数据分辨率较高,用于比较资料的高度范围以及各个分层高度与风廓线雷达的情况相同,高度匹配误差在 5 m 以内。由于资料对比的高度都小于 4 km,所以用于比较的探空数据是从每次探空后生成的秒数据文件中提取气球释放的随后 12 min 内的测风数据,再进行 30s 滑动平均后(王玺等,2011)得到的。

2 对比分析

通过上述资料处理,本研究在所有时段中所用

的统计匹配样本的总数是 42247 对,其中用于组网风廓线雷达测风比较的统计匹配数据为 42288 对(14:00 的统计匹配数据为 10658 对),用于宝山探空测风比较的统计匹配数据为 1920 对。

将格点形式的分析资料经过线性插值到观测站点所在的地理位置与各层比较层上后,就可以得到每个观测数据对应空间位置的分析资料的气象要素值。

经过资料处理后,得到统一高度层上每一个观测数据和其对应空间位置的分析资料,计算了两者在风速、风向、 u 、 v 分量的差值,平均偏差、绝对偏差及均方根误差,具体的计算公式为:

$$\text{差值(Bias): } B = X_O - X_M$$

$$\text{平均偏差(MB): } MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{O_i} - X_{M_i})$$

$$\text{绝对偏差(MAB): } MAB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{O_i} - X_{M_i}|$$

$$\text{均方根误差(RMSE):}$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{O_i} - X_{M_i})^2 \right]^{1/2}$$

式中, X_{O_i} 为第 i 个观测值, X_{M_i} 为第 i 个经过插值处理后的分析资料值。

2.1 分析资料的合理性

若以现有的高空常规资料,即探空观测直接评估上海地区组网边界层风廓线资料,评估得出的资料质量除了受仪器本身的误差影响之外,还受到来自观测时间、空间不统一带来的影响:探空观测与任意一部风廓线雷达的观测高度、位置、时间都无法严格对应,各部风廓线雷达距离探空站的远近位置亦不同。若将 7 部风廓线雷达资料都于同一处探空资料比较,无法避免地形与空间差异带来的影响。若只比较距离探空最近的风廓线雷达资料,即浦东站,由于其型号与其他 6 部不同,结果缺乏代表性,也无法反映组网风廓线雷达资料的总体情况。

因此,本研究借助 NCEP 全球分析资料其全球化、格点化的优势,来减少不同观测时间、空间带来的误差影响。然而首先需要检验 NCEP 全球分析资料在上海地区的质量是否可靠。由于宝山探空站每日两次常规观测的部分气压层上观测已被同化入分析场,本研究只使用未被同化的加密探空观测资料,即 14 时的秒探空资料,来检验本研究所关注时间段内,上海地区 4 km 以下高度层 NCEP 分析资

料的合理性。

图 2a~2d 是根据探空资料与分析资料对比统计后点绘的各个层次上的偏差、绝对偏差与均方根误差曲线图。为确保比较的客观性,图中统计数据

的样本只采用 2014 年 6 月每日 14 时规定高度层上的探空观测资料。其中图 2a、2b、2c 和 2d 分别为 u 风分量、 v 风分量、水平风速、风向的垂直廓线图。

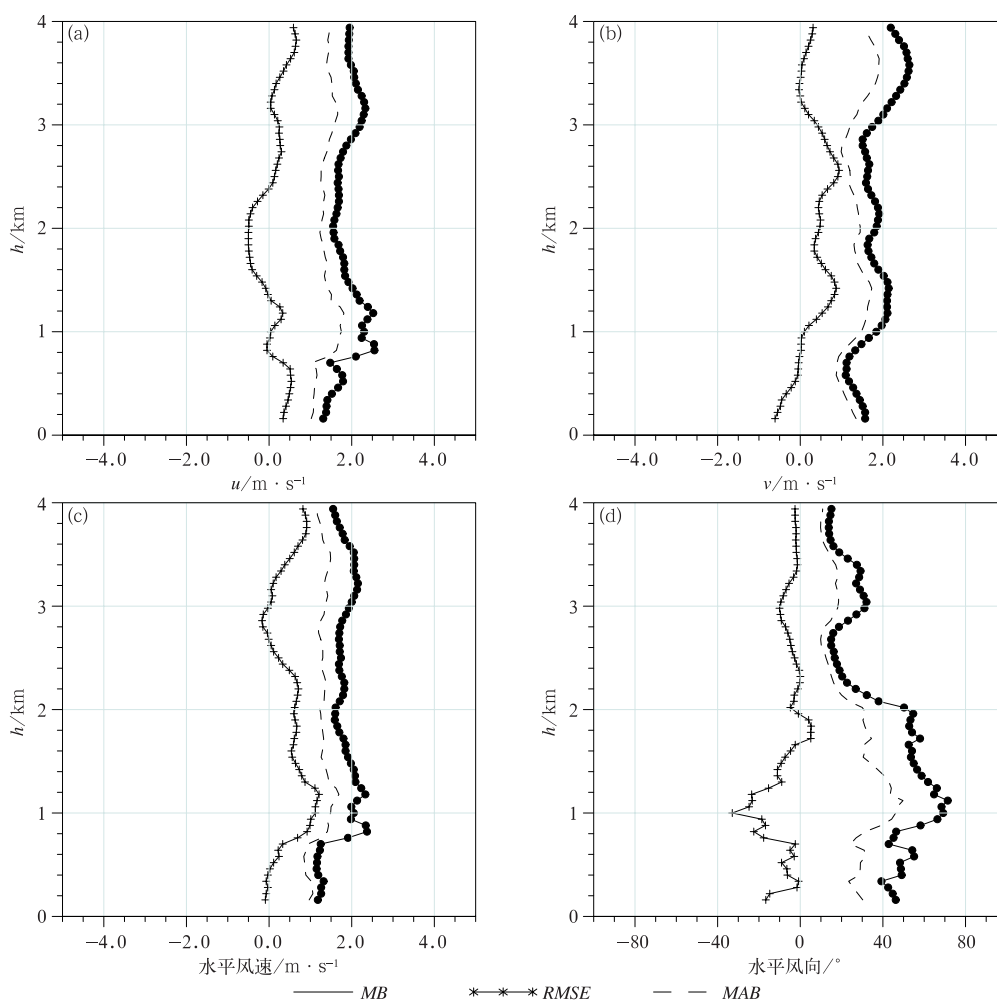


图 2 宝山探空测风资料与分析资料对比统计曲线

(a) u 分量, (b) v 分量, (c) 水平风速, (d) 水平风向

Fig. 2 The comparison of statistics profile between rawinsonde and analysis

(a) u , (b) v , (c) horizontal velocity, (d) horizontal wind direction

从探空的偏差与均方根误差曲线来看,夏季午后的探空观测与分析资料的风速廓线较为接近。 u 、 v 分量整层偏差在 $-1.0 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 波动,均方根误差在 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近摆动,最大不超过 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且 u 、 v 误差分布范围无明显差异,统计量随高度变化较平滑。风向差异主要表现在 2 km 以下, 1 km 处为风向偏差最大值, $1 \sim 2 \text{ km}$ 绝对偏差与均方根误差间距较大,可见该高度区间内资料离散度较大, 2 km 以上风向偏差接近 0 。从总的统计结果来看(表 1),探空与分析资料吻合较好,风速表

现为弱正偏差($0.48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),均方根误差 $1.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向偏差为 -6.65° ,绝对偏差 24.3° 。

由此可见,分析资料的测风数据可以反映一定程度的真实风场。

2.2 分析资料与风廓线雷达资料比较

从总的统计结果来看(表 1),风廓线资料的风速表现为弱负偏差,仅 $-0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误差在 $2.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,略高于探空资料。

图 3a 和 3b 是风廓线雷达与分析资料的对比散

点图,以风廓线雷达的风速为 x 坐标,分析资料的风速为 y 坐标。其中图 3a 为 u 分量,图 3b 为 v 分量。从图 3 来看,风廓线资料的大部分数据分布在对角线周围,呈纺锤状,部分散点落在两侧距离对角线较远的区域。在 u 分量的散点图 3a 上,大部分散点落在图的右上部分,可见 u 分量以西风为主。 v 分量散点图 3b 上,分布在对角线右下的三角形区域内散点数量明显多于左上三角形区域,可见风廓线

资料的 v 分量有较分析资料偏大的趋势。

图 4a~4d 是根据风廓线雷达与分析资料对比统计后点绘的在各个层次上的偏差与均方根误差曲线图。为确保比较的客观性,图中统计数据的样本只采用 2014 年 6 月每日 14 时规定高度层上的风廓线雷达观测。从图中可见绝对偏差与均方根误差廓线几乎平行,两者间距几乎不变,可见资料离散度在 4 km 以下较为接近。

表 1 上海组网边界层风廓线雷达 (PRFL) 以及宝山探空 (RAOB) 测风资料
与分析资料对比统计量

Table 1 Comparison of statistics between wind profiler network in Shanghai
and rawinsonde at Baoshan and analysis data

	$u/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		水平风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		水平风向/ $^{\circ}$	
	MB	RMSE	MB	RMSE	MB	RMSE	MB	RMSE
RAOB	0.11	1.90	0.30	1.86	0.48	1.78	-6.65	45.09
PRFL	-0.35	3.01	0.62	2.97	-0.14	2.72	-4.28	41.53

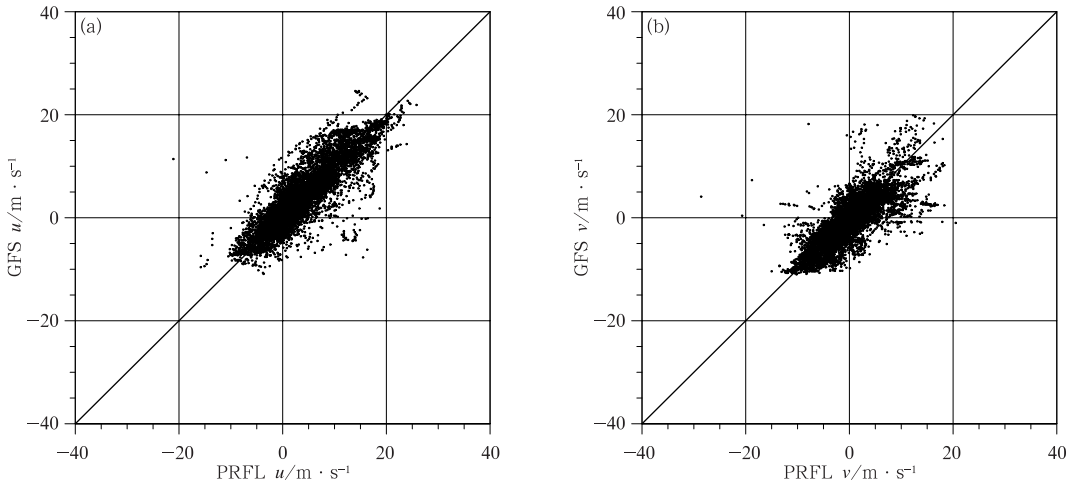


图 3 上海组网边界层风廓线雷达数据 (PRFL) 与分析资料 (GFS) u 分量 (a) 和 v 分量 (b) 对比散点图
Fig. 3 Comparison of u (a), v (b) components between profiler and analysis

东西方向上 (u 风分量, 偏西风为正, 图 4a), 偏差随高度不断递减, 即偏东风方向分量偏差逐渐增加, 从地面 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右减至 3.5 km 处 $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的最小值, 在 1.6 km 附近偏差转为负号。在 2 km 以下, 与探空廓线非常接近 (图 2)。均方根误差的波动较大, 但波动中心轴基本与 y 轴平行, 在 3 km 以下, 波动范围稳定在 $2.5 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 3.5 km 处出现与偏差极值对应的均方根误差极大值。

南北方向上 (v 风分量, 偏南风为正, 图 4b), 偏差随高度逐渐增加, 即偏南风方向分量偏差逐渐增

加, 从 $-0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右增至不到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 至 0.75 km 偏差转为正号。从地面至 2.7 km 附近与探空廓线都非常接近。均方根误差廓线也随着高度左右摆动, 但波动幅度比东西方向小, 在 1 km 以上波动中心值逐渐增加, 与偏差廓线几乎平行, 表明 1~4 km 离散程度几乎不变。

从风速的垂直廓线图 4c 来看, 从地面起, 偏差逐渐增加, 至 0.9 km 附近达到最大值, 约 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 往上偏差递减, 至 3 km 处递减至 $-0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 3~4 km 偏差保持在这一水平小幅波动。均方根误差在 2.6 km 以下较变化较小, 2.6 km 以上

波动较大,整层在 $2.0 \sim 3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从风向的垂直廓线图 4d 来看,风向整体表现为负偏差,负偏差大值区出现在 $1 \sim 1.5 \text{ km}$,可达 -25° ,其他高度层间偏差仅在 $0 \sim -10^\circ$ 。风向的均方根误差表现为低层较大,从 1.4 km 开始向上逐渐递减,最大值可达 60° 。风廓线风向的均方根误差

较明显,总体均方根误差为 45.09° ,然而探空在风向的表现上误差也较大,总体均方根误差在 41.53° ,尤其在 2 km 以下,风向均方根误差均超过了 40° ,且平均偏差与均方根误差的最大值都出现在 1 km 附近,两者的风向误差垂直分布类似,因此风向上的较大误差可能是由于参照资料本身的系统误差造成的。

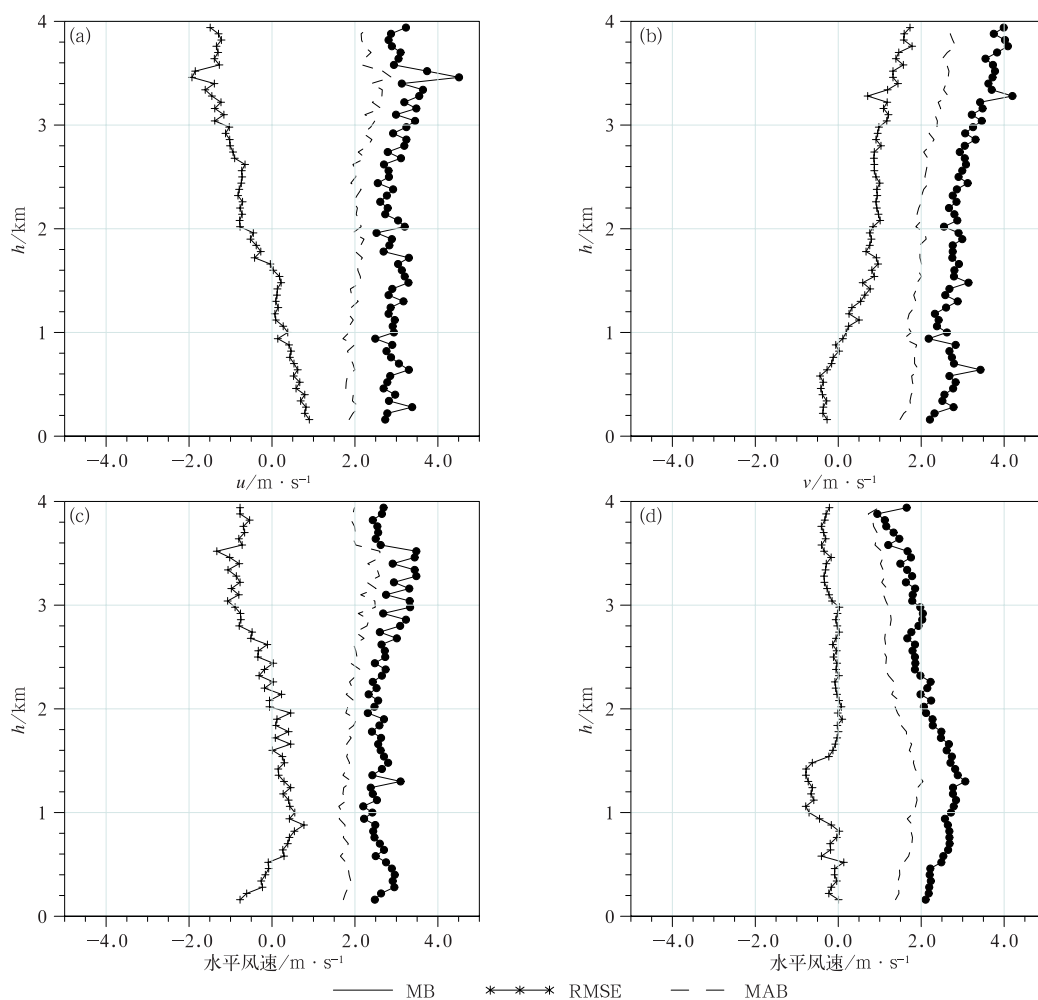


图 4 同图 2,但为上海组网边界层风廓线雷达数据测风资料与分析资料对比

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for comparison of statistics between profiler data and analysis data

图 5a~5b 是风廓线雷达与分析资料之差的概率分布情况。其中图 5a 为 u 风分量偏差分布,5b 为 v 风分量偏差分布。暖色柱代表正偏差,冷色柱代表负偏差,偏差绝对值越小,色柱颜色越浅。从概率分布图上可知,风廓线雷达的 u 、 v 分量与分析资料之差的分布均呈正态分布,频率最大值出现在 0 附近,随着差值绝对值增加,出现概率降低。

为了确保对比资料的可靠性,上文只对有加解密探空的时次,即 14 时的两种资料分别进行了比对。

风廓线雷达可以提供全天候的测风资料,午后时次的测风性能在全天候的观测中处于哪一个位置未可知。因此对有分析资料的四个时次,分别统计了风廓线测风数据与分析资料结果间的差异。图 6a~6b 分别是 08、14、20 和 02 四个时次下风廓线雷达与分析资料对比统计量柱状分布。由图 6 可知,四个时次的均方根误差与平均偏差均较为接近。 u 分量的平均偏差在 08 时表现为最大负偏差,约 $-0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其均方根误差大值则出现在 14 与 02 时, v

分量上四个时次的平均偏差更为接近,均方根误差最大值出现在 14 时,约 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。平均偏差的最大值与最小值之差约 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误差的

最大值与最小值之差约 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可以认为 14 时的统计结果可以代表风廓线雷达的一般情况。

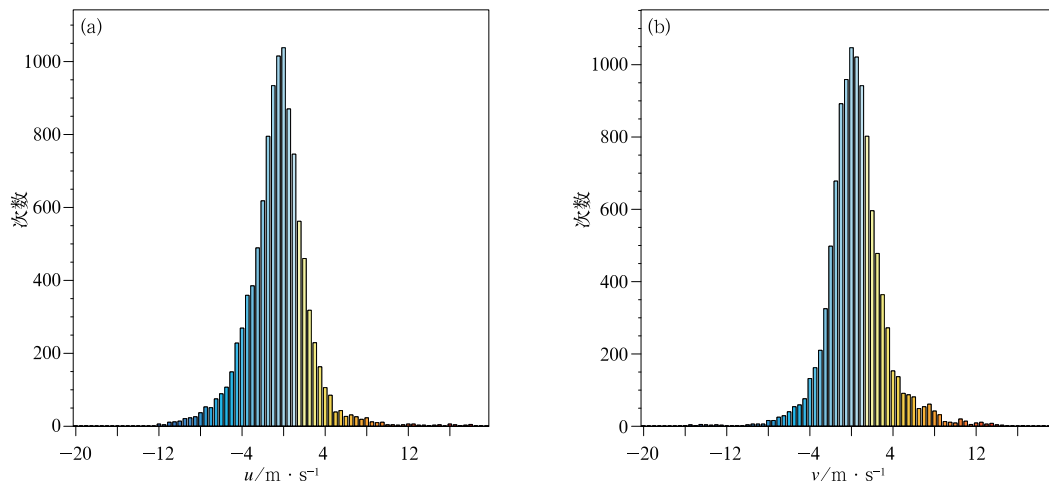


图 5 上海组网边界层风廓线雷达数据与分析资料 u 分量(a)和 v 分量(b)对比概率分布

Fig. 5 The comparison of probabilities of u (a), v (b) between profiler data and analysis data

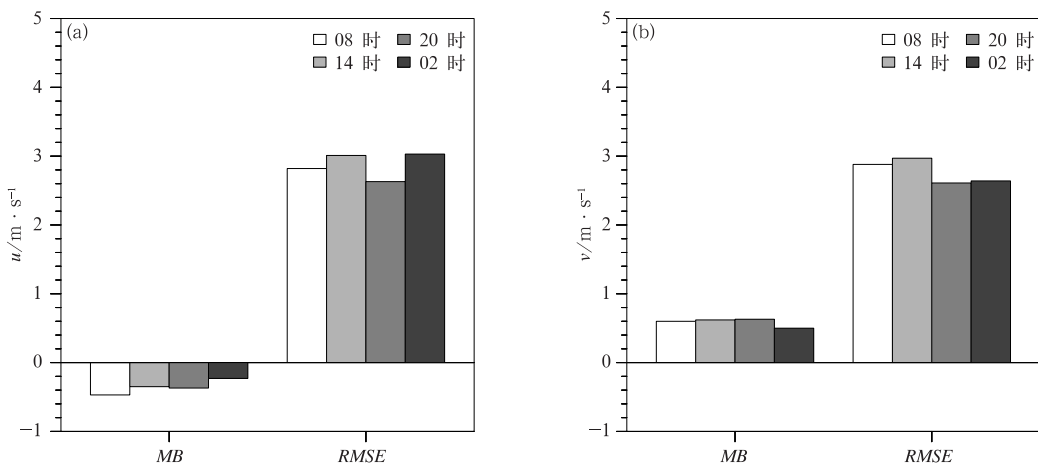


图 6 不同时段上海组网边界层风廓线雷达数据与分析

资料 u 分量(a)和 v 分量(b)对比统计量柱状图

Fig. 6 Comparison of statistics of u (a) and v (b) between profiler data and analysis data at different time

3 结论和讨论

本研究利用 NCEP 全球分析资料,对比了上海组网边界层风廓线雷达在 2014 年 6 月的测风数据,评估上海组网风廓线雷达水平风数据的可用性。

为了确保分析资料的合理性,首先利用研究时段内未被同化的加密探空资料对分析场进行检验:探空水平风速与分析资料的总体平均偏差在 0.48

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误差在 $1.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;风向平均偏差在 -6.65° ,各分量廓线无剧烈波动。表明分析资料与探空观测符合较好,在上海地区上空具有一定代表性,可以用来检验组网风廓线雷达水平风资料。

在试验期间,风廓线雷达水平风速与分析资料的总体平均偏差在 $-0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误差在 $2.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向平均偏差在 -4.28° ,均方根误差在 45.09° 。特征表现为:

(1)东西方向上负偏差,南北方向上正偏差,两

个方向上偏差均有随高度向单一方向缓慢递增的趋势,均方根误差随高度左右波动。

(2)风速在高层(2.6 km)以上出现较大偏差;风向在低层,尤其是1.0~1.5 km偏差与均方根误差较大。

(3)均方根误差在高层均出现了不同程度的锯齿状摆动,这是由风廓线雷达(尤其是LAP3000型)在高层缺失数据较多,且高层的大误差观测点较多导致的。

(4) u 、 v 分量的偏差概率分布均符合正态分布,且在有分析资料的四个时次表现差异不大,可以认为14时的误差分析有一定代表性。

与探空的统计廓线相比,风廓线雷达的 u 、 v 分量及风速廓线的误差略大;而在风向廓线上,两种资料的均方根误差均较大,分别为 45.09° 与 41.53° ,且误差大区均集中在2 km以下,两种资料的廓线非常接近。可见试验期间风廓线雷达观测到的水平风资料可靠性接近探空观测。因探空资料为公认的质量较好的高空观测数据之一,并广泛用于多种全球模式与区域模式的资料同化中,产生了明显的正效果,因此认为与之水平接近的资料也具有一定可用性。参考其他研究工作:

Ishihara等(2006)对比了2001年6—7月风廓线组网与数据获取系统(WINDAS)测得的水平风 u 分量与日本中尺度数值模式MSM的模拟结果,并用同样的方法比对了探空测风数据,发现两种观测资料的偏差与均方根误差廓线十分接近,说明风廓线资料的准确性与探空测风资料水平相当。其水平风 u 分量平均偏差在 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,700 hPa以下的均方根误差在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。

Pauley等(1994)比较了一部位于美国伊利诺斯州的VHF风廓线雷达观测与当地业务区域数值模式NMC模拟的测风数据,其标准差在 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Scharfer等(2003)比较了热带太平洋上4部VHF风廓线雷达与NCEP-NCAR再分析资料的水平风数据,发现位于圣诞岛上的雷达与再分析资料最为接近,在2 km高度的 u 和 v 分量标准差分别为2.5和 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

张旭斌等(2015)比较了广东地区13部风廓线雷达的观测数据与ECMWF再分析场,其平均值与标准差分别为0.13与 $2.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

以上对比分析结果与本研究所得到的统计结果(水平风速总体平均偏差 $-0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误

差 $2.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)相当。结合与探空资料的对比和与其他研究结果的对比可见,本研究中上海组网边界层风廓线的夏季测风数据资料吻合前人的研究成果,有较高的可用性。

致谢:上海市气象局气象信息与技术支持中心陈浩君和孙娟提供了本文分析研究使用的风廓线雷达探测资料,上海中心气象台漆梁波提供了悉心指导与修改建议,在此作者表示衷心感谢。

参考文献

- 戴泽军,宇如聪,李建,等. 2011. 三套再分析资料的中国夏季降水日变化特征. 气象, 01: 21-30.
- 董丽萍,吴蕾,王令,等. 2014. 风廓线雷达组网资料初步对比分析. 气象, 40(9): 1145-1151.
- 葛晶晶,钟玮,杜楠,等. 2008. 地形影响下四川暴雨的数值模拟分析. 气象科学, 28(2): 176-183.
- 顾映欣,陶祖钰. 1991. UHF多普勒风廓线雷达资料的初步分析和应用. 气象, 01: 29-34.
- 胡明宝,李妙英. 2010. 风廓线雷达的发展与现状. 气象科学, 30(5): 724-729.
- 刘莲,王迎春,陈明轩. 2015. 京津冀一次飑线过程的精细时空演变特征分析. 气象, 12: 1433-1446.
- 邵德民,吴志根. 2001. 上海的LAP-3000大气风廓线雷达. 中国气象局监测网络司、中国气象学会秘书处. 首届气象仪器与观测技术交流和研讨会学术论文集. 中国气象局监测网络司、中国气象学会秘书处: 1.
- 孙旭映,韩晖,段海霞,等. 2008. 风廓线雷达与气球测风资料的对比分析. 干旱气象, 26(3): 48-52.
- 万蓉,周志敏,崔春光,等. 2011. 风廓线雷达资料与探空资料的对比分析. 暴雨灾害, 30(2): 130-136.
- 汪学渊,李栋,任雍等. 2013. 风廓线雷达资料在台风苏拉登陆过程中的应用初探. 气象, 39(11): 1431-1436.
- 王緬,李伟,陈永清,等. 2011. L波段探空系统高空风平滑计算方法探讨. 气象, 37(1): 85-91.
- 王欣,卞林根,彭浩,等. 2005. 风廓线雷达系统探测试验与应用. 应用气象学报, 63(5): 693-698.
- 吴志根,沈利峰. 2010. 边界层风廓线雷达应用中存在的若干问题. 高原气象, 29(3): 801-809.
- 吴志根,徐同,丁若洋,等. 2013. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析. 气象, 39(3): 370-376.
- 徐同,陈葆德,吴志根,等. 2012. 上海地区风廓线雷达探测资料质量初析. 大气科学研究与应用, (2012): 1-10.
- 易仕明,陈奕隆. 1988. 观测高空风的新装备——风廓线雷达. 气象, 14(11): 3-8.
- 袁松,程华,王东勇,等. 2012. 模式再分析与实际探空资料的对比分析. 气象科学, 32(1): 62-67.
- 翟亮. 2008. 北京奥运期间一次暴雨过程风廓线资料特征. 气象, 34(S1): 26-31.
- 张旭斌,万齐林,薛纪善等. 2015. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用. 气象学报, 73(1): 159-176.

- 赵佳莹,徐海明. 2014. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析. 气候与环境研究, 19(5):587-600.
- 赵天保,艾丽坤,冯锦明. 2004. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较. 气候与环境研究, 9(2):278-294.
- 郑永光,张春喜,陈炯等. 2007. 用 NCEP 资料分析华北暖季对流性天气的气候背景. 北京大学学报(自然科学版), 43(5):600-608.
- Ishihara Masahito, Kato Yoshio, Abo Toshihiro, et al. 2006. Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency. J Meteor Soc Japan, 84(6):1085-1096.
- Pauley P M, Creasey R L, et al, Clark W L. 1994. Comparisons of horizontal winds measured by opposing beams with the Flatland ST radar and between Flatland measurements and NMC analyses. J Atmos Oceanic Technol, 1:37-49.
- Schafer R, Avery S K, Gage K S. 2003. A comparison of VHF wind profiler observations and the NCEP-NCAR reanalysis over the Tropical Pacific. J Appl Meteor, 42:873-889.
- Silva V B S, Kousky V E, Higgins R W. 2011. Daily precipitation statistics for south america: An intercomparison between NCEP reanalyses and observations. J Hydrometeor, 12:101-117.
- Weber B L, Wuertz D B. 1990a. Comparison of Rawinsonde and wind profiler radar measurements. J Atmos Oceanic Technol, 7:157-174.
- Weber B L, Wuertz D B, Strauch R G, et al. 1990b. Preliminary Evaluation of the First NOAA Demonstration Network Wind Profiler. J Atmos Oceanic Technol, 7:909-918.
- Wu W S, Purser R J, Parrish D F. 2002. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. Mon Wea Rev, 130:2905-2916.
- Wu Renguang, Xie Shangping. 2003. One equatorial Pacific surface wind changes around 1997: NCEP/NCAR reanalysis versus COADS observation. J Climate, (1):167-173.