

朱 苹,王成刚,严家德,等.北京城市复杂下垫面条件下三种边界层测风资料对比[J].干旱气象,2018,36(5):794-801, [ZHU Ping, WANG Chenggang, YAN Jiade, et al. Comparison of Three Kinds of Wind Data in Boundary Layers Under Complex Surface Conditions in Beijing[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(5):794-801], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0794

北京城市复杂下垫面条件下三种 边界层测风资料对比

朱 苹¹,王成刚¹,严家德¹,李 炬²

(1.南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044;
2.中国气象局北京城市气象研究所,北京 100089)

摘 要:利用2016年8月28日至9月2日北京市朝阳区气象观测站激光测风雷达、风廓线雷达和GPS探空仪同步观测数据,对比分析三种测风仪在城市复杂下垫面条件下边界层不同高度处的测风性能。结果表明:(1)激光测风雷达与GPS探空仪测风结果具有较好一致性,风速、风向的相关系数分别为0.66~0.96、0.71~0.98,其中风速平均绝对误差小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向误差在 20° 之内。(2)风廓线雷达资料的精度相对较差,与GPS探空仪的风速、风向相关系数分别为0.66~0.91、0.55~0.86,误差随高度呈现先减后增的垂直分布特征。其中,400~1000 m高度范围两种资料的吻合度最高,相关系数在0.80以上,为仪器最佳测量范围;此外,风廓线雷达的风速整体高于GPS探空仪,两者最大偏差可达 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,风向平均误差最大可达 30° 。(3)GPS探空仪的工作方式及测量结果也存在不足,一是观测频次较低,难以详细、精准地描述边界层风场结构的变化过程;二是当存在垂直风切变时,探测初期具有明显滞后性,由当前状态转变为真实的风场示踪物需要一定时间。

关键词:北京城市;复杂下垫面;边界层测风;资料对比

文章编号:1006-7639(2018)05-0794-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0794

中图分类号:P412.16

文献标志码:A

引 言

城市边界层风场研究是城市气候学一个重要分支。城市下垫面独有的动力、热力特征,使其上空的风场特性与乡村大为不同。OKE等^[1]提出,城市边界层在垂直方向上可分为城市冠层、粗糙子层和惯性子层3层。因城市冠层高度较低,以及测风仪器的架设及维护难度相对较小,针对这一范围内风场特征的研究相对成熟^[2-4],但有关粗糙子层和惯性子层内风场的研究还相对较少,主要原因在于缺乏观测手段和丰富资料。

为了获取更高精度、更精细、更全面的城市边界层风场数据,目前应用的新型测风仪器主要有:(1)GPS探空仪。测量系统以气球为示踪物,利用GPS卫星观测网或L波段雷达确定气球位置,进而获取

不同时刻对应高度上的风向、风速。GPS探空测风系统测距、测角精度较高,可用于气象雷达试验测距、测角精度的评定^[5]。姚雯等^[6]利用大量资料对比了GPS测风系统与L波段测风系统的差异,发现两个系统在边界层内的测量结果有较高的一致性。(2)风廓线雷达(wind profile radar, WPR)。以大气湍流为示踪物,通过回波信号频率的变化获取三维风场信息,能够提供以风场为主的多种数据产品,包括水平风廓线、垂直风速、湍流、大气稳定度等。该雷达具有时空分辨率高、无需人值守、可提供连续观测资料等优势,在边界层风场研究中应用广泛^[7-10]。然而,该仪器易受杂波和晴雨、温压等影响,其资料的可靠性一直是研究的热点^[11-15]。(3)多普勒激光雷达(Lidar)。该仪器通过获取颗粒物后向散射信号的多普勒频移来反演低空风场三维信

收稿日期:2018-06-15;改回日期:2018-08-16

基金项目:国家重点研发项目(SQ2016ZY01002213)、国家国际科技合作专项项目(2015DFA20870)和国家自然科学基金(NSFC41505136)共同资助

作者简介:朱苹(1995—),女,硕士研究生,主要从事边界层观测与模拟。E-mail: ping.zhu.chn@nuist.edu.cn.

通信作者:王成刚(1978—),男,副教授,主要从事城市边界层的观测与模拟。E-mail: wcg@nuist.edu.cn.

息,具有抗干扰能力强、资料时空分辨率高等优点,广泛应用于测量风切变、大气湍流、飞机尾流、阵风以及重力波等^[16]。

鉴于上述三种仪器工作原理及工作方式的差异,开展了三种仪器观测结果的对比验证研究。KUMER等^[17]对比分析了挪威 Sola 地区激光测风雷达和 GPS 探空仪的测量结果,发现两种资料的相关系数在 0.95 以上。孙旭映等^[18]指出,风廓线仪探测的风向、风速与气球探测值在 200 m 以上具有很好的相关性,但风廓线雷达在最大探测高度处偏差很大。韩彦霞等^[19]对比分析了苏州东山边界层风廓线雷达与 GPS 探空仪的测风资料,发现在边界层范围内两种仪器得到的风速平均误差为 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。范琪等^[20]对比了不同天气类型下激光测风雷达和风廓线雷达与探空系统观测资料,发现在晴、阴和雾霾天条件下,激光测风雷达的测风精度优于风廓线雷达,其误差是风廓线雷达的一半,且两种雷达测风精度均受风速变化影响。

针对上述三种资料的对比分析多集中在地形平坦、下垫面较为均一的区域^[21-24],而在城市复杂下垫面条件下,三种观测资料的可靠性还有待进一步检验。鉴于此,本文利用 2016 年夏季北京市朝阳区气象观测站上述三种仪器的 56 组同步观测资料,对比分析了城市下垫面条件下三种仪器在垂直方向上的测风精度,这对风场探测的误差订正,提高探测仪器对风场的反映能力,以及进一步探索城市边界层结构的变化、城市通风廊道的构建及污染物的输送等具有重要意义。

1 观测试验及方法

1.1 试验介绍

2016 年 8 月 28 日至 9 月 2 日南京信息工程大学联合中国气象局北京城市气象研究所,在北京市

朝阳区气象局观测场对三种观测仪器进行对比试验。观测点周边 2 km 范围内下垫面类型多样,其中建筑用地占 49.4%,绿地占 32.1%,裸地占 13.2%,水体占 5.3%,且建筑物密度、高度分布不均匀,属典型的复杂下垫面。

对比试验所用的测风仪器有:多普勒激光测风雷达、边界层风廓线雷达和 GPS 探空仪,三种仪器性能参数详见表 1。激光雷达资料的时间分辨率 120 s,最大探测高度约 1500 m。风廓线雷达资料的时间频率为 360 s,且在不同工作模式下探测高度范围不同。其中,低模式探测高度范围为 50 ~ 450 m,数据垂直分辨率为 50 m;中模式探测高度范围为 500 ~ 950 m,垂直分辨率 50 m;高模式探测高度范围为 1000 ~ 3000 m,垂直分辨率为 100 m。GPS 探空数据每天 8 组(02:00—23:00,北京时,下同,每 3 h 一组),每秒返回一个数据,气球平均飞升速度约 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,探测高度大于 5 km。由于三种仪器不存在信号干扰,在同一位置进行同步观测试验共获取 56 组资料。

另外,还使用北京市朝阳区气象观测站(39.95°N、116.50°E)同期的气温、风向、风速等逐时观测资料。

1.2 资料处理

为了对比三种资料的客观性、准确性,对资料进行了时间和空间的同步处理。

(1)时间的同步处理:三种观测资料中,GPS 探空系统的释放频次较低,探空过程时间较长,且与其他两种资料的观测时间不严格一致,故采用时间平移法来获取最为邻近的观测资料^[25],以确保三种资料有较好的时间一致性。例如,GPS 探空仪在 1500 m 内的探测时间为 08:00—08:12,则选用风廓线雷达 08:00—08:06 低空段和 08:06—08:12 高空段的拼接资料与其对比,激光雷达资料的选用类似。

表 1 三种边界层测风仪器的参数

Tab. 1 Parameters of three kind of observing instruments of wind in the boundary layer

参 数	多普勒激光测风雷达	边界层风廓线雷达	GPS 探空仪
仪器型号	Windcube 100S	Airda3000	GPS-BL
生产厂家	Leosphere SAS of France	中国北京特博兰电子设备有限公司	中国南京栢望气象科技有限公司
测量原理	多普勒频移测速	多普勒频移测速	GPS 定位测风
工作频率/MHz	0.02	1290	400
探测高度/m	50 ~ 1500	50 ~ 3000	≤10 000
风速精度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	≤0.5	≤1.5	≤0.5
风向精度/(°)	≤5	≤10	≤5
高度分辨率/m	15	50 或 100	5
时间分辨率/s	120	360	1

(2)空间的同步处理:探空气球在上升过程中会随水平风飘移,偏离释放点。统计气球上升到500、1000、1500 m 高度处的偏移距离分别为 746.77 ± 454.69 、 1873.01 ± 1185.25 、 3225.27 ± 2288.28 m, 偏离程度较小。根据大气的连续性特征,在局地范围、短时间内,可近似认为相同高度上的风场一致。在垂直方向上,由于三种资料的垂直分辨率差异较大,风廓线雷达数据的分辨率较低,需对激光测风雷达资料和 GPS 探空资料进行平均,以得到与风廓线雷达资料相同高度上对应数据,从而保证三种资料有较好的空间一致性。

1.3 方法

通过有效样本比率(P_e)、相关系数(R)、平均绝对误差(MAE)和平均误差(ME),探讨三种测风资料的可靠性和稳定性,进而分析影响两种雷达测风精度的原因。

$$P_e = \frac{N_e}{N_t} \times 100\% \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (3)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (4)$$

式中: N_e 为有效样本数,即 Lidar、WPR 和 GPS 的水平风速差小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、风向差小于 20° 时的样本个数, N_t 为总样本数; x_i 为两种雷达的测量值, \bar{x} 为两种雷达的测量平均值; y_i 为 GPS 探空仪的测量值, \bar{y} 为测量平均值, n 为数据个数。

2 三种测风资料的对比

2.1 气象背景分析

图1是试验期间北京朝阳区观测站气温、风向和风速的日变化。可以看出,试验期间北京朝阳区气温变化较为剧烈($26.71 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3.13$),日最高气温差大于 $6 \text{ }^\circ\text{C}$,气温剧烈变化时段出现在9月1日以后;8月28—30日,平均风速较小,为 $1.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,31日受台风影响,最大小时风速约 $5.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合形势场,发现8月28—30日试验地处在高压脊控制下,天气晴朗,风向杂乱,无降水;8月31日至9月1日,受台风“南川”北上登陆的影响,风向转为西北向,风速快速增大,瞬时风速可达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。受其影响,9月1日后气温明显降低。

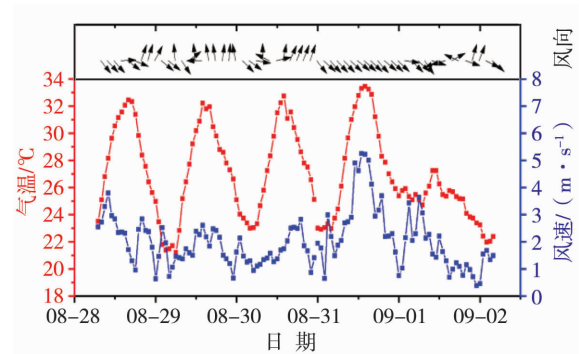


图1 2016年8月28日至9月2日北京朝阳区气象观测站温度、风向、风速日变化

Fig. 1 Diurnal changes of temperature, wind direction and wind speed at Chaoyang station of Beijing from August 28 to September 2, 2016

2.2 参数统计对比

表2是观测期间北京朝阳区激光雷达、风廓线雷达与GPS探空仪不同高度上样本数及相关性等参数统计。可以看出,激光雷达总样本数及有效样本比率均表现为随着高度升高先增后减的特征。其中,总样本数在400~500 m处最大,为333个;有效样本比率在700 m处最大,为96.1%。形成这一垂直分布特征的主要原因是,探空气球由静止状态转变为真实的风场示踪物,需一定的(反应)时间,故在低层GPS探空仪测量的风向、风速与Lidar差别较大,有效样本比率偏低。此外,由于低层存在探测盲区,Lidar的测量误差通常较大,对总样本数、有效样本比率也有一定影响;探测到一定高度后,随着高度的增加,Lidar回波信号逐渐减弱,噪声污染使得数据丢失率增多,故1000 m以上总样本数、有效样本比率明显减少。相关性统计结果表明,Lidar与GPS探空仪探测的风向、风速呈显著正相关关系,风向相关系数为0.66~0.96,风速为0.71~0.98,且随高度的分布也呈先增后减的变化特征,在600 m高度处,风向、风速的相关性最大,分别为0.96和0.98。

WPR统计结果类似于激光雷达,二者差异主要体现在:WPR的总样本数及有效样本比率(最大值分别为107和84.3%)明显少于激光雷达,这主要与WPR的工作方式及资料的垂直分辨率有关;WPR与GPS探空仪探测的风向、风速的相关性较激光雷达略差,风向的相关系数为0.55~0.86,风速为0.66~0.91。400~1000 m高度范围内,有效样本比率和风速、风向相关系数均大于0.80,为WPR的最佳探测范围。这主要是低层建筑物和地形的遮挡以及高层信号的衰减,使得低层和高层测风信息误差较大,而中层受干扰相对较少,故数据准确度较高。

表 2 观测期间激光雷达、风廓线雷达与 GPS 探空仪不同高度上的参数统计
Tab.2 Statistics of parameters of Lidar, wind profile radar and GPS radiosonde over different altitudes at Chaoyang station of Beijing from August 28 to September 2, 2016

高度/m	Lidar				WPR			
	N_t	$P_e/\%$	R_s	R_d	N_t	$P_e/\%$	R_s	R_d
100	322	89.2	0.85	0.81	93	77.1	0.75	0.71
200	326	93.3	0.89	0.89	96	79.3	0.79	0.74
300	331	94.2	0.95	0.93	101	81.2	0.83	0.75
400	333	94.5	0.96	0.91	107	82.2	0.81	0.81
500	333	95.2	0.96	0.93	105	81.2	0.87	0.83
600	324	95.6	0.98	0.96	106	83.6	0.91	0.86
700	330	96.1	0.97	0.94	107	84.1	0.89	0.84
800	311	95.5	0.92	0.90	100	84.3	0.86	0.86
900	308	94.7	0.92	0.89	98	83.1	0.88	0.81
1000	310	94.2	0.91	0.81	94	82.2	0.84	0.81
1100	306	93.6	0.86	0.76	54*	80.6	0.76	0.7
1200	279	92.2	0.84	0.8	54*	78.3	0.72	0.67
1300	289	92.0	0.77	0.76	53*	72.3	0.68	0.62
1400	267	90.4	0.73	0.7	52*	70.4	0.66	0.55
1500	233	87.2	0.71	0.66	52*	68.6	0.67	0.55

注: R_s (风速相关系数)、 R_d (风向相关系数)均通过了 0.01 的信度检验;*表示高度 1000 m 以上风廓线雷达采用高模式方式。

2.3 水平风速的误差特征

图 2 是观测期间激光测风雷达、风廓线雷达相对于 GPS 探空仪水平风速的平均误差和平均绝对误差随高度的分布。可以看出,在 1500 m 范围内,Lidar 与 GPS 探空仪探测的水平风速平均绝对误差均小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且随高度呈先减后增的变化趋势,200 m 及以下和 1400 m 及以上平均绝对误差相对略大,为 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;400 ~ 1200 m 范围的绝对误差不足 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [图 2(a)]。Lidar 与 GPS 探空仪的水平风速平均误差随高度呈递减趋势,300 m 及以下前者的水平风速较后者偏大,而 400 m 以上则偏小,且二者平均误差在 200 m 及以下和 1200 m 及以上相对较大,而 400 ~ 1100 m 内相对较小[图 2(c)]。上述表明,Lidar 与 GPS 探空仪的探测结果在中层最为接近,1000 m 以上由于探空气球飞行惯性作用及两种仪器观测位置的差异,使得高层 Lidar 的风速探测值通常低于 GPS 探空仪。

由图 2(b)和图 2(d)可见,WPR 水平风速与 GPS 探空仪探测值的平均绝对误差随高度呈先减后增的垂直分布特征,拐点出现在 400 m 高度,误差最小为 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,400 m 以下由于观测盲区及工作方

式差异,两者的平均绝对误差最大可达 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而 800 m 以上随着 WPR 回波信号的减弱,平均绝对误差开始快速增大,最大可达 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;WPR 与 GPS 探空仪的平均误差在绝大多数高度处均大于零,表明 WPR 的风速测量值较 GPS 探空仪整体偏大。其中,600 m 范围内平均误差相对较小,误差值在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近波动;800 m 以上,由于 WPR 回波信号减弱,平均误差随着高度迅速增加,1200 m 以上平均误差均大于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.4 水平风向的误差特征

图 3 是观测期间激光测风雷达、风廓线雷达相对于 GPS 探空仪水平风向的平均绝对误差和平均绝对误差随高度的分布。由图 3(a)可见,Lidar 探测的水平风向与 GPS 探空仪探测值的平均绝对误差均小于 20° ,误差最大值(20°)出现在近地面,之后随高度递减,在 600 m 处减至 3° 左右;600 ~ 1100 m 范围,风向平均绝对误差在 5° 附近波动;此后,随高度增加误差逐渐增大。由图 3(c)可见,Lidar 与 GPS 探空仪水平风向的平均误差随高度呈“Z”型分布,低层平均误差相对较大,最大误差可达 15° 左右;至 400 m,平均误差减至 0° 左右;之后随高度增加,平

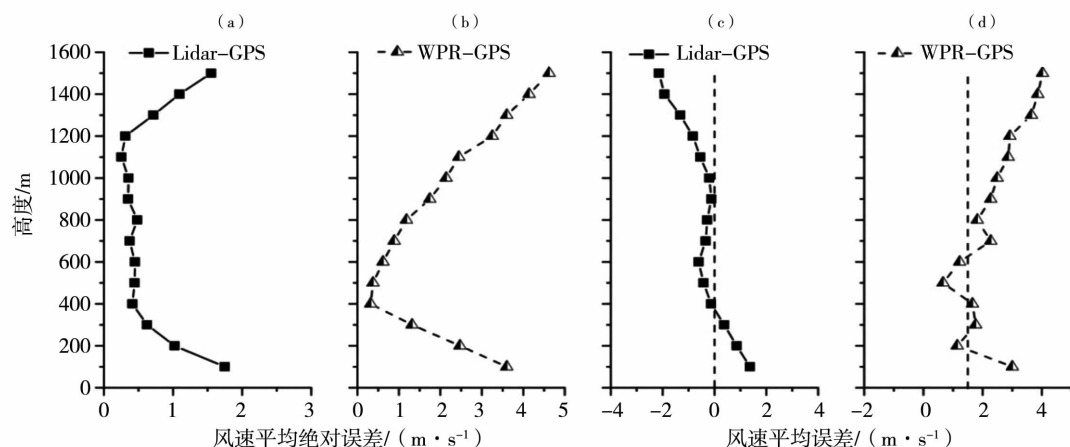


图2 2016年8月28日至9月2日激光雷达(a,c)、风廓线雷达(b,d)与GPS探空仪的水平风速平均绝对误差(a,b)和平均误差(c,d)

Fig. 2 The average absolute error (a, b) and average error (c, d) of horizontal wind speed between Lidar (a, c), WPR (b, d) and GPS radiosonde from August 28 to September 2, 2016

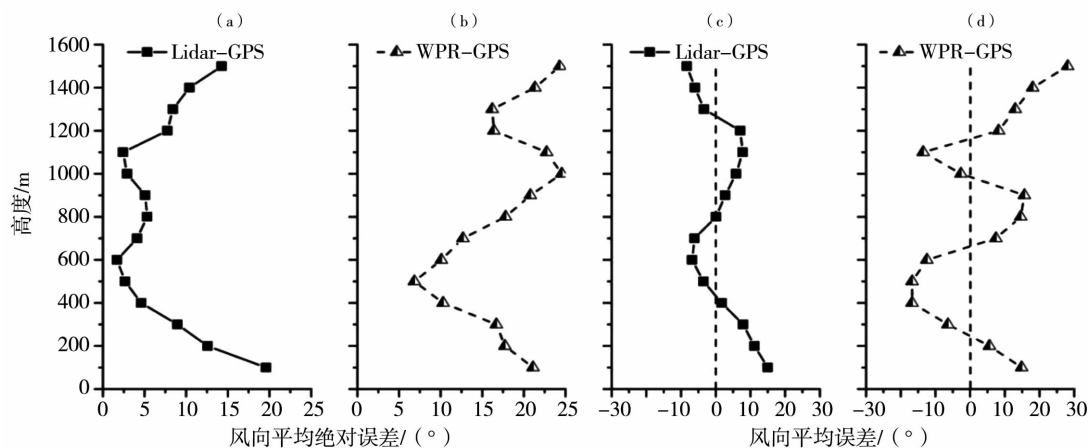


图3 2016年8月28日至9月2日激光雷达(a,c)、风廓线雷达(b,d)与GPS探空仪的水平风向平均绝对误差(a,b)和平均误差(c,d)

Fig. 3 The average absolute error (a, b) and average error (c, d) of horizontal wind direction between Lidar (a, c), WPR (b, d) and GPS radiosonde from August 28 to September 2, 2016

均误差在 0° 附近摆动,变化幅度均在 10° 之内。上述分析表明,Lidar与GPS探空仪的风向探测结果有着较好的一致性。

图3(b)显示,WPR水平风向与GPS探空仪探测值的平均绝对误差随高度呈波状分布,500 m以下范围平均绝对误差由 22° 逐渐减至 7° ;500~1000 m范围,绝对误差随高度快速增加至 25° 左右;此后,绝对误差在 20° 左右摆动。由图3(d)可见,WPR与GPS探空仪探测值水平风向的平均误差随高度也呈波状分布,波动幅度基本为 20° 以内,但1400 m以上,平均误差可达 30° 左右。

2.5 个例分析

当风速较小时,不同仪器测风结果与实际风速相对误差较大,而当风速较大时,相对误差较小。

2016年9月1日,受台风外围系统影响,北京地区高低空风速较大。通过对该日三种探空资料的进一步对比分析,有助于了解这三种测风仪器的性能。从2016年9月1日三种仪器不同时刻的测风廓线(图4)看出,总体而言,三种仪器不同时刻的风速、风向廓线结构有较好的一致性,但细节上也存在一些差异,主要体现在:(1)WPR风速测量值通常比GPS探空仪和Lidar探测值明显偏大,尤其在600 m以上范围,偏差可达 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但后两者测量值差异较小。(2)在垂直方向上,WPR数据存在不连续的特征,即风速呈锯齿状分布、风向摆动大。主要是边界层结构从夜间稳定状态向白天不稳定状态转变过程中,垂直方向上大气湍流表现出明显的非均匀性,导致WPR测量的目标物的大气折射率结构常数

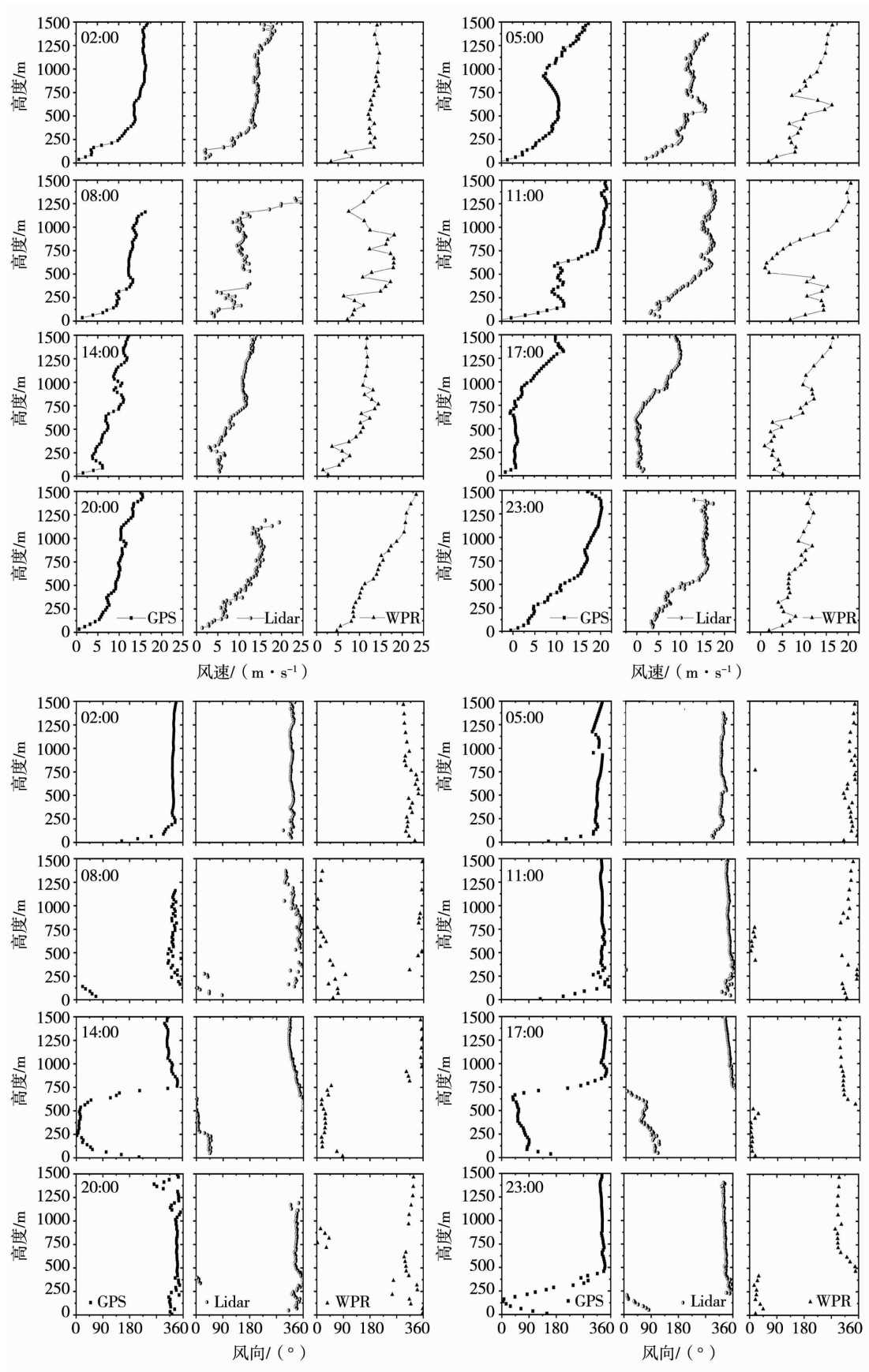


图4 2016年9月1日北京市朝阳区三种探测仪器不同时次的风速、风向廓线

Fig. 4 Profiles of wind speed and wind direction at different times detected by Lidar, WPR and GPS radiosonde at Chaoyang station of Beijing on 1 September 2016

在垂直方向上差异较大。(3)GPS探空仪风速值在近地面总是由 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 值开始,而雷达资料则没有这种特性。这主要是探空气球由静止状态转为风场示踪物需要一定(反应)时间。(4)Lidar、WPR的风向转变较剧烈,而GPS探空仪则较为缓慢且连续。这主要是探空气球在飞行过程中受惯性作用,当垂直方向存在垂直风切变时,风向转变需经历一段时间,而Lidar和WPR的风向测量则依赖于采样空间目标物的移动方向,故风向变化较快。(5)受发射功率小,回波信号易衰减的共同影响,1200 m以上Lidar数据丢失较多。

3 结论与讨论

(1)激光测风雷达与GPS探空仪的水平风向、风速测量结果有很好的-一致性,二者的风速、风向相关系数分别为 $0.71\sim 0.98$ 、 $0.66\sim 0.96$ 。在1500 m高度内,激光雷达探测的风速、风向准确性较高,风速平均误差范围在 $\pm 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,绝对误差在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,而风向误差在 20° 以内。不足之处,激光测风雷达在1200 m高度之上数据丢失略大,这主要是受发射功率小、回波信号易衰减影响所致。

(2)相比之下,风廓线雷达资料的准确性略显不足,尤其是风向。风廓线雷达与GPS探空仪的风速、风向相关系数分别为 $0.66\sim 0.91$ 、 $0.55\sim 0.86$,且随高度呈先减后增的垂直分布特征,300~1000 m范围为最佳测量范围。风速、风向的平均绝对误差及平均误差统计结果表明,风廓线雷达的风速测量值通常大于GPS探空仪,最大偏差可达 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,而风向的平均误差最大可达 30° 。

(3)GPS探空仪作为现阶段边界层风场测量的基准方法,在此次对比试验中也显现出一些不足之处。首先,观测频次较低。其他两种雷达仪器可实现连续观测,高频次的观测数据可以更加详细、精准地描述边界层风场结构的变化过程。其次,在近地面无法立即获取真实值。当垂直方向存在风切变时,GPS探空气球由静止状态真正成为风场的示踪物需要一定时间。

由于条件所限,本次研究结果只能显示在台风外围系统影响下三种仪器的测风结果对比。然而,在不同季节、不同天气条件下,三种测风仪器性能的对比分析研究还需今后的工作中进一步验证。另外,采用GPS探空仪的观测结果来验证、比较激光雷达和风廓线雷达的测量性能,是在当前仪器、方法受限条件下实际业务应用中迫切需求的一小步,对观测资料质量控制方法的改进具有很好的参考价

值,对于三种仪器测量数据的更好对比方法还需进一步探索研究。

参考文献:

- [1] OKE T R, MILLS G, CHRISTEN A, et al. Urban Climates[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [2] 胡小明,刘树华,梁福明,等. 北京区域夏冬季风场、温度场的观测研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2005,41(3):399-407.
- [3] 李倩,刘辉志,胡非,等. 城市下垫面空气动力学参数的确定[J]. 气候与环境研究,2003,8(4):443-450.
- [4] 窦晶晶,王迎春,苗世光. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J]. 应用气象学报,2014,25(5):559-569.
- [5] DIBBERN J, ENGELBART D, GOERSDORF U, et al. Operational aspects of wind profiler radars[R]. WMO/TD, 2003, No. 1196.
- [6] 姚雯,马颖. 用GPS定位数据研究L波段雷达-数字探空仪系统的测高误差[J]. 气象,2009,35(2):88-93.
- [7] 阿不力米提江·阿布力克木,于碧馨,李海燕. 乌鲁木齐风廓线雷达资料在暴雨天气分析中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象,2014,8(3):42-47.
- [8] 刘成,车达升,柯宗建. 风廓线雷达在高空风场分析中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象,2013,7(2):56-60.
- [9] 周莉蓉,施娟,朱斌. 风廓线雷达产品在强降水短临预报中的初步应用[J]. 高原山地气象研究,2012,32(4):27-30.
- [10] 曾瑾瑜,夏丽花,陈文键. 福建省风廓线雷达资料在一次强对流天气过程中的应用[J]. 气象与环境科学,2014,37(3):40-48.
- [11] 汪学渊,任雍,李栋. 闽北地区边界层移动风廓线雷达对比试验评估[J]. 气象与环境科学,2014,37(3):108-113.
- [12] 夏俊荣,王善才,闵敏. 新型多普勒测风激光雷达Windcube的风参数观测与验证[J]. 气候与环境研究,2011,16(6):733-741.
- [13] 曲巧娜,盛春岩,孙青,等. 风廓线雷达与L波段探空雷达测风资料的对比[J]. 干旱气象,2016,34(6):1078-1086.
- [14] 张寅,樊超,赵娜,等. 长安风廓线雷达测风资料的可靠性验证[J]. 干旱气象,2017,35(3):507-515.
- [15] 李霞,王磊,任泉. 乌鲁木齐风廓线雷达探测能力评估[J]. 沙漠与绿洲气象,2016,10(1):9-18.
- [16] BARLOW J F, DUNBAR T M, NEMITZ E G, et al. Boundary layer dynamics over London, UK, as observed using Doppler lidar during REPARTEE - II [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(5):2111-2125.
- [17] KUMER V M, REUDER J, FUREVIK B R. A Comparison of Lidar and radiosonde wind measurements [J]. Energy Procedia, 2014,53:214-220.
- [18] 孙旭映,韩晖,段海霞,等. 风廓线仪与气球测风资料的对比分析[J]. 干旱气象,2008,26(3):48-52.
- [19] 韩彦霞,王成刚,严家德,等. 新型边界层气象探空系统的开发与应用[J]. 气象科技,2017,45(5):804-810.
- [20] 范琪,朱克云,郑佳锋,等. 不同天气类型下全光纤相干激光测风雷达探测性能分析[J]. 中国激光,2017,44(2):320-329.
- [21] 王乔乔,张秀芝,王尚昆. Windcube激光雷达与测风塔测风结果对比[J]. 气象科技,2013,41(1):20-26.

- [22] 邓闯,阮征,魏鸣,等. 风廓线雷达测风精度评估[J]. 应用气象学报,2012,23(5):523-533.
- [23] DEBNATH M, IUNGO G V, BREWER W A, et al. Assessment of virtual towers performed with scanning wind lidars and Ka-band radars during the XPIA experiment[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017,10(3):1-19.
- [24] 吴蕾,陈洪滨,康雪. 风廓线雷达自身对比精度分析[J]. 气象科技,2014,42(1):38-41.
- [25] 万蓉,周志敏,崔春光,等. 风廓线雷达资料与探空资料的对比分析[J]. 暴雨灾害,2011,30(2):130-136.

Comparison of Three Kinds of Wind Data in Boundary Layers Under Complex Surface Conditions in Beijing

ZHU Ping¹, WANG Chenggang¹, YAN Jiade¹, LI Ju²

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Beijing Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: Based on the synchronous observation data of laser wind radar (Lidar), wind profile radar (WPR) and GPS radiosonde (GPS) in boundary layer in Chaoyang District of Beijing from 28 August to 2 September 2016, the performance of three kind of instruments on measuring wind speed and wind direction under complex underlying surface conditions were compared and analyzed. The results are as follows: (1) The vertical profiles of wind speed and wind direction detected by Lidar were quite consistent with GPS in boundary layer in Chaoyang District of Beijing from 28 August to 2 September 2016, and the correlation coefficients of wind speed and wind direction ranged from 0.66 to 0.96 and 0.71 to 0.98, respectively. The average absolute error of wind speed was less than $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and for wind direction it was less than 20° . (2) The accuracy of WPR data was relatively poor, the correlation coefficients of wind speed and wind direction between WPR and GPS ranged from 0.66 to 0.91 and 0.55 to 0.86, respectively, and the errors decreased first and then increased with the increase of height. The consistency of two data from 400 m to 1000 m height was higher, the correlation coefficients were greater than 0.80, the detection of range from 400 m to 1000 m was best. Moreover, the values of wind speed detected by WPR were usually larger than that of GPS, the maximum deviation was about $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the maximum error of wind direction was up to 30° . (3) GPS also had shortcomings. The frequency of observation was relatively low, and it was difficult to describe the change process of wind field in boundary layer in detail. There was a significant lag error at the beginning of GPS detection under the vertical wind shear condition. That is, the air balloon takes a certain time to transform from initial state to true wind field tracer.

Key words: Beijing; complex underlying surface; wind measurement in boundary layer; data comparison