

# 基于测风激光雷达的庐山山谷垂直风廓线观测研究

陈勇<sup>1</sup> 段婧<sup>2</sup> 安俊岭<sup>1</sup> 马舒坡<sup>1</sup> 张小鹏<sup>3</sup> 李军<sup>2</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029
2. 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 100081
3. 庐山气象局, 九江 332900

**摘要** 考虑到山谷气流的复杂性, 我们在山地云雾物理研究和人工影响天气作业中, 需要更加关注低层风廓线及垂直气流的观测研究。本文针对我国庐山云雾试验站的山谷地形及其与庐山气象站的 85m 高度落差特点, 利用 2019 年 11-12 月云雾试验站测风激光雷达的 40-260m 高度风廓线和气象站 10m 风的联合观测, 分析了山谷低层风廓线特征、垂直运动与水平气流的关系及其影响因素。结果表明: (1) 云雾试验站 80m 高度与气象站 10m 高度的风速和风向相关性较好, 该高度的垂直速度和水平风速分别以 $\pm 0.5\text{ms}^{-1}$ 、 $2\text{-}4\text{ms}^{-1}$  为主。(2) 云雾试验站所处山谷的平均风速随高度递增, 白天风速在各高度上均低于夜间; 昼夜风速差随高度增大, 80m (40m) 高度的昼夜风速差分别为 $-1\text{ms}^{-1}$  ( $-0.2\text{ms}^{-1}$ )。 (3) 山谷低层垂直运动的方向主要与山谷开口方向及气流来向有关, 与气流强度的关系不大; 垂直速率大小与水平风速成正比。如云雾试验站 80m 高度偏南风 ( $112.5^\circ\text{-}247.5^\circ$ ) 上升气流占主导, 其余风向下沉气流占主导, 该关系可延展到 260m。 (4) 山谷低层气流弱风向切变可导致垂直运动分层, 反映了山谷地形气流比平原更复杂。

**关键词** 山谷, 垂直速度, 风廓线, 测风激光雷达

文章编号 2023162B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2404.23162

## The observation study of the vertical wind profile in the valley of Mt. Lu using a Doppler wind lidar

CHEN Yong<sup>1</sup> DUAN Jing<sup>2</sup> AN Junling<sup>1</sup> MA Shupo<sup>1</sup> ZHANG Xiaopeng<sup>3</sup> LI Jun<sup>2</sup>

1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. CMA Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory, Beijing 100081, China
3. Lushan Meteorological Bureau, Jiujiang 332900, China

收稿日期 2023-12-08; 网络预出版日期

作者简介 陈勇, 男, 1980 年出生, 副研究员, 主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: chen Yong@mail.iap.ac.cn

通讯作者 段婧, E-mail: duanjing@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 42175109、41675137、中国气象局重点创新团队 CMA2022ZD10

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42175109, 41675137), Key Innovation Team of China Meteorological Administration (Grant CMA2022ZD10)

**Abstract** The complexity of valley airflow make the observation of low-level wind profiles and related vertical velocity more important, for the study of mountain cloud-fog physics and the technical guidance of weather modification operation. Based on the valley terrain cloud and fog experiment station (CFS) of Mt. Lu and the height difference between CFS and the meteorological station of Mt. Lu (LS), wind profile observations by a Doppler wind lidar at CFS were operated from November to December 2019. The measurements indicated that there was a good correlation between the 80-m wind speed and direction of CFS and the 10-m wind of LS. The 80-m vertical velocity and horizontal wind speed at the CFS site were mainly between  $\pm 0.5\text{ms}^{-1}$  and  $2\text{-}4\text{ ms}^{-1}$ , respectively. The average wind speed at the CFS site increased with height, with the wind speed in daytime being lower than that in nighttime. The difference in wind speed between day and night increased with height, with a wind speed difference of  $-1\text{ ms}^{-1}$  ( $-0.2\text{ ms}^{-1}$ ) at the height of 80 m (40 m). The vertical movement was mainly related to the direction of the airflow, and the vertical velocity was proportional to the horizontal wind speed. The 80-m southerly wind ( $112.5^\circ\text{-}247.5^\circ$ ) at the CFS site was dominated by upward airflow, while the other wind directions were dominated by downward airflow; and this relationship was extended to 260m from 80m. The weak wind shear of low-level airflow at the CFS site can lead to vertical motion stratification, indicating more complexity of airflow in the mountainous terrain than that of the plain.

**Key words** valley, vertical velocity, wind profile, Doppler wind lidar

## 1 引言

低层大气的风和人类活动有着密切的关系，如在污染物扩散（张人文等，2012）、工程抗风（宋丽莉等，2009）、风能资源评估（常蕊等，2022；张洪亮等，2022；梁志等，2023）、机场航行保障（范琪等，2020；梁希豪等，2023）等方面都需要使用低层风廓线的特征资料（宋小全等，2021）。低层风廓线的观测手段主要有塔式直接观测、地基遥感观测等。塔式直接测风的观测精度和数据获取率高，但其观测的高度有限、测风塔的安装受到场地制约（李军和胡非，2017）。地基遥感测风主要有大气光波遥感（激光雷达）、微波遥感（风廓线仪）和声波遥感（无线电声学探测系统）等方式（王志诚等，2018），地基遥感测风相较塔式测风而言，观测高度更高、观测方式更灵活，但受气象和环境影响数据获取率略低。近年来，我国测风激光雷达的研究、应用及业务化得到了快速发展，主要由于其拥有小巧、安装维护方便、环境影响小（无电磁干扰、无噪声）的特点，还得益于其商业化、规模化和国产化。特别是在复杂山地低层风廓线的应用研究中，由于塔式测风受高山

运输维护、场地制约已难于满足某些应用领域的要求（李军和胡非，2017），研究人员开始更多地使用设备小巧、移动便捷、受场地制约小的测风激光雷达开展相关的应用和研究（Liu et al., 2019）。

山地地形下，测风激光雷达与塔式直接测量的评估表明，水平风速和风向相关性较好，但受地形、多雨雾等因素影响，数据完整率相对较低（Aitken et al., 2012；张洪亮等，2022；梁志等，2023）。在开展单台测风激光雷达的风特征研究、风能评估（张洪亮等，2022；梁志等，2023）等基础上，国内外也逐步开展了山地测风激光雷达组网观测。如国内在海坨山山谷冷池形成过程中的精细风场观测（李炬等，2020；程志刚等，2020；王倩倩等，2023）；国际上，学者们分别开展了美国内华达山脉山地背风侧的涡旋观测（Hill et al., 2010），在葡萄牙两个平行山脊间的山谷夜间稳定边界层波-流特征的观测（Bell et al., 2020），韩国平昌地区的山地背风侧的局部强风过程观测（Tsai et al., 2022）等试验。近年来，国外学者还将山地测风激光雷达的应用从水平风速拓展到垂直速度及湍流特征量（Krishnamurthy et al., 2011；Shukla et al., 2019；Bodini et al., 2019；Wildmann et al., 2019；Ortiz-Amezcuca et al., 2022），其中，Shukla et al.（2019）的观测表明喜马拉雅山南坡 2000m 高的山顶垂直速度高于平原，黑碳浓度与强上升气流成正比。

上述国内外的山地测风观测研究指出了山谷气流的复杂性，因此在高山地区开展迎风坡人工影响天气的烟炉作业和云雾物理研究时，需要更加关注低层风廓线及垂直气流的观测及其变化规律的分析研究。对于在山顶的迎风坡布设烟炉，秦长学等（2003）指出这可以缩短催化剂入云输送距离，并且要在增雨（雪）作业时选择合适的上升气流时段，从而保证一定量的有效粒子进入云内-4℃层以上。秦长学等（2003）还建议对作业点安装垂直气流观测仪器，用于评估不同天气形势下地形对垂直气流的影响，同时依靠多源资料选择合理作业时段。美国学者利用机载云雷达的垂直速度等产品分别研究了高山地区淞附雪花的特征及形成机制（Fuller et al., 2023）、评估山地迎风坡碘化银烟炉作业的增雪效果（Geerts et al., 2010）。而目前国内的高山云雾物理研究主要使用山顶气象站的地面 10m 风，结合风廓线观测的研究较少；在人工影响天气烟炉作业评估的研究中，也由于无直接的垂直速度观测，只能用天气图诊断、再分析资料等代替（秦长学等，2003；秦彦硕等，2015；何媛等，2016）。因此，迫切需要针对我国的高山云雾外场试验平台开展相关低层风廓线及垂直气流的观测分析研究。

庐山有我国云降水物理学科开创初期建立的一个高山外场试验站，其云水资源丰富、云雾条件独特，观测到的降水具有较强的云内代表性（即具有云内或刚出云底时的状态），因此庐山是我国高山云雾物理研究的理想场所和主要外场基地，并且自 20 世纪 60 年代起已开展了大量的云雾观测试验（郭丽君等，2019）。庐山山顶风的特征也开展了相关观测研究，如南坡的山谷风廓线观测（俞香仁，1996）指出小风速时，山谷风山下明显，山顶风向较乱不明显；庐山气象站和周边多个山峰

气象站的分析表明,北坡的庐山气象站主要受东西峡谷分布的影响,使得西南气流沿锦绣谷爬升后,往西北方向到达气象站,从而形成偏东南风(闻春华, 2020)。然而庐山北坡山谷高分辨率的风廓线研究未见文献报道。因此,2019年11-12月间中国气象局人工影响天气中心在庐山牵头开展了一次冬季加强观测试验,并利用测风激光雷达观测了北坡山顶附近谷地的低空风廓线分布。本文将利用实验所在地的山谷地形及其与庐山气象站的高度落差,结合测风激光雷达的低空风廓线和气象站10m风的联合观测,深入分析山谷附近低层风廓线特征和水平气流变化。考虑到迎风坡的垂直运动不但是影响高山降水粒子形态的一个重要因子,还是人工催化剂入云的一个重要途径(秦长学等, 2003; Geerts et al., 2010; Fuller et al., 2023); 本文将基于该观测重点分析垂直运动与水平气流的关系、垂直速率大小分布、垂直气流方向分层现象及其影响因素。

## 2 观测概况及资料

庐山位于我国江西省北部,其北临长江、南依鄱阳湖平原(图1a)。庐山是一座呈东北-西南走向的孤立山峰,其主峰汉阳峰海拔1474m,各处山峰都在海拔1000m以上;其中,牯岭镇位于庐山北坡,是庐山的主要旅游中心,其东有大月山(海拔1453m),其北面和西南面有剪刀峡、锦绣谷和三宝树等山谷(图1b)。测风激光雷达放置于中国气象科学研究院庐山云雾试验站(cloud and fog experiment station: CFS; 以下简称云雾站)办公楼楼顶观测平台(海拔1080m),该平台与庐山气象站(Mt. Lu meteorological station: LS; 海拔1165m)的直线距离约为1km,高度差为85m(图1b)。庐山云雾站位于锦绣谷-牯牛背山顶(庐山气象站)的东北-西南向的、且靠近山顶的山谷之中,除西南面外为环山地形(图1b)。

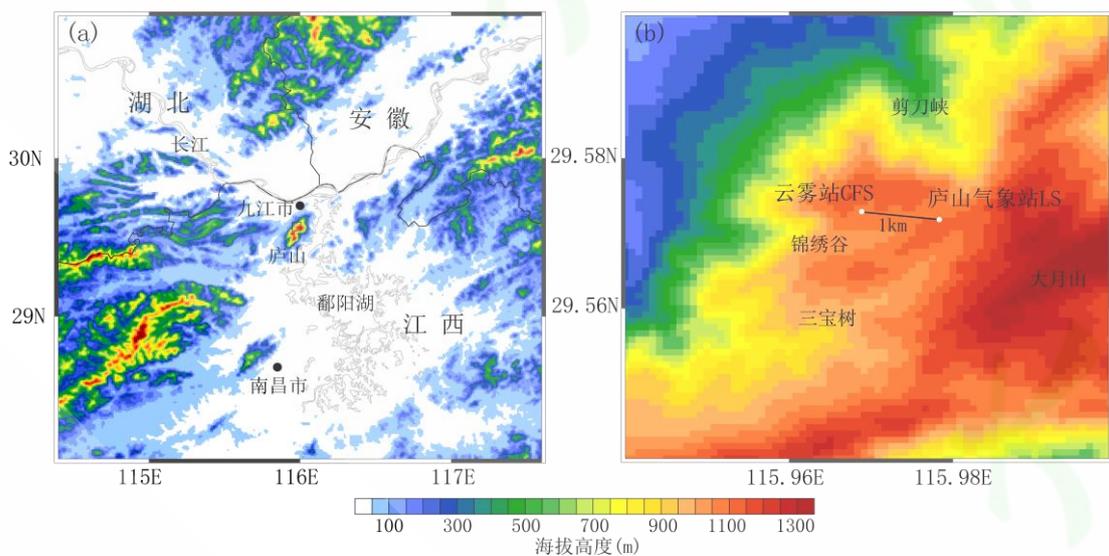


图1 庐山地理位置图 (a)、山谷地形图及观测站点 (b)

Fig. 1 The geographic location map of Mt. Lu (a) and the topography map of observed locations in the valley of Mt. Lu (b).

本研究使用 Windcube8 测风激光雷达（法国 Leosphere 公司制造）观测风廓线。Windcube8 测风激光雷达通过测量激光束出射到空气中颗粒物（气溶胶、雾滴和云滴）散射光波的多普勒频移来测量风廓线。其中，激光束以设定的扫描圆锥角向上扫描，获取东南西北四个方位角上的径向风速廓线，利用三角函数关系可得到水平风速、风向和垂直风速廓线（夏俊荣等，2010）。Windcube8 测风激光雷达主要技术参数见表 1，其测风精度较高并可用，通过 Windcube8 测风激光雷达与北京 325m 气象塔长时间观测的对比（Chen et al., 2017, 2018）表明两者 80-200m 高度矢量平均风速相关系数大于 0.96，平均偏差 $<0.28 \text{ ms}^{-1}$ ，Windcube8 测风激光雷达测量的风速略高于铁塔风杯风速；而两者风向的相关系数均为 0.99，平均偏差为 $\pm 6^\circ$ ；Windcube8 测风激光雷达垂直速度略低于铁塔超声风速仪（相关系数为 0.72）。

表 1 Windcube8 测风激光雷达主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of Windcube8

激光波长	1.54 $\mu\text{m}$
测量距离	40~320m
空间分辨率	$\geq 20\text{m}$
距离库数	10
时间分辨率	10min
扫描圆锥角	27.72 $^\circ$
测风速精度	0.20 $\text{ms}^{-1}$
测风向精度	1.5 $^\circ$
环境温度要求	-35~40 $^\circ\text{C}$

本次观测中 Windcube8 测风激光雷达 10 层探测高度设置为 40、80、110、140、170、200、230、260、290、320m。考虑到庐山雨雾过程多、还有一些气溶胶浓度极低的超清洁天，在降雨过程中垂直径向速度主要为雨滴的下落速度，雨雾和超清洁天等过程中还使得激光信号衰减严重或信号弱，因此我们主要分析 40-260m 高度的数据并对 10min 观测数据做质量控制。针对山谷低层水平风特征（40-140m 共 4 层高度）和风廓线特征（40-260m 共 8 层高度）两个研究对象，它们的质量控制方案均为相应高度（分别为 1-4 层和 1-8 层高度）的 10min 数据有效率超过 40%可进入相应数据集，这样基本剔除掉雨雾、超清洁天的相关数据。2019 年 11 月 4 日到 2019 年 12 月 31 日观测期间，对于山谷低层水平风数据集，满足上述质控要求的 10min 观测数据数量为 5443 个，约占观测总时长的 65%；而对于山谷风廓线数据集，满足上述质控要求的 10min 观测数据数量为总共有 2401 个，约占观测总时长的 29%。

本文主要使用山谷低层水平风数据集，对于山谷风廓线数据集的使用将特别注明。我们主要依据庐山的日出日落时间对白天（8:00-17:00，北京时，下同）和夜间（18:00-次日 7:00）做统计分析；还使用了庐山气象站 10m 风的逐时观测数据与测风激光雷达数据做对比。此外，由于 Windcube8

测风激光雷达的输出产品为垂直径向速度（即朝向、离开仪器分别为正负），为了表述问题的方便，本文将该产品转换为习惯表述的大气垂直速度（即正、负分别为上升和下沉运动）。

### 3 结果分析

#### 3.1 山谷低层水平风特征

图 2abc 分别是庐山云雾站 40m、80m 和 110m 水平风速与庐山气象站 10m 风速的散点图，分别代表云雾站所在山谷在低于、近似等于、高于气象站海拔高度的风速特征。由于庐山气象站 10m 风为逐时数据，云雾站测风激光雷达也提取对应观测时刻的 10min 测风数据，数据样本数为 902 个。由图可见，云雾站 80m 和 110m 水平风速与庐山气象站风速的相关性（相关系数  $R=0.79$ ）比云雾站 40m（ $R=0.68$ ）要好；此外，与庐山气象站 10m 风速相比，云雾站 40m、80m 和 110m 的斜率逐渐增加（斜率=0.76、1.06、1.20），表明云雾站在这三个高度的风速较气象站 10m 风速分别为总体偏小、总体略大、总体偏大。这主要是这三层高度代表的风速不同所导致。云雾站 80m 高度的海拔高度与气象站一致，即 80m 高度已达到山谷周边山坡高度，这意味着云雾站 80m 高度与气象站 10m 风测量的气流较为一致，因此 80m 高度的相关性要好于 40m 的结果；云雾站 80m 风与气象站 10m 风相比，受到地表拖曳作用更弱，因此 80m 风速略大。对于云雾站 110m 高度而言，一方面该高度风速代表性与 80m 高度相似，故其与庐山气象站 10m 风速的相关性结果与 80m 接近；另一方面由于该高度的地表拖曳作用比 80m 高度还要小，因此其风速更大（即对应的斜率更大）。云雾站 40m 的探测高度不但低于庐山气象站海拔高度，而且仍位于山谷；这种山谷地形将减弱此高度偏北向的盛行气流，使得云雾站 40m 风速小于气象站。

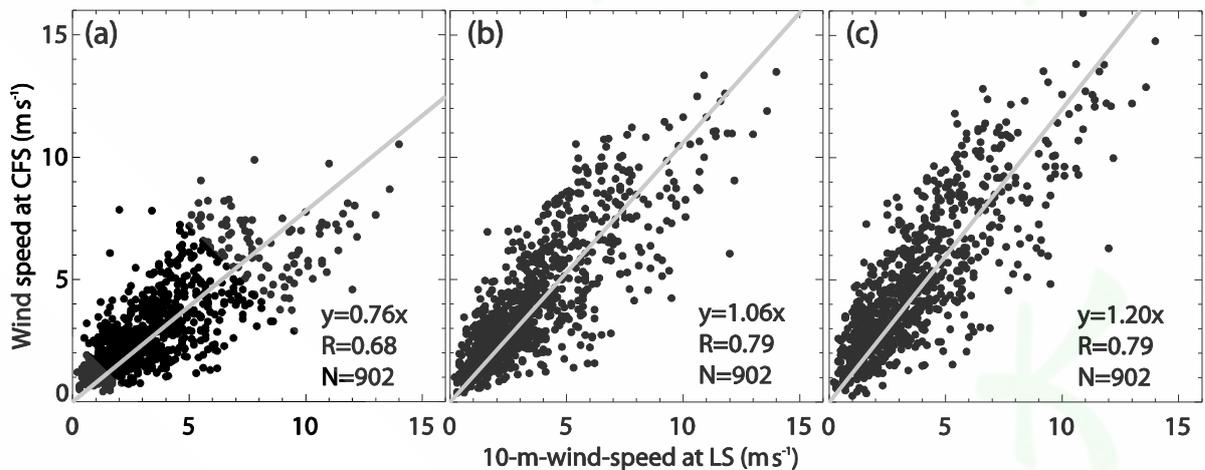


图 2 庐山云雾站（CFS）测风激光雷达 40m（a）、80m（b）、110m（c）与庐山气象站（LS）10m 风速观测散点图

Fig. 2 Comparisons of the wind speed (a) at 40 m by the Windcube8 at (cloud-fog station: CFS) site and at 10 m measured by cup anemometer at (Mt. Lu meteorological station: LS) site, (b) and (c) same as (a) but for the 80-m and 110-m

Windcube8 CFS-measurement, respectively

图 3 给出了庐山云雾站 80m 和庐山气象站 10m 风向的散点图。在统计分析中，针对风向“过零问题”（风向变化跨零度），即当这两个风向变量分别位于  $0-90^\circ$  及  $270-360^\circ$  两个范围时，对位于  $0-90^\circ$  的风向变量加上  $360^\circ$  再做分析。由图可见，云雾站 80m 高度与庐山气象站的风向相关性较好，相关系数达到 0.85，两者风向差  $>90^\circ$  的比例占总样本量的 7%。注意到，大部分风向差  $>90^\circ$  的样本来自于风速  $<3.3\text{ms}^{-1}$ ，这说明在复杂山谷地形下，微风气流（风力小于 3 级）下，即便在 1km 小范围内其风向也会发生切变。此外，与云雾站 80m 高度的结果相比，云雾站 40m、110m 高度与庐山气象站风向的相关系数分别为 0.81 和 0.87，两者风向差  $>90^\circ$  的比例占总样本量分别为 10% 和 7%（图略）。

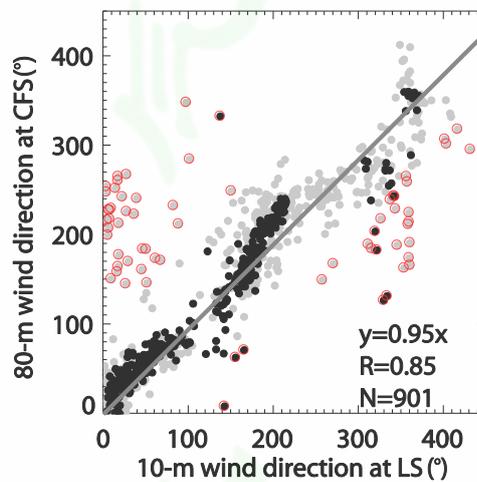


图 3 庐山云雾站（CFS）测风激光雷达 80m 与庐山气象站（LS）10m 风向观测散点图，其中，灰色点为  $<3.3\text{ms}^{-1}$ ，黑色点为  $\geq 3.3\text{ms}^{-1}$ ，红圈为两者风向差  $>90^\circ$

Fig. 3 Comparisons of the wind direction at 80 m measured by the Windcube8 at the CFS site and that at 10 m at the LS site. Note that gray and black points indicate LS wind speed  $< 3.3\text{ms}^{-1}$  and  $\geq 3.3\text{ms}^{-1}$ , respectively; the red cycle indicates the wind-direction difference between sites CFS and LS  $> 90^\circ$

综上，尽管庐山云雾站与气象站有一定的距离和高度差，但云雾站 80-110m 和气象站 10m 风在风速和风向上相关性较好，风向差别大的样本占比较小且大部分发生在小于 3 级风的条件下；而云雾站 40m 风速要小于气象站，但两者风向的相关系数较好，这一方面说明复杂地形下微风气流的复杂多变性，另一方面启示我们利用庐山气象站 10m 风与云雾站平台做资料分析时需要考虑两站风的差异。

### 3.2 山谷平均风速廓线特征

图 4 是根据山谷风廓线数据集绘制的庐山云雾站 40-260m 平均风速廓线。其中，白天和夜间的样本分别为 976 和 1425 个。由图可见，全天平均风速随高度递增，白天风速在各高度上均低于

夜间，且昼夜风速差先递增至 200m 再变缓；测风激光雷达 80m 高度的昼夜风速差为 $-1.0\text{ms}^{-1}$ ，白天和夜间平均风速（标准差）分别为 $3.6\pm 1.0\text{ms}^{-1}$ 和 $4.7\pm 1.6\text{ms}^{-1}$ ，而 40m 高度的昼夜风速差不明显（ $-0.2\text{ms}^{-1}$ ），白天和夜晚风速平均风速分别为 $3.0\pm 0.8\text{ms}^{-1}$ 和 $3.2\pm 1.0\text{ms}^{-1}$ 。根据 Duan et al. (2021)对相同研究时段（2019 年 11-12 月）的庐山气象站（高山）、柴桑站（山麓平原）的分析结果，即庐山和柴桑站的昼夜风速差分别为 $0.5\text{ms}^{-1}$ 和 $-0.8\text{ms}^{-1}$ ，在两个时段庐山的平均风速（ $3.2\text{ms}^{-1}$ 和 $4.0\text{ms}^{-1}$ ）均高于柴桑（ $2.2\text{ms}^{-1}$ 和 $1.7\text{ms}^{-1}$ ），其山顶结果与本研究测风激光雷达 80m 的结果非常接近；另外，这种白天风速低于夜间的现象是高山与平原风速区别的重要特征（Duan et al., 2021）。

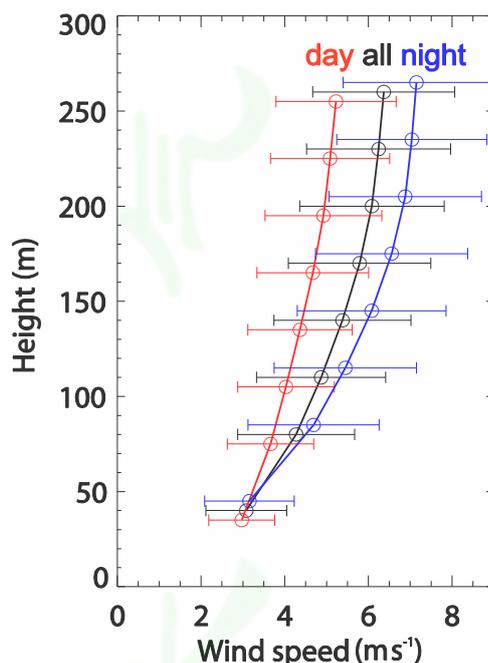


图 4 庐山云雾站测风激光雷达 40-260m 平均风速廓线；折线棒为标准差，为了清晰展示折线棒范围，图中白天和夜间廓线各高度层分别在原始高度减 5m 和加 5m

Fig. 4 The averaged wind-speed profile measured by Windcube8 at the height of 40-260m, with the bar denoting the standard deviation. The plotted height of daytime and nighttime profile here were added -5m and 5m to the original height to present detail standard deviation bar here

### 3.3 80m 高度垂直速度与水平风的关系

山谷地形可导致近地表气流抬升或下沉，体现为垂直速度的正负。图 5 统计了不同气流来向条件下云雾站 80m 高度垂直速度的分布情况。为方便统计，本文未采用标准的 16 方位风向，而是通过 8 个风向中心角度区间来大致区分气流来向，即 N、NE、E、SE、S、SW、W、NW 对应的风向角度分别为  $337.6^{\circ}$ - $22.5^{\circ}$ 、 $22.6^{\circ}$ - $67.5^{\circ}$ 、 $67.6^{\circ}$ - $112.5^{\circ}$ 、 $112.6^{\circ}$ - $157.5^{\circ}$ 、 $157.6^{\circ}$ - $202.5^{\circ}$ 、 $202.6^{\circ}$ - $247.5^{\circ}$ 、 $247.6^{\circ}$ - $292.5^{\circ}$ 、 $292.6^{\circ}$ - $337.5^{\circ}$ 。结果表明偏南风（SE、S、SW，即  $112.5^{\circ}$ - $247.5^{\circ}$ ）对应着上升气流占主导（77%-93%），而其余风向则以下沉气流主导。在下沉气流主导的风向中，除 W 方向下沉气流占比为 66%外，N、NE、E、NW 占比 $>76\%$ 。

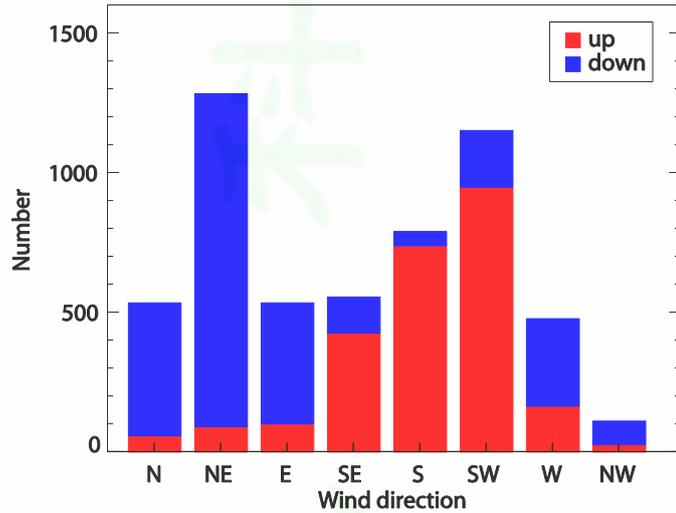


图 5 庐山云雾站测风激光雷达 80m 高度不同风向条件下垂直气流分布

Fig. 5 The number distribution of vertical velocity varied with the horizontal wind direction at 80 m observed by the wind lidar at the CFS site

图 6a 统计了不同风速条件下云雾站 80m 高度垂直速度的分布情况。在各风速分档中，只有大于  $12\text{ms}^{-1}$  的两档风速以下沉气流为主（94%），其余风速分档的下沉气流所占比例均未占优（39%-60%）。值得指出的是，大于  $12\text{ms}^{-1}$  的两档风速以下沉气流为主，也与这类大风在该季节主要是偏北风为主。图 6b 则分析了不同垂直速度下水平风速的分布情况。结果表明，垂直速度绝对值大 ( $>0.5\text{ms}^{-1}$ ) 的 4 档，其对应的大水平风速 ( $>4\text{ms}^{-1}$ ) 占比也较大，比例在 75%-96% 之间；小的垂直速度（在  $\pm 0.3\text{ms}^{-1}$  之间的两档），小水平风速 ( $0\text{-}4\text{ms}^{-1}$ ) 占比分别为 85% 和 84%；而处于上述垂直速度过渡区的两档 ( $-0.5\sim-0.3\text{ms}^{-1}$  和  $0.3\sim 0.5\text{ms}^{-1}$ )，大风速占比未占优，分别为 65% 和 49%。此外，图 6 还表明云雾站 80m 高度水平风速以  $2\text{-}4\text{ms}^{-1}$  为主（40%），垂直气流则以垂直速度  $\pm 0.5\text{ms}^{-1}$  为主（81%）。

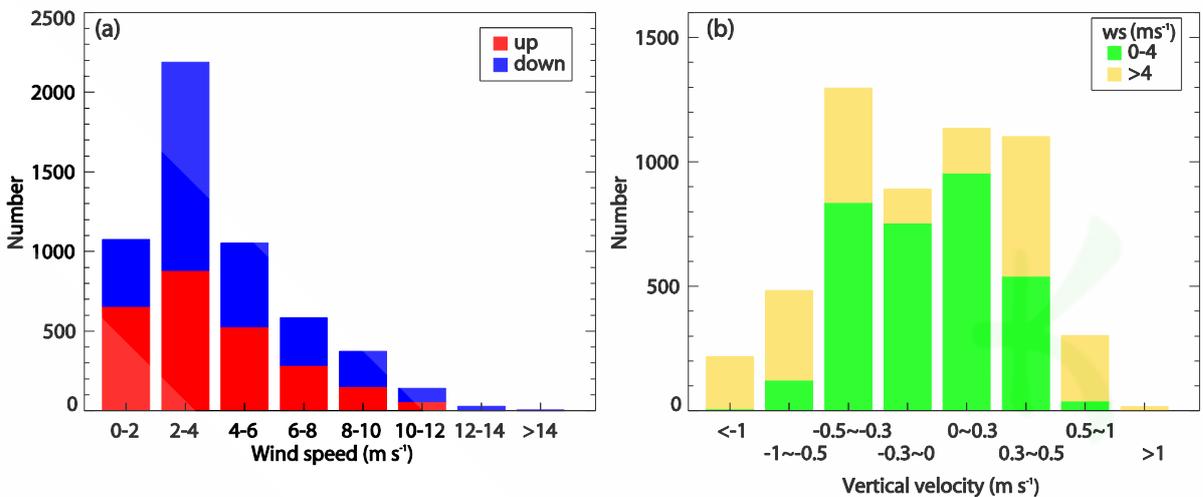


图 6 庐山云雾站测风激光雷达 80m 高度不同风速条件下垂直气流分布 (a) 和不同垂直速度下水平风速分布 (b)

Fig. 6 The number distribution of vertical velocity varied with the horizontal wind speed (a) and horizontal wind speed varied with the vertical velocity (b) at 80m observed by the wind lidar at the CFS site

综上，山谷低层高度的大气垂直运动方向（上升/下沉）主要与山谷开口方向及气流来向有关，与气流强度的关系不大；垂直速率大小与水平风速成正比。这主要因为庐山云雾站在其西南方向有山谷，其余方向有相对高度 80m 的山坡，所以偏南风沿山谷爬升时气流有一个向上的分量，在垂直运动上以上升为主；而其它来向气流从一侧山坡向山谷下滑时有向下的分量，在垂直运动上以下沉为主。此外，庐山山谷低层（80m 高度）的垂直运动速度范围大部分处于 $\pm 0.5\text{ms}^{-1}$  之间，水平风速则以  $2\text{-}4\text{ms}^{-1}$  为主。

### 3.4 两类风廓线观测个例分析

上节 3.1 统计分析的是云雾站 80m 单层高度上的垂直速度与水平风的相互关系。本节将主要从个例分析的角度，将相关个例分成垂直气流是否有分层现象的两类过程。利用全天的水平风和垂直风的时间-高度图深入分析两类过程，即 40-260m 高度上垂直运动变化相对一致、垂直的上下运动分层明显的个例。这些个例中，仅 12 月 16 日庐山有较明显的天气系统，这一天云雾站主要受到地面冷空气影响。

图 7ab 是垂直运动变化相对一致的两整天风的时空剖面图，分别为弱风和强风两种条件下。首先，12 月 7 日的弱风个例中，0-5 时甚至出现深厚的（40-260m）、水平风速 $<1\text{ms}^{-1}$  静风区。该过程有多次风向转换，主要为 SW-NE-W-NE，伴随着风向的转换，探测高度上的垂直运动也分别大致对应为上升-下沉-上升-下沉，与图 5 的统计结果一致。注意到虽然 16-20 时 40m 与 80-260m 高度的垂直运动相反，但是 40m 仅为单层结果、相对浅薄，我们认为其垂直运动变化较一致。其次，12 月 16 日的强风个例中，几乎是全天各高度的大部分水平风速 $>8\text{ms}^{-1}$ ，风向主要为 S 和 SW，对应的垂直运动均为上升运动，垂直速率与水平风速成正比，也与图 5 的统计结果一致。上述个例分析不但说明了庐山云雾站所在山谷大气垂直运动与水平风向的关系可从 80m 高度延展到至少 260m；而且还可由此推测，上述关系在庐山背阴面（西面）多个有西南向开口的山谷可能都适用，如此高的影响高度也表明了这些地方上空受山谷小地形和庐山大地形(东北-西南向的山体)的双重影响。

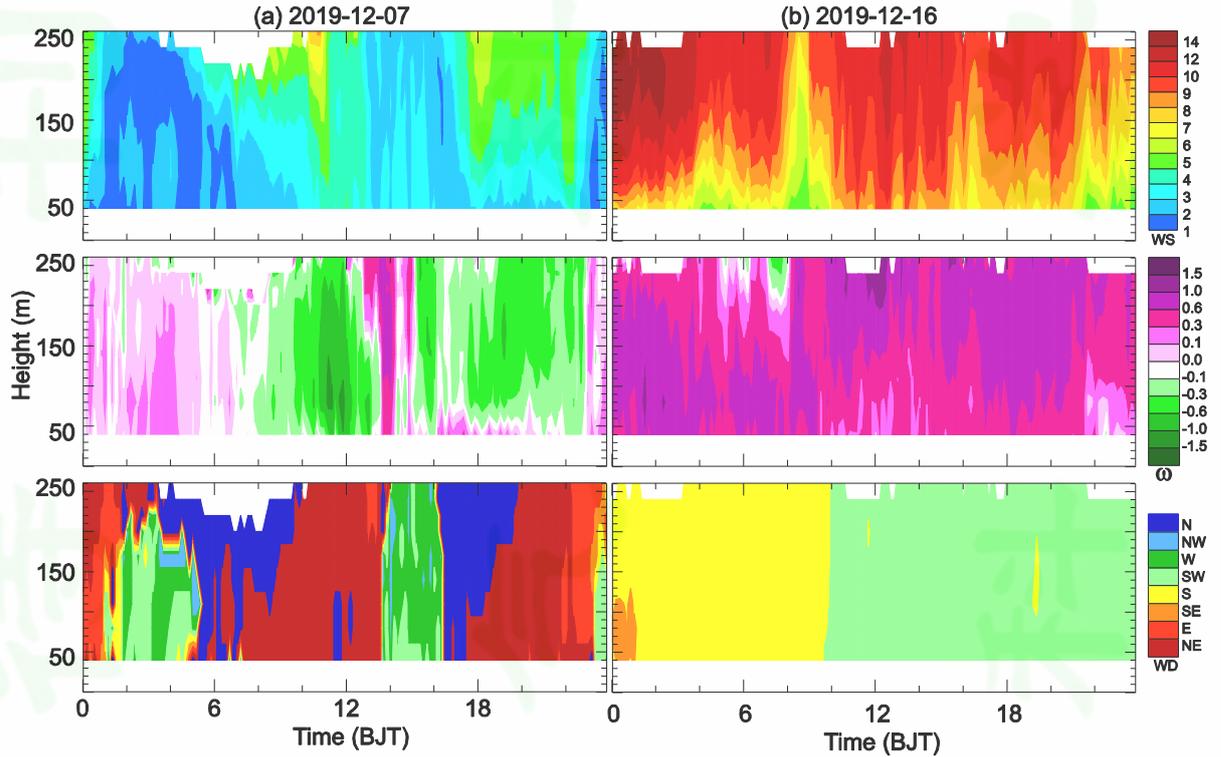


图 7 庐山云雾站的测风激光雷达观测个例，包括水平风速 WS (wind speed,  $\text{ms}^{-1}$ )、垂直速度  $\omega$  ( $\text{ms}^{-1}$ ，正、负分别为上升和下沉运动) 水平风向 WD (wind direction)、

Fig. 7 Wind-lidar observations at the CFS site, including the horizontal wind speed (WS,  $\text{ms}^{-1}$ ), vertical velocity ( $\omega$ ,  $\text{ms}^{-1}$ , plus and minus indicating updraft and downdraft, respectively) and horizontal wind direction (WD)

图 8ab 是垂直速度分层明显的两整天风的时空剖面图，垂直运动分别随高度递增呈下沉-上升和上升-下沉两种分布。这两个过程水平风速不强，40m 高度的水平风速基本小于  $4\text{ms}^{-1}$ 。在 11 月 10 日过程中，白天 8-18 时的下沉-上升运动的分界线基本是 170m；这期间上下层风向为 NW 和 W 配置，风向分界线在 110-170m 之间；下沉和上升运动时间维持时间较长、且垂直运动速率较大(如出现  $>1\text{ms}^{-1}$ )。与 11 月 10 日过程相比，12 月 9 日过程有几个不同点：垂直速度分层现象表现为上升-下沉的低高层配置，主要发生在夜间 (0-6 时和 18-21 时)，上下层风向分别为 W 和 SW 配置。值得指出的是，这种可能由上下层之间弱风向(两相邻象限)切变导致的垂直运动分层明显的现象，在平坦地形的观测并不多见，由此可见山谷地形的气流变化的复杂性。此外，对于庐山云雾站而言，这两个过程中风向与垂直关系的配置与图 5 统计结果较为一致，如大部分 W 和 SW 风分别对应下沉和上升运动；但是 NW 风在 11 月 10 日过程中为上升运动，这与图 5 结果 NW 风向时下沉运动不确定性略高 (76%) 结果一致，具体原因需要高分辨率的气象观测和计算流体力学模型对复杂地形的气流做深入分析，如不同强度气流的过山状况、不同来向气流的汇聚等。

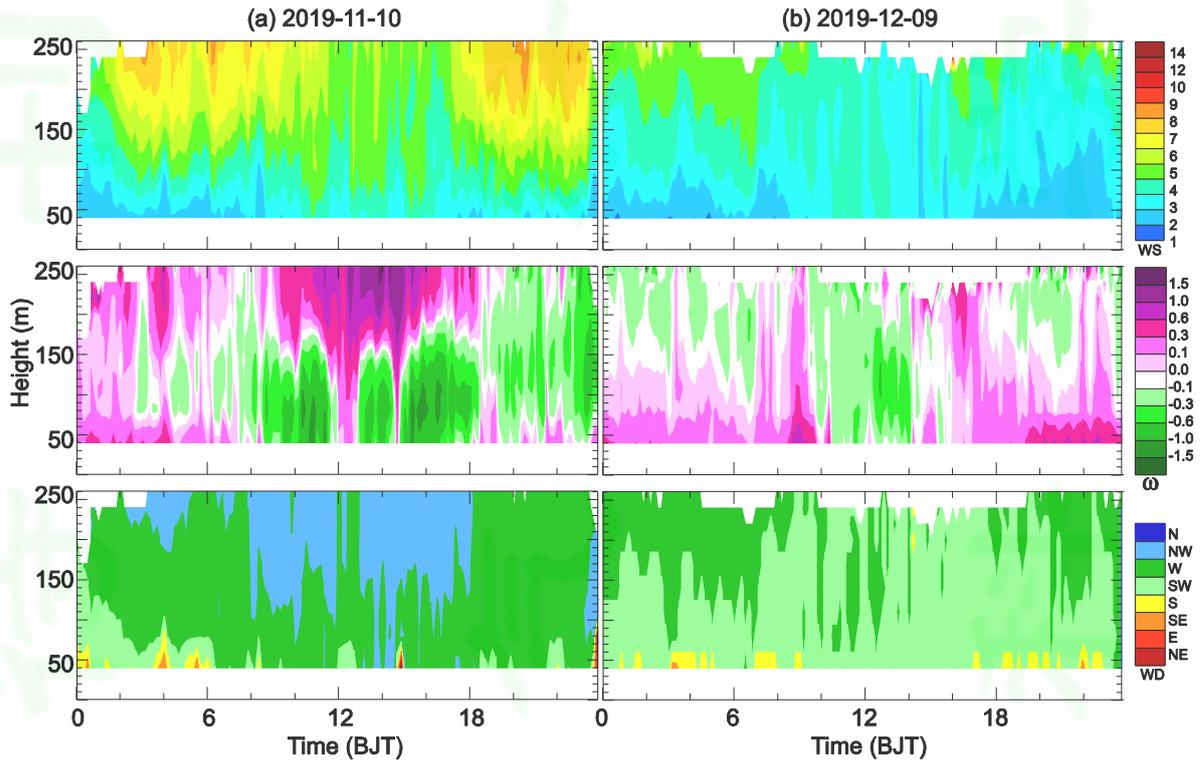


图 8 同图 7，但为垂直速度分层明显的个例

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for the events of obviously stratified vertical velocity

#### 4 结论

高山山谷气流变化复杂，其风廓线及垂直气流的特征及变化规律将有助于山地云雾物理研究和人工影响天气作业指导，但目前相关研究较少。本文基于我国庐山云雾站的山谷地形及其与气象站的 85m 高度落差，结合 2019 年 11-12 月云雾站测风激光雷达的 40-260m 风廓线和气象站 10m 风的联合观测，分析了靠近山顶的山谷低层风廓线特征、垂直运动与水平气流的关系及影响因素等，结果表明：

- (1) 云雾站 80m 与气象站 10m 风在风速和风向上相关性较好；云雾站 80m 平均风速最大、气象站 10m 风次之、云雾站 40m 风最小，主要与其受到的地表拖曳作用和所处地形有关；云雾站 80m 高度上 81% 的垂直速度处于  $\pm 0.5\text{ms}^{-1}$  之间，其水平风速则以  $2\text{-}4\text{ms}^{-1}$  为主。
- (2) 云雾站所处山谷的平均风速随高度递增，白天风速在各高度上均低于夜间；昼夜风速差随高度变大，80m（40m）高度的昼夜风速差为  $-1\text{ms}^{-1}$ （ $-0.2\text{ms}^{-1}$ ）。
- (3) 山谷低层垂直运动的方向主要与山谷开口方向及气流来向有关，与气流强度的关系不大；垂直速率大小与水平风速成正比。如云雾站 80m 高度偏南风（SE、S、SW）以

上升气流占主导，其余风向则以下沉气流主导；这种关系可从 80m 高度延展到至少 260m。

- (4) 在庐山山谷低层，出现了低层气流弱风向切变（两相邻风向）导致垂直运动分层的现象，反映了山谷地形的气流复杂性。

受限于本文高山测风激光雷达观测数据的完整性，本研究有一定的局限性；但本文的一些观测分析结果（山谷垂直运动主要受气流来向影响等）可推广至其它类似的山谷地形。此外，本文的观测分析结果对于迎风坡人工影响天气烟炉作业点位的评估也有一定的参考价值。如强风条件下迎风坡作业的上升气流条件较好，但对于非强风条件下迎风坡可能出现的垂直运动上升-下沉的低高层配置对催化剂入云的影响，其不确定性较大。这也表明在迎风坡/山谷仅依靠地面三轴风速仪可能还不足于反映一部分山地复杂气流（特别是垂直气流）的特征。因此，对于迎风坡人工影响天气烟炉作业点位的评估，可能需要采用具备垂直气流廓线观测能力的测风激光雷达对作业点位做作业季节的长期观测，从而评估该点位的上升气流条件；同时，可在山地野外站做一些综合观测试验，如在迎风坡和下风向采用测风激光雷达多点位风廓线观测（关注垂直气流信息）、测风激光雷达扫描观测（关注水平流场信息）、示踪剂释放、高分辨率数值模拟等手段，进一步揭示山地复杂流场（特别是垂直气流）的特征及其形成机制，支撑高山云雾物理研究和人工影响天气作业评估。

## 参考文献 (References)

- Aitken M L, Rhodes M E, Lundquist J K, et al. 2012. Performance of a wind-profiling lidar in the region of wind turbine rotor disks [J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 29:347–355.
- Bell T M, Klein P, Wildmann N, et al. 2020. Analysis of flow in complex terrain using multi-Doppler lidar retrievals [J], *Atmos. Meas. Tech.*, 13:1357-1371.
- Bodini N, Lundquist J K, Krishnamurthy R, et al. 2019. Spatial and temporal variability of turbulence dissipation rate in complex terrain [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 19:4367–4382.
- Chen Y, An J L, Sun Y L, et al. 2018. Nocturnal low-level winds and their impacts on particulate matter over the Beijing area [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 35(12):1455-1468.
- Chen Y, An J L, Wang X Q, et al. 2017. Observation of wind shear during evening transition and an estimation of submicron aerosol concentrations in Beijing using a Doppler wind lidar [J]. *J. Meteorol. Res.*, 31(2):350-362.
- Duan J, Chen Y, Wang W L, et al. 2021. Cable-car measurements of vertical aerosol profiles impacted by mountain-valley breezes in Lushan Mountain, East China [J]. *Science of The Total Environment*, 76:144198.
- Fuller S, Marlow S A, Haimov S, et al. 2023. W-band S–Z relationships for rimed snow particles: observational evidence from combined airborne and ground-based observations [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 16:6123–6142.
- Geerts B., Miao Q, Yang Y, et al. 2010. An airborne profiling radar study of the impact of glaciogenic cloud seeding on snowfall from winter orographic clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67:3286–3330.

- Hill M R, Calhou H J S, Fernando A, et al. 2010. Coplanar Doppler lidar retrieval of rotors from T-REX [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67(3):713-729.
- Krishnamurthy R, Calhoun R, Billings B, et al. 2011. Wind turbulence estimates in a valley by coherent Doppler lidar [J]. *Meteorol. Appl.*, 18:361–371.
- Liu Z, Barlow J F, Chan P W, et al. 2019. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind lidars [J]. *Remote Sensing*, 11(21):2522.
- Ortiz-Amezcuca P, Martínez-Herrera A, Manninen A J, et al. 2022. Wind and turbulence statistics in the urban boundary layer over a mountain–valley system in Granada, Spain [J]. *Remote Sensing*, 14(10):2321.
- Shukla K K, Phanikumar D V, Newsom R K, et al. 2019. Investigations of vertical wind variations at a mountain top in the Himalaya using Doppler Lidar observations and model simulations [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 183:76-85.
- Tsai C L, Kim K, Liou Y C, et al. 2022. Orographic-induced strong wind associated with a low-pressure system under clear-air condition during ICE-POP 2018 [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos*, 127, e2021JD036418.
- Wildmann N, Bodini N, Lundquist J K, et al. 2019. Estimation of turbulence dissipation rate from Doppler wind lidars and in situ instrumentation for the Perdiguero 2017 campaign [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 6401–6423.
- 常蕊, 朱蓉, 赵大军. 2022. 登陆台风影响下离地 300 m 高度内的强风特征 [J]. *大气科学*, 46(5): 1071–1086. Chang R, Zhu R, Zhao D J. 2022. Strong wind characteristics of the lower boundary layer (0-300 m) during the landfall of a typhoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(5): 1071–1086.
- 程志刚, 李炬, 张鑫宇, 等. 2020. 基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究 [J]. *气象学报*, 78(6):1021-1036. Cheng Z G, Li J, Zhang X Y, et al. 2020. A study on turbulence and three-dimensional wind field based on observations of three wind lidars [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 78(6):1021-1036.
- 范琪, 郑佳锋, 周鼎富, 等. 2020. 基于激光测风雷达的机场低空风切变识别算法 [J]. *红外与毫米波学报*, 39(4):462-472. Fan Q, Zheng J F, Zhou D F, et al. 2020. Research on airport low-level wind shear identification algorithm based on laser wind radar [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves (in Chinese)*, 39(4): 462-472.
- 郭丽君, 郭学良, 楼小凤, 等. 2019. 庐山云雾及降水的日、季节变化和宏微观物理特征观测研究 [J]. *气象学报*, 77(5):923-937. Guo L J, Guo X L, Lou X F, et al. 2019. An observational study of diurnal and seasonal variations, and macroscopic and microphysical properties of clouds and precipitation over Mount Lu, Jiangxi, China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 77(5): 923-937.
- 何媛, 黄彦彬, 李春鸾, 等. 2016. 海南省暖云烟炉设置及人工增雨作业条件分析 [J]. *气象科技*, 44(6):1043-1052. He Y, Huang Y B, Li C L, et al. 2016. Layout of ground burners and analysis of rain enhancement conditions in Hainan Province [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 44(6):1043-1052.
- 李炬, 程志刚, 张京江, 等. 2020. 小海坨山冬奥赛场气象观测试验及初步结果分析 [J]. *气象*, 46(9):1178-1188. Li J, Cheng Z G, Zhang J J, et al. 2020. Meteorological field experiment and preliminary analysis result in the Winter Olympic Venue in Xiaohaituo Mountain [J]. *Meteor Mon (in Chinese)*, 46(9):1178-1188.

- 李军, 胡非. 2017. 复杂地形下激光雷达测风误差的修正[J]. 可再生能源, 35(5):727-733. Li J, Hu F. 2017. Correction for lidar measured error of wind flow on complex terrain [J]. Renewable Energy Resources (in Chinese), 35(5):727-733.
- 梁希豪, 杨寅, 冯亮, 等. 2023. 基于测风激光雷达银川机场动量下传大风特征研究 [J]. 激光技术, 47(3):432-438. Liang X H, Yang Y, Feng L, et al. 2023. Research on the characteristics of momentum downward gale in Yinchuan Airport based on wind lidar [J]. Laser Technology (in Chinese), 47(3): 432-438.
- 梁志, 刘磊, 师宇, 等. 2023. 山地地形对激光雷达湍流测量精度的影响 [J]. 气候与环境研究, 28(2):207-215. Liang Z, Liu L, Shi Y, et al. 2023. Mountain terrain effects on lidar accuracy for turbulence measurement [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 28 (2): 207-215.
- 秦彦硕, 段英, 李二杰, 等. 2015. 河北大茂山碘化银地面发生器增雪作业影响分析[J]. 气象, 41(2):219-225. Qin Y S, Duan Y, Li E J, et al. 2015. Analysis on effect of snow enhancement by silver iodide generator on the ground surface over mountain damao of Hebei [J]. Meteor Mon (in Chinese), 41(2): 219-225.
- 秦长学, 杨道侠, 金永利. 2003. 碘化银地面发生器增雨(雪)作业可行性及作业时机选择[J]. 气象科技, 31(3):174-178. Qin C X, Yang D X, Jin Y L. 2003. The feasibility and opportunity of precipitation enhancement by AgI generator on the ground [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31(3):174-178.
- 宋丽莉, 吴战平, 秦鹏, 等. 2009. 复杂山地近地层强风特性分析 [J]. 气象学报, 67(3): 452-460. Song L L, Wu Z P, Qin P, et al. 2009. An analysis of the characteristics of strong winds in the surface layer over a complex terrain [J]. Acta Meteorologica Sinica, 67 (3): 452-460.
- 宋小全, 龙文睿, 云龙, 等. 多普勒激光雷达多波束测风精度及获取率分析 [J]. 光学学报, 2021, 41(10): 9-16. Song X Q, Long W R, Yun L, et al. 2021. Analysis of accuracy and acquisition rate of Doppler lidar multi-beam wind measurement [J]. Acta Optica Sinica (in Chinese), 41(10): 9-16.
- 王倩倩, 陈羿辰, 程志刚, 等. 2023. 海陀山冬奥气象综合观测平台及研究进展 [J]. 气象学报, 81(1):175-192. Wang Q Q, Chen Y C, Cheng Z G, et al. 2023. A comprehensive meteorological observation platform for the 2022 Beijing Winter Olympic Games over the Haitou mountain: Configuration, application, and development [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 81(1):175-192.
- 王志诚, 张雪芬, 茆佳佳, 等. 2018. 地基遥感大气温湿风垂直廓线观测方法综述 [J]. 气象水文海洋仪器, 35(2):109-116. Wang Z C, Zhang X F, Mao J J, et al. 2018. Overview of ground-base remote sensing observation techniques for air temperature, humidity and wind profiles [J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument (in Chinese), 35(2):109-116.
- 闻春华. 2020. 庐山气象观测站夏季主导风向偏差统计及成因分析[J]. 气象水文海洋仪器, 37(4):31-35. Wen C H. 2020. Statistics and cause analysis of wind direction deviation of Lushan meteorological observatory station in summer[J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument (in Chinese), 37(4): 31-35.
- 夏俊荣, 王普才, 闵敏. 2011. 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, 16(6):733-741. Xia J R, Wang P C, Min M. 2011. Observation and validation of wind parameters measured by Doppler wind lidar Windcube [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(6): 733-741.
- 俞香仁. 1996. 庐山南坡的山谷风观测结果[J]. 江西气象科技, (2):45-46. Yu X R. 1996. The observation of mountain-valley breeze in the south of Mt. Lu [J]. Jiangxi Meteorological Science and Technology (in Chinese), (2):45-46.

张洪亮, 陆义海, 王艳阳. 2022. 雷达技术在山地风电场资源评估中的应用 [J]. 西北水电, (2):101-105. Zhang H L, Lu Y H, Wang Y Y. 2022. Application of radar technology in resources assessment of wind farms in mountainous areas [J]. Northwest Hydropower (in Chinese), (2):101-105.

张人文, 范绍佳, 李颖敏. 2012. 2008年秋季从化山谷风观测研究 [J]. 热带气象学报, 28(1):134-139. Zhang R W, Fan S J, Li Y M. 2012. Observational study of mountain-valley breeze over Conghua in 2008 Fall [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28(1):134-139.