

## 风廓线雷达在成都地区的适用性分析

李川<sup>1,2</sup>, 倪长健<sup>1,2\*</sup>, 李昕翼<sup>3</sup><sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225;<sup>2</sup>高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;<sup>3</sup>成都市气象局, 四川 成都 611130

**摘要** 利用 2020 年 1 月至 2020 年 7 月成都市温江区气象站 L 波段探空雷达资料, 基于风场和大气折射率结构常数 ( $C_n^2$ ) 的比对分析, 探究了风廓线雷达产品在成都地区的适用性。结果表明: 风廓线雷达反演的水平风场与对应时刻 L 波段探空雷达测风资料在各高度层均呈显著正相关 ( $p < 0.05$ )。在低层 ( $< 2.5$  km), 风廓线雷达反演的水平风速较 L 波段探空雷达偏小, 约  $0 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 各高度层水平风速有效样本率在  $90\% \sim 100\%$  波动; 在高层 ( $> 2.5$  km), 风廓线雷达反演的水平风速较 L 波段探空雷达偏小, 约  $0.5 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 各高度层水平风速有效样本率在  $70\% \sim 90\%$  波动。另外, 风廓线雷达水平风向的有效样本率随高度上升呈波动增长趋势。在大气处于中等不稳定、弱不稳定、中性或弱稳定条件下, 风廓线雷达  $C_n^2$  廓线与对应时刻 L 波段探空雷达反演得到的  $C_n^2$  廓线具有较好的一致性; 在大气处于极不稳定或中等稳定条件下, 风廓线雷达  $C_n^2$  廓线与对应时刻 L 波段探空雷达反演得到的  $C_n^2$  廓线虽呈现显著的正相关 ( $p < 0.05$ ), 但二者在数值上却存在较大的差异。降水是影响风廓线雷达反演精度的另一重要因子, 降水条件下所测量水平风速的误差显著增大。

**关键词** 风廓线雷达; L 波段探空雷达; 大气稳定度; 适用性; 成都

中图分类号 P425 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1601003

## Applicability Analysis of Wind Profiler Radar in Chengdu

Li Chuan<sup>1,2</sup>, Ni Changjian<sup>1,2\*</sup>, Li Xinyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology,  
Chengdu 610225, Sichuan, China;

<sup>2</sup>Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, Sichuan, China;

<sup>3</sup>Chengdu Meteorological Service, Chengdu 611130, Sichuan, China

**Abstract** The applicability of wind profiler radar products in Chengdu is investigated using L-band sounding radar data from the Wenjiang District Weather Station, Chengdu, from January 2020 to July 2020, based on the wind field and atmospheric refractive index structure constant ( $C_n^2$ ). At all levels, there is a significant positive correlation ( $p < 0.05$ ) between the horizontal wind field retrieved by the wind profiler radar and L-band sounding radar wind data measured at the same time. The horizontal wind speed retrieved by the wind profiler radar is about  $0 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  smaller than the L-band sounding radar at the low level ( $< 2.5$  km), and the effective sample rate of the horizontal wind speed at each level fluctuates between  $90\%$  and  $100\%$ . The horizontal wind speed retrieved by the wind profiler radar is about  $0.5 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  smaller than the L-band sounding radar at the high level ( $> 2.5$  km), and the effective sample rate of the horizontal wind speed fluctuates between  $70\%$  and  $90\%$ . Additionally, the effective sample rate of the horizontal wind direction of the wind profiler radar fluctuates growth with increasing altitude. When the atmosphere is moderately unstable, weakly unstable, neutral, or weakly stable, the  $C_n^2$  profiles retrieved by the wind profiler radar and L-band sounding radar agree well with each other at the same time. When the atmosphere is severely unstable or moderately stable, the  $C_n^2$  profiles retrieved by the wind profiler radar and L-band sounding radar show a significant positive correlation ( $p < 0.05$ ), but the two profiles have a large value difference. Precipitation is another important factor that affects the accuracy of the wind profile radar inversion, resulting in a significant increase in the horizontal wind speed inaccuracy.

**Key words** wind profiler radar; L-band sounding radar; atmospheric stability; applicability; Chengdu

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-30; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 四川省应用基础研究项目(2021YJ0314)、国家重点研发计划(2018YFC0214004, 2018YFC1506006)

通信作者: \*ncj1970@163.com

# 1 引言

大气风场一直是大气科学研究的重点和热点,准确且高分辨率的风场不仅对天气的预报和重大灾害的防范具有重大的意义,而且也是数值模式准确性提升的重要支撑<sup>[1-3]</sup>。目前主要通过 ERA-5/NCAR/NCEP 等再分析数据和探空气球获得大气风场资料,受制于时空分辨率等因素,此类数据在实际应用时仍存在诸多困难<sup>[4-5]</sup>。

风廓线雷达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,能够全天 24 h 不间断提供以风场为主的多种数据产品,包括水平风速、水平风向、垂直风速、大气折射率结构常数等<sup>[6-7]</sup>。风廓线雷达可提供连续观测资料,具有时空分辨率高等优势,已在数值预报、机场天气监测、民用气象、军事等诸多领域得到了广泛应用<sup>[8-10]</sup>。

早在 20 世纪 60 年代,美国就开始研制风廓线雷达,经过十几年不断研究和发展,完善了风廓线雷达利用湍流测风的算法,布置了风廓线雷达区域业务试验网,并在 1992 年最终完成了 NOAA 风廓线网(NPN)<sup>[11]</sup>。众多学者通过将风廓线雷达测风结果与气球探空资料对比,证实了风廓线雷达资料的实用性<sup>[12-16]</sup>。Wang 等<sup>[17]</sup>基于 6 个降水案例的观测试验表明,风廓线雷达组网资料能提供更精确的预报。周芯玉等<sup>[18]</sup>利用风廓线雷达资料分析了强降水过程中低空急流的变化特征,明晰了风场对降水的影响机制。余贞寿等<sup>[19]</sup>将风廓线雷达资料与风廓线雷达中尺度模式相耦合,通过批量化实验表明,耦合风廓线雷达资料可

有效提高对降水的预报能力。李培荣等<sup>[20]</sup>基于风廓线雷达资料分析了霾过程中风场的变化特征,明确了风场对霾的形成发展机制的影响。进一步研究<sup>[21-25]</sup>指出,风廓线雷达受制于湍流特征的复杂性,风廓线雷达易受晴雨、温、压、湿、风和杂波等因素的影响,其资料的准确性一直是关注的焦点。

成都市位于四川盆地西部,是全国典型的静风区,也是全国秋冬季雾霾的易发和频发区<sup>[26]</sup>。着眼于该区域大气环境管理和极端天气预警的迫切需求,目前已在成都市形成了 10 部风廓线雷达的组网观测。本文利用 2020 年 1 月至 2020 年 7 月成都市温江区气象站 L 波段探空雷达资料,基于风场和大气折射率结构常数( $C_n^2$ )的比对分析,探究了风廓线雷达产品在成都地区的适用性。

## 2 仪器与资料选取

### 2.1 仪器介绍

本次实验数据选用的是四川省成都市郫都区(103.90° E、30.81° N)L 波段风廓线雷达与温江区(103.87° E、30.75° N)L 波段探空雷达水平风速资料。郫都区 L 波段风廓线雷达是以大气湍流为示踪物的晴空探测脉冲多普勒雷达,该雷达采用远地遥控操作、可编程数字信号处理器、全固态分布式有源相控阵、全相参脉冲多普勒体制、中频数字接收机和相位编码脉冲压缩等新技术,能够全天 24 h 不间断提供以风场为主的多种数据产品,包括水平风速、水平风向、垂直风速、大气稳定度等,具体参数如表 1 所示。

表 1 郫都区 L 波段风廓线雷达主要参数

Table 1 Main parameters of L-band wind profiler radar in Pidu

Working frequency	Tilt beam inclination	Emission wavelength	Pulse width	Beam width	Minimum detection height	Maximum detection height
1270~1375 MHz	16.4°	232 mm	$0.4 \times 10^{-6}$ s	3°	100 m	5550 m

温江区 L 波段探空雷达的探测任务是通过探空气球携带探测仪器完成的,该仪器由多灵敏感应元件组成,感应元可随着空气温、压、湿的变化而

变化,通过雷达接收机接收高空探空码,最后得到温、压、湿、风等气象数据,具体参数如表 2 所示。

表 2 温江区 L 波段探空雷达主要参数

Table 2 Main parameters of L-band sounding radar in Wenjiang

Working frequency	Pulse power	Pulse front	Pulse width	Minimum detection height	Maximum detection height
1669~1681 MHz	$\geq 2.5$ kW	$\leq 0.12 \times 10^{-6}$ s	$0.8 \times 10^{-6}$ s	0 m	5550~30000 m

### 2.2 资料说明

选取 2020 年 1 月至 2020 年 7 月郫都区 L 波段风廓线雷达与温江区 L 波段探空雷达的观测资料进行对比。郫都区 L 波段风廓线雷达和温江站 L 波段探空雷达探空资料的时间和高度并不严格对应,郫都区 L 波段风廓线雷达的探测高度为 100~5550 m(共 53 层),

100~880 m 的垂直分辨率为 60 m,880 m 以上的垂直分辨率为 120 m。温江 L 波段探空雷达的垂直分辨率为 5 m 或 6 m,由于高空垂直风速的影响,垂直分辨率会有所增加。温江 L 波段探空雷达的探测任务是通过探空气球携带探测仪器完成的,施放探空气球的时间为 23:15 和 11:15(世界时,下同)。故选取对应时刻的

风廓线雷达逐小时平均产品文件(OOBS文件)进行对比分析。该产品文件包含水平风向、水平风速、垂直风速、水平方向可信度、垂直方向可信度、大气折射率结构常数6种数据。成都郫都区风廓线雷达站点与温江区气象站相邻,两地下垫面总体来说相对均一,环境气象条件相似,大气水平分布较为均匀,一小时和几十千米内水平风场基本一致,具有很好的可比性<sup>[27]</sup>。

### 2.3 有效样本率

将风廓线雷达与L波段探空雷达的水平风速差 $\leq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (水平风向差 $\leq 30^\circ$ )定义为有效样本( $N_e$ )<sup>[28]</sup>,两类资料均不为缺测值时的样本为总样本( $N_t$ ),则有效样本率 $N_r$ 定义为

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

### 2.4 误差分析

为分析风廓线雷达与L波段探空雷达资料的差异,采用平均误差(AE)、均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)对雷达水平风速资料进行误差分析,公式分别为

$$E_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_P - V_L), \quad (2)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_P - V_L)^2}{N}}, \quad (3)$$

$$E_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_P - V_L}{V_L} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $V_P$ 是风廓线雷达水平风速; $V_L$ 是L波段探空雷达水平风速。

## 3 降水对风廓线雷达的影响

### 3.1 水平风速相关性

由图1(a)可知,成都市00:00风廓线雷达与L波段探空雷达的水平风速整体上呈显著正相关。0.16 km以下两种资料相关性较差,未通过显著性检验;0.16 km以上两种资料的相关性较好,均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;0.9~2.55 km内两种资料的相关性最好,相关系数稳定在0.9左右。将两种雷达的水平风速资料分有、无降水情况,进行对比后发现:无降

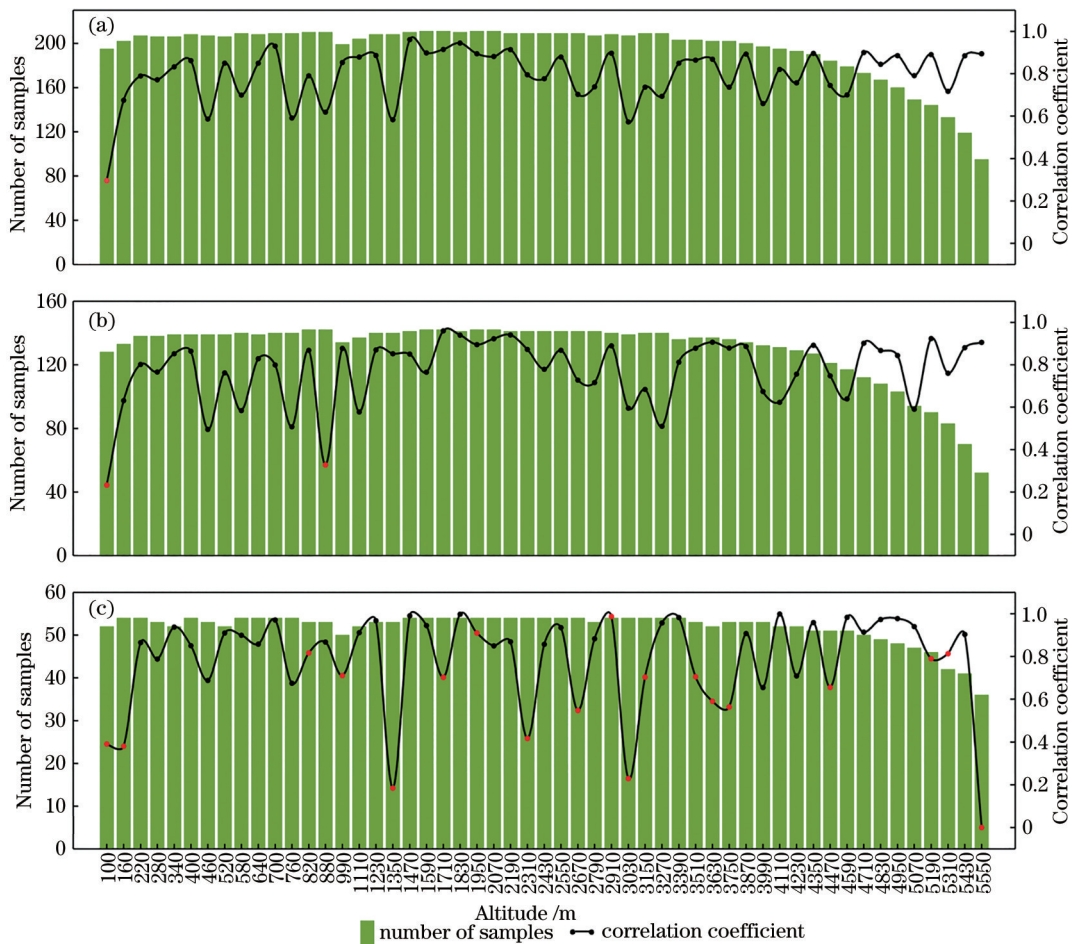


图1 00:00风廓线雷达与L波段探空雷达在不同高度上的风速样本量和相关系数,红色点表示未通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

(a) 总样本;(b)无降水样本;(c)有降水样本

Fig. 1 Number of samples and correlation coefficient of wind speed at different altitudes between wind profiler radar and L-band sounding radar at 00:00, the red dot fails the  $\alpha = 0.05$  significance test. (a) All samples; (b) no precipitation samples; (c) precipitation samples

水时,两种资料的相关性与总体样本相关性基本一致,如图 1(b)所示;有降水时,0.22 km 以下,两种资料的相关系数较低,未通过显著性检验,在 0.22~5.55 km 范围内,两种资料在许多高度层的相关性较差且未通过显著性检验,在通过显著性检验的高度层上相关性较好,相关系数基本稳定在 0.8 及以上,如图 1(c)所示。

由图 2(a)可知,成都市 12:00 两种雷达的水平风速资料在 0.1~5.55 km 范围内呈显著正相关,相关系

数稳定在 0.8 及以上,均通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验。将两种雷达水平风速资料分有、无降水情况,进行对比后发现:无降水时,两种资料间的相关性与总样本相关性基本一致,如图 2(b)所示;有降水时,在 0.1~5.55 km 范围内,两种资料在许多高度层的相关性较差且未通过显著性检验,在通过显著性检验的高度层上相关性较好,相关系数基本稳定在 0.8 及以上,如图 2(c)所示。

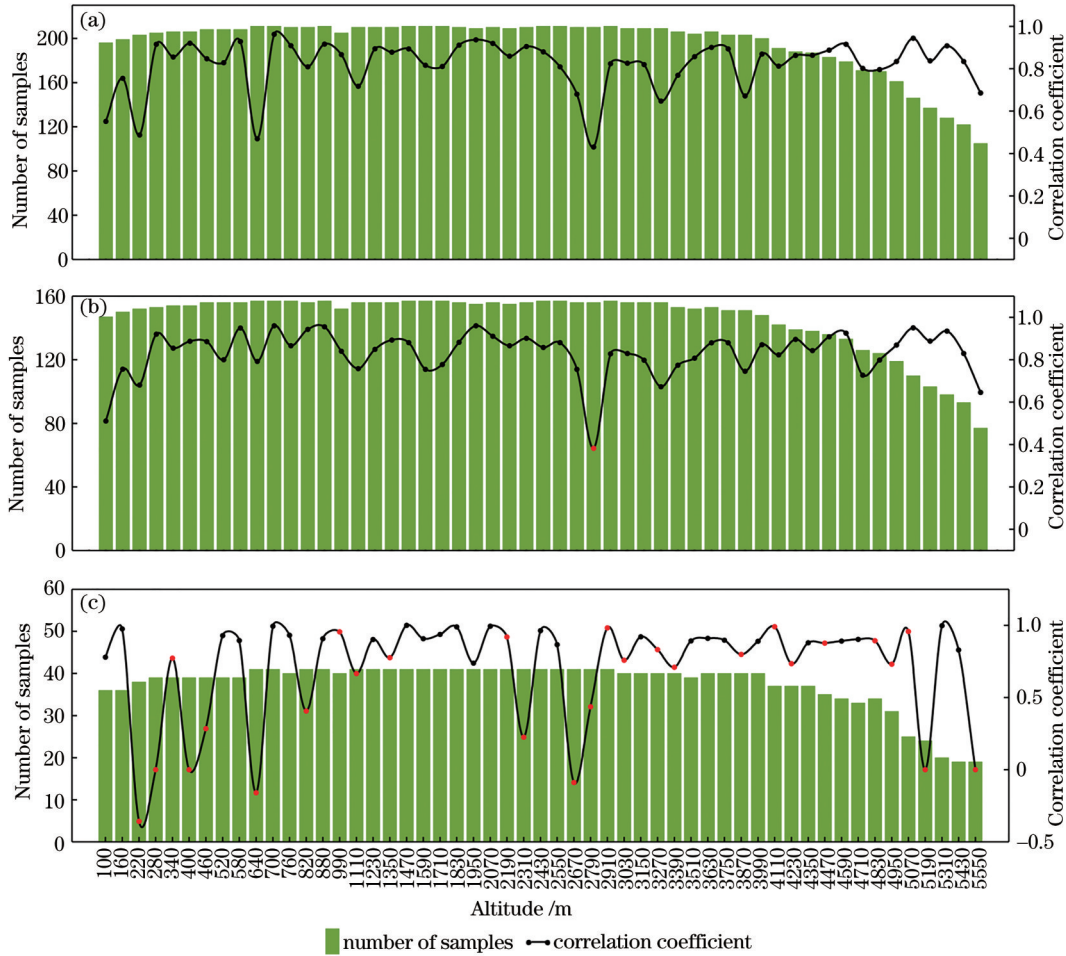


图 2 12:00 风廓线雷达与 L 波段探空雷达在不同高度上的风速样本量和相关系数,红色点表示未通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验。

(a) 总样本; (b) 无降水样本; (c) 有降水样本

Fig. 2 Number of samples and correlation coefficient of wind speed at different altitudes between wind profiler radar and L-band sounding radar at 12:00, the red dot fails the  $\alpha=0.05$  significance test. (a) All samples; (b) no precipitation samples; (c) precipitation samples

### 3.2 水平风速的误差分析

图 3 给出 2020 年 1 月至 2020 年 7 月成都市风廓线雷达相对于 L 波段探空雷达 00:00 和 12:00 在不同高度层上的水平风速平均误差、均方根误差和相对误差,并给出了有无降水条件下三种误差在各高度层上的分布情况。

从图 3(a)、(b)两种雷达水平风速平均误差来看:两种雷达水平风速资料间的平均误差在  $-2\sim-0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  波动;在 2.5 km 以下,两种雷达水平风速间的平均误差较小,大致在  $-0.5\sim0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  波动;在

2.5 km 以上,平均误差较大,大致在  $-2\sim-0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  波动;两时段无降水时,两种雷达水平风速的平均误差与总样本的平均误差趋势一致;有降水时,两种雷达水平风速的平均误差在  $-3\sim-2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  波动。整体而言,12:00 两种雷达水平风速资料间的平均误差略大于 00:00,有降水时的平均误差大于无降水情况。从图 3(c)、(d)两种雷达水平风速均方根误差来看:两种雷达水平风速间的均方根误差在  $1\sim4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  波动;在 2.5 km 以下,两种雷达水平风速之间的均方根误差较小,大致在  $1\sim2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  波动;在 2.5 km 以上,二者水平

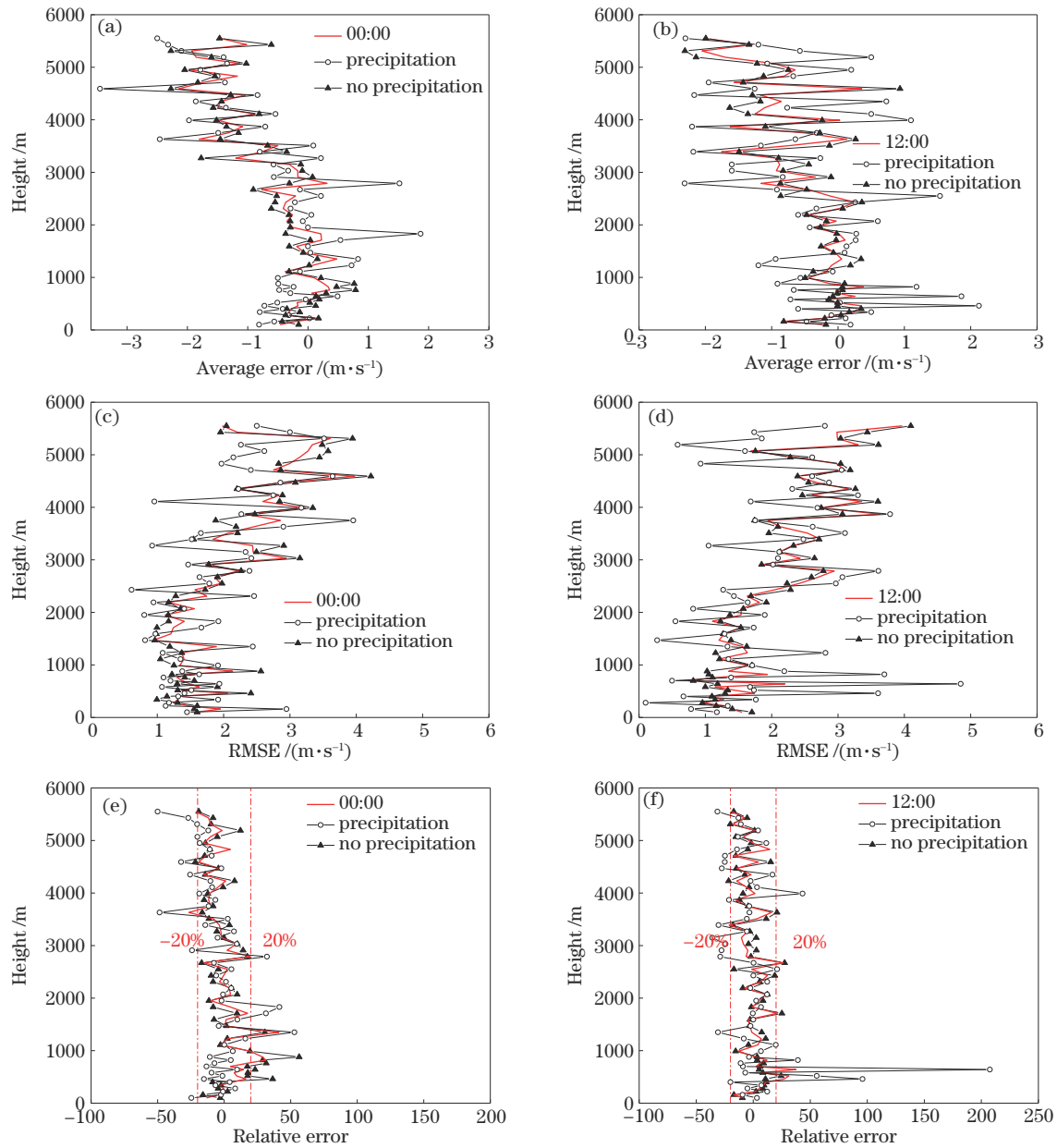


图3 风廓线雷达相对于L波段探空雷达在不同高度上水平风速的误差。(a) 00:00平均误差;(b) 12:00平均误差;(c) 00:00均方根误差;(d) 12:00均方根误差;(e) 00:00相对误差;(f) 12:00相对误差

Fig. 3 Horizontal wind speed error of wind profiler radar to L-band sounding radar at different altitudes. (a) Average error at 00:00; (b) average error at 12:00; (c) root mean square error at 00:00; (d) root mean square error at 12:00; (e) relative error at 00:00; (f) relative error at 12:00

风速间的均方根误差较大,大致在 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 波动;两次无降水时,两种雷达水平风速均方根误差与总样本均方根误差趋势一致;有降水时,两种雷达水平风速间的均方根误差在 $0\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 波动。整体而言,12:00均方根误差略大于00:00,有降水时的均方根误差大于无降水情况。从图3(e)、(f)两种雷达水平风速相对误差来看:除少许高度层外,两种雷达水平风速间的相对误差均较小,均在 $-20\%\sim 20\%$ 波动。另外值得注意的是,在12:00有降水时,低层风廓线雷达水平风速与L波段探空雷达水平风速之间的平均误差、均方根误差、相对误差较其他高度层显著偏大,这可能是因为

在降水粒子的影响下,风廓线雷达回波信号中夹杂降水粒子的回波信号,导致风廓线雷达反演的风速严重失真。

### 3.3 水平风速有效样本率

图4为成都市风廓线雷达相对于L波段探空雷达00:00和12:00在不同高度层上的水平风速的有效样本率,通过式(1)计算可得。由图4可知,两时刻风廓线雷达水平风速有效样本率随着高度上升而降低。从图4(a)00:00水平风速有效样本率来看,在低层( $< 2.5\text{ km}$ ),风廓线雷达的水平风速有效样本率为 $85\%\sim 100\%$ ,降水条件下的水平风速有效样本率显著

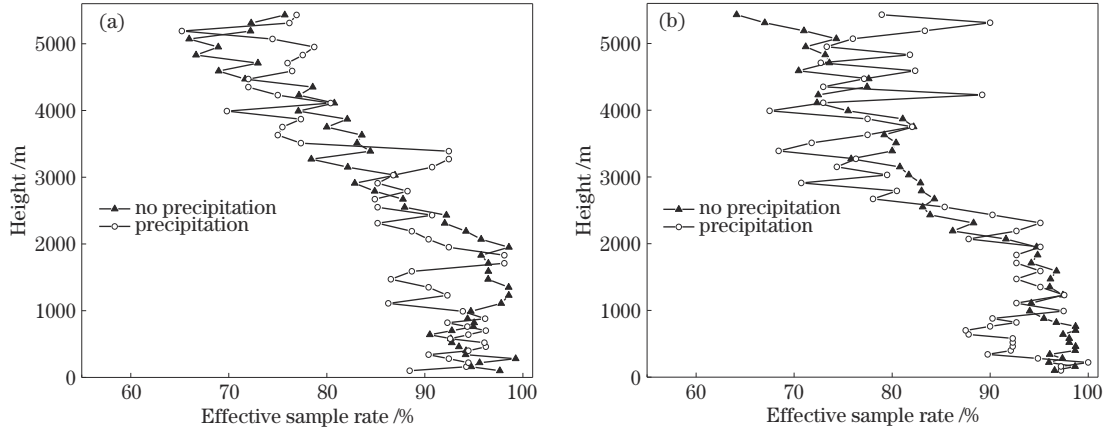


图 4 风廓线雷达在不同高度上水平风速的有效样本率。(a) 00:00; (b) 12:00

Fig. 4 Effective sample rate of horizontal wind speed of wind profiler radar at different altitudes. (a) 00:00; (b) 12:00

低于无降水条件; 在高层 (> 2.5 km), 风廓线雷达的水平风速有效样本率为 70%~85%。整体而言, 图 4(b) 12:00 水平风速有效样本率较图 4(a) 00:00 水平风速有效样本率略好, 尤其是在高层有降水条件下, 有效样本率为 75%~90%, 高于同时刻无降水条件下的有效样本率。

### 3.4 水平风向有效样本率

图 5 为两时刻风廓线雷达水平风向的有效样本率, 通过式 (1) 计算可得。由图 5 可知, 两时刻风廓线

雷达水平风向有效样本率随着高度上升呈波动增加, 增加幅度较小。从图 5(a) 00:00 水平风向有效样本率来看, 在低层 (< 2.5 km), 风廓线雷达的水平风向有效样本率为 40%~65%, 降水条件下的水平风向有效样本率显著低于无降水条件; 在高层 (> 2.5 km), 风廓线雷达的水平风向有效样本率为 70%~85%。整体而言, 图 5(b) 12:00 水平风向有效样本率较图 5(a) 00:00 水平风向有效样本率略高, 变化趋势相似。

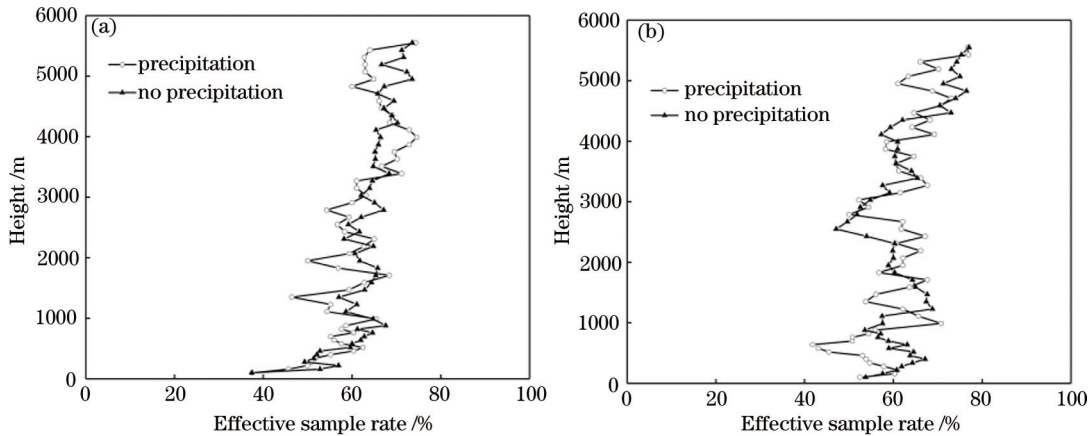


图 5 风廓线雷达在不同高度上水平风向的有效样本率。(a) 00:00; (b) 12:00

Fig. 5 Effective sample rate of horizontal wind direction of wind profiler radar at different altitudes. (a) 00:00; (b) 12:00

综上, 无论 00:00 还是 12:00, 风廓线雷达反演的水平风速与 L 波段探空雷达测得的水平风速在各高度层高度相关。降水显著降低了风廓线雷达反演水平风场的准确度。有降水条件下, 风廓线雷达反演的水平风场与对应时刻 L 波段探空雷达测得的水平风场在各高度层相关性较差, 许多高度层未通过显著性检验, 且二者水平风速的平均误差、均方根误差、相对误差均较大。与此同时, 降水也显著降低了水平风速、水平风向的有效样本率。

## 4 大气折射率结构常数

风廓线雷达除探测大气风场外, 还探测了大气湍流场, 得到大气折射率结构常数 ( $C_n^2$ ) 产品。为研究该产品的准确性与有效性, 基于温江气象站 L 波段探空雷达资料反演得到大气折射率结构常数场, 以此与风廓线雷达产品进行对比分析, 反演方法为

$$C_n^2 = a^2 L_0^{4/3} M^2, \tag{5}$$

$$M = -\frac{7.9 \times 10^{-5} p}{T^2} \frac{\partial \theta}{\partial h}, \tag{6}$$

$$\theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{0.286}, \quad (7)$$

式中： $a^2$ 为常数，通常取 2.8； $L_0$ 是湍流外尺度； $M$ 是位势折射率梯度； $p$ 是气压； $T$ 是气温； $\theta$ 是位温； $\frac{\partial \theta}{\partial h}$ 是位温梯度。

其中，湍流外尺度  $L_0$  对反演结果起着至关重要的作用。基于 4 种湍流外尺度模式反演大气折射率结构常数 ( $C_n^2$ )，选取同时段风廓线雷达  $C_n^2$  产品拟合效果最

优结果作为当前时段的反演结果。4 种湍流外尺度模式分别为 Coulman 模式、Dewan 模式、HMNSP99 模式和 Thorpe 外尺度模式，计算方法详见文献 [29-30]。依据 Pasquill-Turner 稳定度分级法将大气分为 A、B、C、D、E、F 六个等级，对应的大气稳定度为极不稳定、中等不稳定、弱不稳定、中性、弱稳定、中等稳定。在研究时段内选取对应 6 类大气稳定度的样本，对探空数据反演得到的  $C_n^2$  廓线与风廓线雷达 (WPR) 的  $C_n^2$  廓线进行对比分析，如图 6 所示。

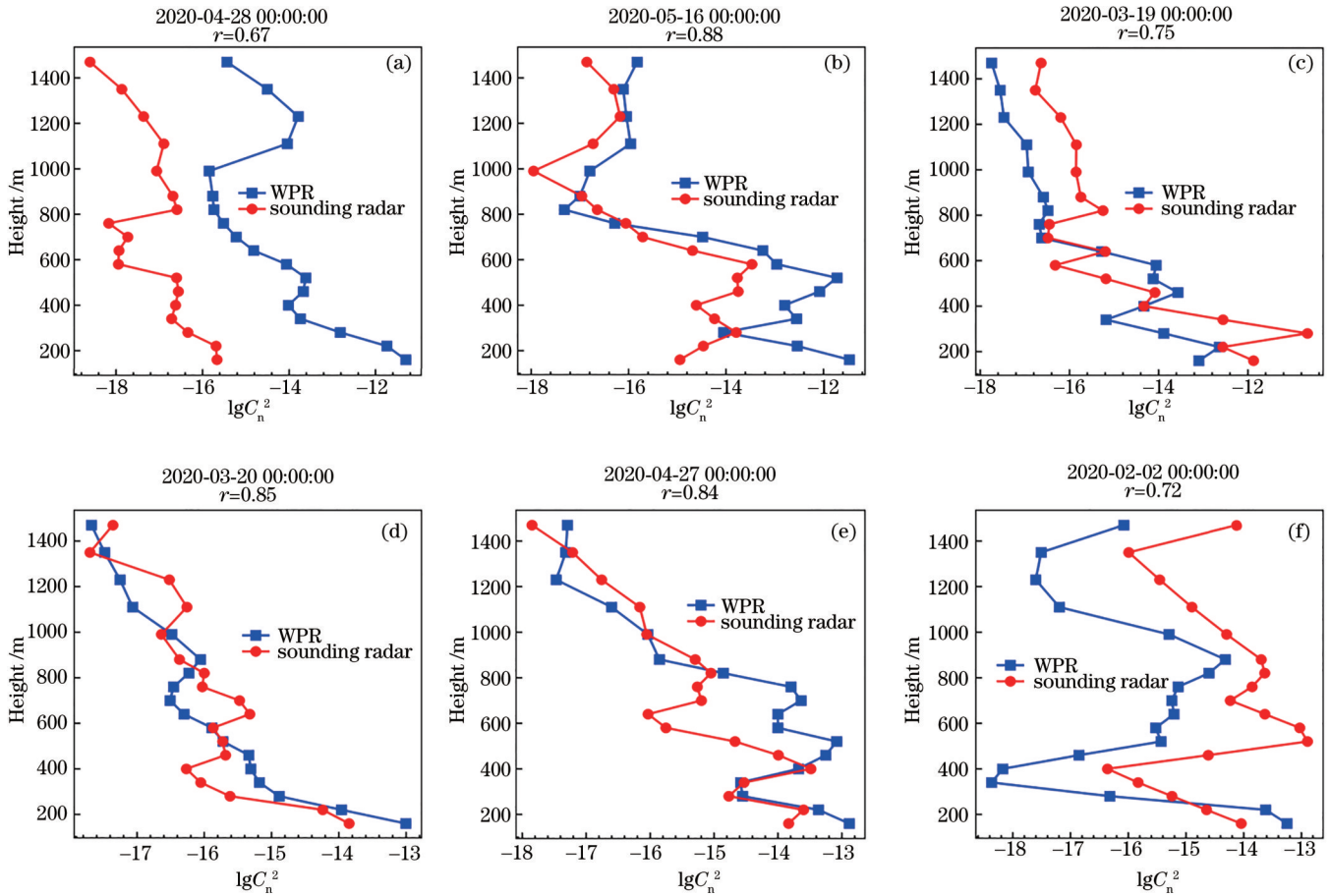


图 6 不同大气稳定度条件下风廓线雷达  $C_n^2$  廓线与探空雷达反演  $C_n^2$  廓线相关图。(a) 极不稳定大气；(b) 中等不稳定大气；(c) 弱不稳定大气；(d) 中性大气；(e) 弱稳定大气；(f) 中等稳定大气

Fig. 6 Correlation graphs of the  $C_n^2$  profile of wind profile radar and the  $C_n^2$  profile retrieved by the sounding radar under different atmospheric stability conditions. (a) Extremely unstable atmosphere; (b) moderately unstable atmosphere; (c) weakly unstable atmosphere; (d) neutral atmosphere; (e) weakly stable atmosphere; (f) moderately stable atmosphere

在各类大气稳定度条件下，探空数据反演得到的  $C_n^2$  廓线与风廓线雷达的  $C_n^2$  廓线相关系数为 0.67~0.88，均通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验。当湍流强度适中时，风廓线雷达的  $C_n^2$  廓线与探空数据反演得到的  $C_n^2$  廓线相关性较好，两廓线整体的量级和变化趋势基本一致，如图 6(b)~(e) 所示；当湍流强度较强或较弱时，风廓线雷达的  $C_n^2$  廓线与探空数据反演得到的  $C_n^2$  廓线变化趋势基本一致，但相关性较差，相关系数分别为 0.67 和 0.72，且两廓线间存在较大的量级差异，不同高度层的量级差异为  $10 \sim 10^3$ ，如图 6(a)、(f) 所示。

## 5 结 论

成都市郫都区 L 波段风廓线雷达反演的水平风速与温江区 L 波段探空雷达测得的水平风速在各高层均呈显著正相关。风廓线雷达反演的水平风速较探空雷达偏小，平均误差与均方根误差随高度上升而递增。有降水时，风廓线雷达与 L 波段探空雷达水平风速在不同高度的相关性较差，二者水平风速间均方根误差和相对误差较无降水时显著偏大。同时，降水使得水平风速、水平风向的有效样本率显著降低。风廓线雷

达  $C_n^2$  廓线与 L 波段探空雷达反演得到  $C_n^2$  廓线变化趋势一致。在大气处于中等不稳定、弱不稳定、中性或弱稳定条件下, 风廓线雷达  $C_n^2$  廓线与对应时刻 L 波段探空雷达反演得到  $C_n^2$  廓线高度一致; 在大气处于极不稳定或中等稳定条件下, 风廓线雷达  $C_n^2$  廓线与对应时刻 L 波段探空雷达反演得到  $C_n^2$  廓线的趋势保持一致, 但在廓线的量级上还存在偏差, 两廓线量级偏差为  $10 \sim 10^3$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 王改利, 刘黎平, 阮征. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2007, 18(3): 388-395, 417.  
Wang G L, Liu L P, Ruan Z. Application of Doppler radar data to nowcasting of heavy rainfall[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(3): 388-395, 417.
- [2] 丁一汇, 李怡, 王遵娅, 等. 亚非夏季风的年代际变化: 大西洋年代际振荡与太平洋年代际振荡的协同作用[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 20-32.  
Ding Y H, Li Y, Wang Z Y, et al. Interdecadal variation of Afro-Asian summer monsoon: coordinated effects of AMO and PDO oceanic modes[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 20-32.
- [3] 周元, 魏鸣, 宋立雪. AMDAR资料的风温信息在机场终端区强对流天气分析中的应用[J]. 大气科学学报, 2019, 42(2): 303-310.  
Zhou Y, Wei M, Song L X. The wind and temperature information of AMDAR data applied to the analysis of severe weather nowcasting in airports[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, 42(2): 303-310.
- [4] 杨雪艳, 秦玉琳, 张梦远, 等. 基于“配料法”的东北冷涡暴雨预报研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(4): 475-482.  
Yang X Y, Qin Y L, Zhang M Y, et al. Forecast of heavy rain caused by the northeast cold vortex using “ingredients method” [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(4): 475-482.
- [5] 陈玉宝, 高玉春, 刘秉义, 等. 基于切比雪夫方法的多普勒激光雷达高空风场垂直探测精度的评估分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(2): 327-344.  
Chen Y B, Gao Y C, Liu B Y, et al. The assessment and analysis of the upper wind data measured by the Doppler lidar based on the Chebyshev approaching function[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(2): 327-344.
- [6] Dolman B K, Reid I M, Tingwell C. Stratospheric tropospheric wind profiling radars in the Australian network[J]. Earth, Planets and Space, 2018, 70: 170.
- [7] Molod A M, Salmun H, Dempsey M. Estimating planetary boundary layer heights from NOAA profiler network wind profiler data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(9): 1545-1561.
- [8] Ishihara M, Kato Y, Abo T, et al. Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan meteorological agency[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2006, 84(6): 1085-1096.
- [9] 董丽萍. 风廓线雷达探测资料评估与产品研究及应用[D]. 成都: 成都信息工程学院, 2014.  
Dong L P. Wind profiler radar data assessment and products research and application[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2014.
- [10] Liu B M, Guo J P, Gong W, et al. Characteristics and performance of wind profiles as observed by the radar wind profiler network of China[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(8): 4589-4600.
- [11] 胡明宝, 李妙英. 风廓线雷达的发展与现状[J]. 气象科学, 2010, 30(5): 724-729.  
Hu M B, Li M Y. The development and technologic status of wind profiling radar[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(5): 724-729.
- [12] Weber B L, Wuertz D B. Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(1): 157-174.
- [13] Balsley B B, Farley D T. Auroral zone winds detected near the tropopause with the Chatanika UHF Doppler radar[J]. Geophysical Research Letters, 1976, 3(9): 525-528.
- [14] Farley D T, Balsley B B, Swartz W E, et al. Tropical winds measured by the Arecibo radar[J]. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(2): 227-230.
- [15] Fukao S, Sato T, Yamasaki N, et al. Winds measured by a UHF Doppler radar and rawinsondes: comparisons made on twenty-six days (August-September 1977) at Arecibo, Puerto Rico[J]. Journal of Applied Meteorology, 1982, 21(9): 1357-1363.
- [16] 董秋婷, 贺明慧, 刁军, 等. 夏季不同天气条件下风廓线雷达探测精度分析[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 16-28.  
Dong Q T, He M H, Diao J, et al. Precision variation of wind profiler measurements with height in different weather conditions in summer[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(1): 16-28.
- [17] Wang C, Chen Y D, Chen M, et al. Data assimilation of a dense wind profiler network and its impact on convective forecasting[J]. Atmospheric Research, 2020, 238: 104880.
- [18] 周芯玉, 廖菲, 胡东明. 利用风廓线雷达对广东前汛期短时强降水类暴雨过程低空风场特征的研究[J]. 热带气象学报, 2019, 35(3): 332-342.  
Zhou X Y, Liao F, Hu D M. A study on low-level wind field characteristics of rainstorm containing short-range heavy rainfall during April to June rainy season in Guangdong by wind profiler data[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35(3): 332-342.
- [19] 余贞寿, 冀春晓, 杨程, 等. 同化风廓线雷达资料对浙江降水预报改进评估[J]. 应用气象学报, 2018, 29(1): 97-110.  
Yu Z S, Ji C X, Yang C, et al. Impacts of assimilating wind profiler radar observations on precipitation prediction in Zhejiang Province[J]. Journal of Applied



- Meteorological Science, 2018, 29(1): 97-110.
- [20] 李培荣, 肖天贵, 王铭杨. 基于风廓线雷达对成都地区典型持续性重污染天气的研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 4174-4186.  
Li P R, Xiao T G, Wang M Y. Study on typical continuous heavily polluted weather in Chengdu area based on wind profiler radar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(12): 4174-4186.
- [21] 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.  
Wang X Y, Ren Y, Li D. Comparative experimental evaluation of moving boundary layer wind profiler radar in the northern of Fujian Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2014, 37(3): 108-113.
- [22] 夏俊荣, 王普才, 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.  
Xia J R, Wang P C, Min M. Observation and validation of wind parameters measured by Doppler wind lidar Windcube[J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(6): 733-741.
- [23] 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.  
Qu Q N, Sheng C Y, Sun Q, et al. Comparison of horizontal wind between wind profile radar and L band sounding radar[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6): 1078-1086.
- [24] 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.  
Zhang Y, Fan C, Zhao N, et al. Reliability validation of horizontal wind data derived from wind profile radar at Chang'an station of Shaanxi[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3): 507-515.
- [25] 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.  
Li X, Wang L, Ren Q. Estimation of the detection ability of CFL-03 wind profile radar in Urumqi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(1): 9-18.
- [26] 罗玉, 马振峰, 赵鹏国, 等. 近 36a 来四川盆地持续霾事件特征及环流分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9): 3604-3615.  
Luo Y, Ma Z F, Zhao P G, et al. Characteristics of persistent haze events and circulation analysis in Sichuan Basin in recent 36 years[J]. China Environmental Science, 2019, 39(9): 3604-3615.
- [27] 齐佳慧, 郝巨飞, 耿飞. CFL-06 型风廓线雷达与 L 波段探空雷达测风对比分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(2): 135-143.  
Qi J H, Hao J F, Geng F. Comparative analysis on wind data from CFL-06 wind profiler radar and L band sounding radar[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(2): 135-143.
- [28] 夏文梅, 陈楠, 程婷, 等. 降水过程中多普勒天气雷达风廓线产品特征[J]. 气象, 2008, 34(10): 20-26, 130.  
Xia W M, Chen N, Cheng T, et al. Analysis on characteristics of VWP wind product of Doppler weather radar during rainfall process[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(10): 20-26, 130.
- [29] 吴晓庆. 中尺度气象模式预报大气光学湍流的现状与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010001.  
Wu X Q. Current situation and prospect of mesoscale meteorological model in atmospheric optical turbulence forecast[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010001.
- [30] 胡晓丹, 苏昶东, 罗涛, 等. Thorpe 尺度估算库尔勒、茂名、拉萨大气光学湍流廓线[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(8): 081002.  
Hu X D, Su C D, Luo T, et al. Estimating the profiles of atmospheric turbulence above Korla, Maoming, Lhasa by Thorpe scale[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(8): 081002.