

任雍,张雪芬,吴松华,等,2023. 基于地基与星载激光雷达技术的武夷山山谷风环流研究分析[J]. 气象,49(10):1203-1214.
Ren Y,Zhang X F,Wu S H,et al,2023. Research and analysis of mountain-valley wind circulation in Wuyi Mountains based on ground-based and spaceborne lidar technology[J]. Meteor Mon,49(10):1203-1214(in Chinese).

基于地基与星载激光雷达技术的武夷山 山谷风环流研究分析*

任 雍^{1,2} 张雪芬¹ 吴松华^{3,4} 吴雪菲² 任斯敏⁴

1 中国气象局气象探测中心,北京 100081

2 福建省大气探测技术保障中心,福州 350008

3 中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院,青岛 266101

4 青岛镭测创芯科技有限公司,青岛 266101

提 要: 山谷风是一种热力驱动产生的局地环流,武夷山市三面环山,中部为丘陵地带,使得该地常年盛行山谷风。基于地面气象观测站、边界层测风激光雷达及激光雷达卫星 Aeolus 数据研究了武夷山山谷风环流特征。结果表明,夏季出现山谷风日天数最多,山谷风日出现时大气日变化特征显著,表现为山风出现的时间段,以偏北风为主,风速较小,低空激光雷达回波信号较强,气流运动以下沉为主,垂直方向上形成环流圈;谷风阶段,以偏南风为主,较山风阶段风速有所增强,低空激光雷达回波信号减弱,以上升气流为主;激光雷达数据融合的风廓线可见,武夷山非山谷风日常出现在对流层中低层盛行偏南风的天气形势下,偏南风将水汽输送至当地,使得当地低空被较厚云层覆盖或出现降水过程,从而削弱了山地与谷地的热力差异,局地环流被打破,山谷风环流无法形成。

关键词: 多普勒测风激光雷达, Aeolus 卫星, 山谷风, 资料融合

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.071901

Research and Analysis of Mountain-Valley Wind Circulation in Wuyi Mountains Based on Ground-Based and Spaceborne Lidar Technology

REN Yong^{1,2} ZHANG Xuefen¹ WU Songhua^{3,4} WU Xuefei² REN Simin⁴

1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 Fujian Atmospheric Detection Technology Support Center, Fuzhou 350008

3 College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266101

4 Qingdao Leice Transient Technology Co., Ltd., Qingdao 266101

Abstract: The mountain-valley circulation is a local circulation driven by thermal energy. Wuyishan City is surrounded by mountains on three sides and the center is a hilly area, making the mountain-valley circulation prevalent throughout the year. Based on the data of surface observation station, boundary wind-detecting lidar, and Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission Aeolus) lidar satellite, this paper analyzes the characteristics of mountain-valley circulation in Wuyi Mountains. The results show that the mountain-valley wind days are the most in summer. The diurnal variation characteristics of atmosphere in mountain-valley wind days are significant. During the period of mountain wind, the primary wind direction is northerly,

* 国家重点研发计划(2017YFC1501700)、福建省气象局业务类科研专项(2022Y02)共同资助

2022 年 4 月 19 日收稿; 2023 年 7 月 19 日收修定稿

第一作者:任雍,主要从事地基遥感大气探测技术应用研究与装备保障工作. E-mail:56914200@qq.com

通讯作者:张雪芬,主要从事大气探测技术研究与自动观测仪器开发. E-mail:sophyzxf@163.com

the wind speed is small, the low-altitude lidar signal-noise ratio is strong, and vertical movement of air is mainly sinking, forming a circulation cycle in the vertical direction. Oppositely, the valley wind period is dominated by the southerly wind, which is stronger than that in the mountain wind period, the low-altitude lidar signal-noise ratio is weakened, and the vertical movement is dominated by updraft. According to the wind profile of the lidar data fusion, the non-valley wind days in Wuyi Mountains appear under the weather conditions in which southerly wind prevails in the middle and lower layers of troposphere. The southerly wind transports water vapor to the local area, causing the local low altitude to be covered by thicker clouds or precipitation, thus weakening the thermal difference between mountains and valleys, which breaks the local thermal circulation, so mountain-valley wind cannot form.

Key words: Doppler wind lidar, Aeolus satellite, mountain-valley wind, data fusion

引 言

武夷山市位于福建省西北部,为中亚热带季风湿润气候,相对湿度较大,四季分明,风向季节特征明显;东、西、北部三面环山,中南部地势较为平坦,海拔高度约为 210 m,为山地丘陵地带,地势由西北向东南倾斜,海拔相差较大,最大落差可达 2000 m。特殊的地形使得当地常年盛行山谷风,积累了大量的山谷风环流观测资料,有利于探究当地的山谷风环流特征。山谷风作为局地环流,由山地与谷地的热力差异所驱动:夜间山地降温显著,形成相对的冷高压,气流自山地流向谷地形成山风,在地势偏低的谷地辐合,并在一定高度向外辐散;白天山地受热升温较快,形成相对的热低压,气流在低空向外辐散,自谷地沿山地向运动形成谷风。由于不同地区的地势各有特征,使得山谷风的出现时间和环流结构等存在差异(鞠丽霞等,2003;董群等,2017;贾春晖等,2019)。基于山谷风环流下显著的大气日变化特征,大量研究将山谷风环流特征与大气污染相结合进行相关分析(邓家铨等,1989;吴进等,2021;2022),目前此类分析的气象数据主要来源于地面气象站、自动气象站或是数值模拟(鞠丽霞等,2003;符娇兰和代刊,2016;湛芸等,2021)等。然而,地面气象站无法获得高精度的三维风场信息;尽管结合探空气球能够获取高空的风场信息(刘超等,2017;孟丹等,2019),但受限于自身的释放地点、时间和成本等因素,难以普遍地应用于实际的分析当中;数值模拟受限于气象模型的设定和初始场输入,模拟结果与真实的大气存在一定误差。

当前,自动气象站已覆盖全国的大部分地区,可

观测一定分辨率的水平风场,但三维风场观测仍然是个难题。近年来,随着激光雷达技术的发展,越来越多不同类型的激光雷达开始逐渐被运用于实际的大气探测和气象过程分析。多普勒激光雷达是一种光学遥感探测设备,通过接收出射激光波束遇到大气中气溶胶粒子产生的后向回波信号,来获取激光波束方向上的大气运动信息,实现对大气三维风场的测量,具有同时刻不同高度上风廓线的观测能力,是一种有效的高精度风场探测手段(Baker et al, 2014)。易仕明和陈奕隆(1988)研究指出风廓线雷达能够弥补探空气球的不足,实现自动连续的高精度观测。利用其连续观测的优势,可用于较为恶劣的天气过程中的三维风场分析,例如台风(汪学渊等,2013)、降水(董丽萍等,2014);利用其对垂直风场的观测优势,融合天气雷达能够获取更为精细化的中尺度水平风场结构(阮征等,2017)。

激光雷达具备高灵活性,可搭载在多种设备上满足多样化的观测场景需求,包括机载激光雷达、漂浮式激光雷达、星载激光雷达等。机载激光雷达可实现移动式风场测量(翟国君等,2012;Gutleben and Gro,2021);漂浮式激光雷达利用其能够实现全天候无人值守等优势,可用于海上较为恶劣的天气的三维风场观测(王浩等,2021;王强等,2020;Gottschall et al,2017;Högström et al,1988);星载激光雷达利用卫星搭载激光雷达在高空探测中的优势,可不间断全天候连续扫描,实现全球高精度的风场观测覆盖(付松琳,2021;黄悦等,2021;汪自军等,2021)。利用其灵活性,结合卫星全天候、全覆盖的特性,将卫星数据与地面观测数据融合,可以获得更高质量的数据(齐亚琳和林明森,2012;苗春生等,2015;周璇等,2015),为实际大气观测提供不同高度

的风场信息。

1 数据与方法

1.1 边界层风廓线测风激光雷达

本文激光雷达观测设备选用青岛镭测创芯科技有限公司的 WindMast PBL 型边界层风廓线测风激光雷达(下文简称 PBL 激光雷达,图 1),其布设于福建省武夷山市东南部(图 2),海拔高度为 221 m。雷达的激光波束的俯仰角度为 71.38° ,起测高度为 28 m,径向距离分辨率为 15 m,垂直高度分辨率约为 14 m(径向距离分辨率 $15\text{ m} \times \sin 71.38^\circ$),最大径向探测距离为 3000 m。PBL 激光雷达的数据产品包括信噪比、水平风速、水平风向、垂直速度、湍

流强度,以及消光系数等,具体的主要系统参数详见表 1。选取 2020 年 6 月至 2021 年 5 月(全文均为北京时间),时间分辨率为 10 min 的 PBL 激光雷达数据对武夷山山谷风特征进行分析。

1.2 地面气象观测站

本文选用福建省武夷山市北部地面观测站(海拔高度为 210 m)(图 1)的相对湿度数据以及日照计日照时长数据,时间分辨率为 1 h(整点),选取 2018—2021 年连续观测数据用于当地气象条件分析。

1.3 激光雷达卫星 Aeolus

Aeolus 是全球首颗直接探测的测风激光雷达卫星,能够提供全球范围内高时空分辨率的垂直风



图 1 PBL 激光雷达设备安装图

Fig. 1 The installation diagram of PBL lidar equipment



图 2 地面观测站与雷达相对位置

Fig. 2 Position of ground observation station relative to lidar

廓线。其运行轨道为太阳同步轨道,轨道高度为 320 km,穿越赤道时间为当地时间 06 时和 18 时,能够实现每天准全球覆盖(每天约 16 个全球观测轨道),轨道重复周期为 7 d(Reitebuch, 2012)。该卫星的唯一载荷为大气激光多普勒测风激光雷达(ALADIN),其工作波长为 354.8 nm,设置了两个探测通道以实现对激光束径向方向两类不同风速示踪物的探测:Mie 散射通道探测气溶胶散射频移以反演包括大气边界层在内低层大气的径向风速, Rayleigh 散射通道探测大气分子散射频移以反演中高对流层及低平流层大气的径向风速。ALADIN 在垂直方向上高度观测范围为 0~20 km,垂直分辨率由低层至高层分别为 0.5、1.0、2.0 km, Mie 探测通道和 Rayleigh 探测通道的水平分辨率分别为 10 km 和 90 km。Aeolus 卫星正式发布的数据产品

表 1 边界层测风激光雷达 WindMast PBL 主要系统参数

Table 1 Main system parameters of WindMast PBL boundary layer wind lidar

指标	参数
激光波长	1.5 μm , 人眼不可见且人眼安全
径向距离分辨率	15~50 m 可调
测量高度范围	30~3000 m
风速精度	$\leq 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
风速测量范围	$\pm 75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
风速误差	$< 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
风向精度	$< 3^\circ$
风向测量范围	$0^\circ \sim 360^\circ$
风向误差	$< 5^\circ$
扫描伺服精度	0.1°
扫描方式	多波束扫描/VAD
数据产品	水平风速和风向, 指定时间平均风速和风向, 湍流强度, 垂直速度, 信噪比, 近地面温度、湿度和气压等

主要有 L2A 级数据产品(气溶胶、云光学参数)、L2B 级数据产品(HLOS 水平径向风速)、L2C 级数据产品(同化 L2B 级数据产品后的数值天气预报模型矢量风速)(Rennie et al, 2020)。

本文选取与 PBL 激光雷达数据观测的相同时间段(2020 年 5 月至 2021 年 6 月)的 L2C 级 Mie 探测通道数据作为研究对象。Aeolus 卫星每周两次在武夷山市上空过境, 过境时扫描点分布如图 3 所示。Aeolus L2C 级 Mie 探测通道数据为将 HLOS 风速通过预报模型的四维变分同化至预报模式中产生的矢量风速, 每个扫描点扫描时间分辨率为 1~2 s, 在同一次过境轨道内, 不同激光束在相同高度的时间差区间为 1~8 s, 时间差远小于中小尺度的大气过程。

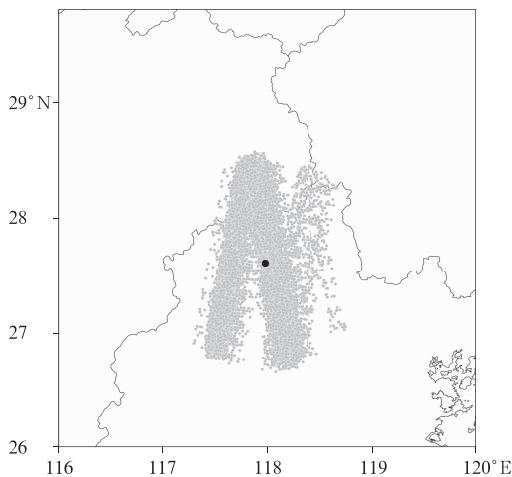


图 3 Aeolus 卫星扫描区域(灰点)和武夷山激光雷达位置(黑点)示意图

Fig. 3 The diagram of Aeolus satellite scanning area (grey dot) and the position of Wuyishan Lidar (black dot)

为了更好地应用卫星激光扫描捕获的风场信息, 针对某一时刻某一扫描点多束激光观测数据, 将这一时刻同一高度上激光雷达发射的所有激光束的数据作平均, 平均的结果作为对应高度上这一时刻的风场结果。

2 结果与分析

2.1 山谷风环流特征

多普勒激光雷达是一种光学遥感探测装备, 通过接收出射激光波束遇到大气中气溶胶粒子产生的后向回波信号, 计算回波信号中的多普勒频移, 来获取激光波束方向上的大气运动信息, 结合特定的扫描模式, 能够实现对大气三维风场的测量, 具有同时刻不同高度上的风场廓线观测能力, 其观测范围大、测量精度高, 尤其是对于对流层内复杂天气过程的捕捉, 是一种有效的风场探测手段。山谷风环流是低空一种由热力驱动产生的局地环流, 山地和谷地地势差异产生的热力梯度驱动了山谷风的形成。除了地势热力差异驱动外, 静稳天气形势也是山谷风日出现的必要基础。为了诊断山谷风日的基本大气特征, 选取 2020 年 8 月 3 日 PBL 激光雷达观测结果进行评估。当日, 天气状态较稳定, 气温偏高, 偏南风风力较小, 天空中无显著的较厚云层长期覆盖, 较少的云层对山地与谷地的热力差异削弱效果较弱, 使得山谷风出现的基本条件得以维持; 从激光雷达观测角度, 激光雷达长时间连续有效探测高度可达 2 km, 能够捕获山谷风发生的对流层低层大气风

场, PBL 激光雷达 10 min 平均数据结果对山谷风日的大气变化基本特征(图 4)具有一定的代表性。

武夷山地势为西南—东北走向, PBL 激光雷达安装于地势相对平坦的谷地(图 2)。2020 年 8 月 3 日山谷风环流的 PBL 激光雷达观测结果表明(图 4), 山谷风日大气日变化特征显著。夜间为山风盛行阶段(00—08 时, 以及 18 时至次日 00 时), 谷地低空水平风速较小, 接近于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 200 m 高度以下激光雷达回波信号强度较大, 湍流强度较弱。400 m 高度以下为偏北风, 400 m 高度以上为偏南风, 气流自山地流向谷地, 通过较弱的下沉运动在谷

地堆积, 并逐渐在一定高度上向外扩散, 单点激光雷达观测到谷地上空形成了闭合的风向环流圈。白天为谷风盛行阶段(08—18 时), 1 km 高度以下谷地为偏南风, 水平风速大约为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 低空激光雷达回波信号强度减弱, 气流自谷地向山地流动, 补充山地空气受热垂直辐合的抬升量。山地上空的辐合气流在一定高度向空间扩散, 单点激光雷达未观测到谷地上空形成闭合的环流圈, 这表明山风与谷风阶段的垂直风场为非对称结构。15—18 时, 随着太阳辐射强度逐渐减弱, 垂直方向气流交换强度逐渐减小, 垂直气流上升运动强度减弱, 山地与谷地的热

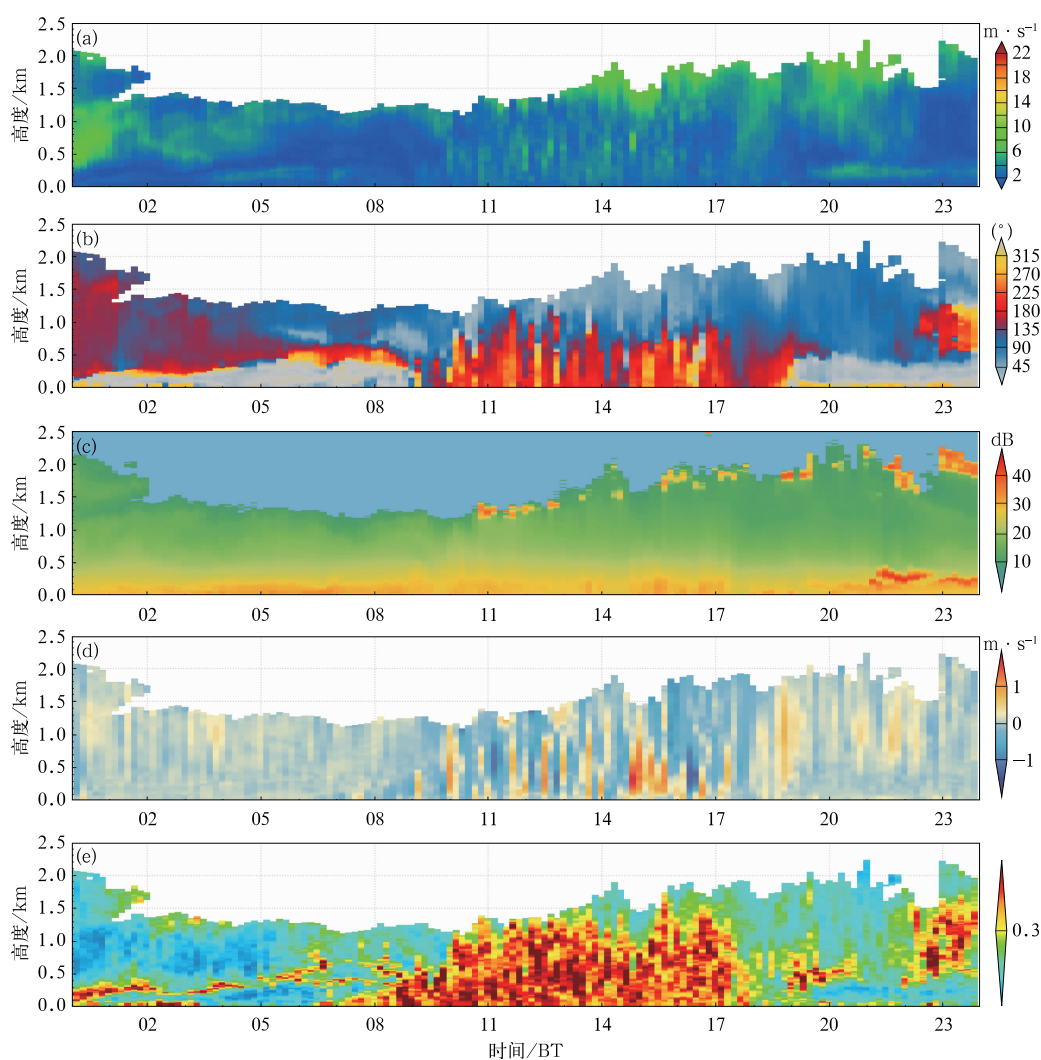


图 4 2020 年 8 月 3 日 PBL 激光雷达观测的(a)水平风速,(b)水平风向,
(c)雷达信噪比(SNR),(d)垂直速度,以及(e)湍流强度的时间-高度变化

Fig. 4 The time-altitude profiles of (a) horizontal wind speed, (b) horizontal wind direction, (c) signal-noise ratio (SNR), (d) vertical velocity, (e) turbulence intensity observed by PBL lidar on 3 August 2020

力差异变化驱动当地风场由谷风阶段逐渐向山风阶段转换。

武夷山为典型的季风气候,风场具有鲜明的季节特征,同时,不同季节日照时长存在差异,这使得山谷风环流受到季节波动的影响。根据前文个例分析,当出现山谷风日时,低空风场特征为“偏北风-偏南风-偏北风”,激光雷达回波信号存在差异等,对四个季节的山谷风日进行提取,统计不同季节山谷风日出现的频率(即计算山谷风日出现的总天数与PBL激光雷达有效观测天数的比值),评估不同季节日照条件下的山谷风差异。图 5a 表明,武夷山地区山谷风环流存在显著的季节差异。夏季和冬季山谷风日出现的次数偏多,均可占当季度的 0.5 以上;其中,夏季(2020 年 6—8 月)为 50 d,冬季(2020 年 12 月至 2021 年 2 月)为 46 d。秋季和春季出现山谷风日的频率偏低,大约在 0.2~0.3;其中,春季

(2021 年 3—5 月)为 12 d,秋季(2020 年 9—11 月)为 16 d。由图 5b 可见,秋季平均的日照时长最长,但不稳定,山谷风日出现的频次偏低;夏季日照时长较长且相对稳定,同时山谷风日出现频次最多,山谷风与日照时长具有一定的相关性,季节性特征较显著。

日照条件的季节差异,使得武夷山的山谷风存在季节性特征。图 4 对典型的山谷风环流观测指出,在山风阶段垂直方向上存在风向切变,可形成风场环流圈。为了诊断山风阶段特殊垂直水平风场结构,进一步评估了四个季节山风阶段垂直方向上出现风向切变的高度(图 6)。

图 6 结果表明山风阶段的风向切变具有季节性。冬季风向切变高度最高,可达 1.0~1.5 km,并且随着季节进程,切变高度具有减小的趋势,冬季初期,切变高度偏高,中期和后期高度下降至 500 m 高度附近,波动性较强。夏季,风向切变发生在 500 m

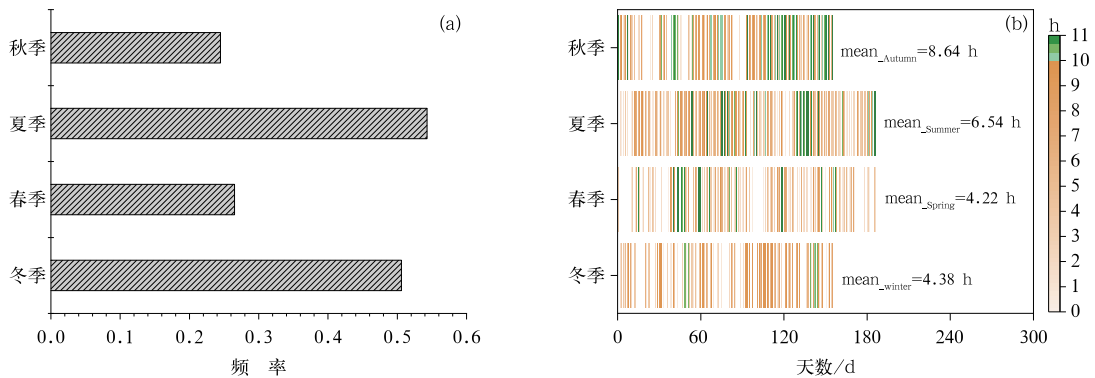


图 5 (a)2020 年 6 月至 2021 年 5 月武夷山各个季节山谷风环流的出现频次,

(b)2020 年 1 月至 2021 年 10 月的太阳日照时长

Fig. 5 (a) Frequency of mountain-valley wind circulation in the four seasons from June 2020 to May 2021 and (b) duration of sunshine in Wuyi Mountains from January 2020 to October 2021

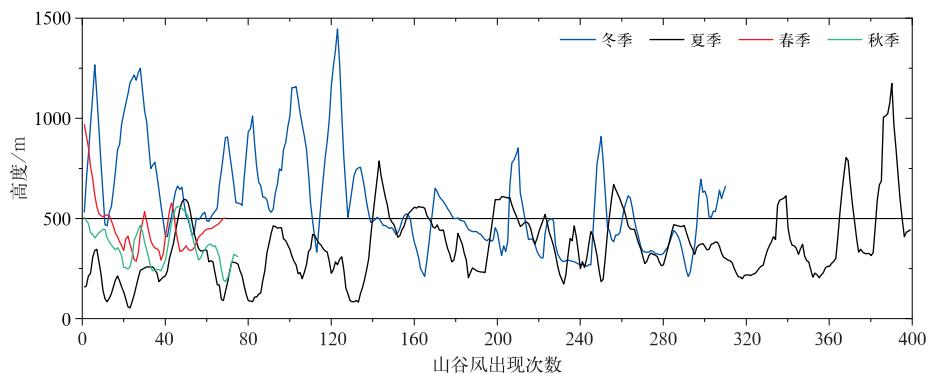


图 6 武夷山各季节山谷风环流在垂直方向风向切变的高度

Fig. 6 The height of vertical wind direction shear of mountain-valley wind circulation

高度附近,随着季节进程具有升高的趋势,夏季中后期,切变高度在 500 m 附近有所波动。春季和秋季出现山谷风日的频次较少,切变高度也在 500 m 附近。利用激光雷达技术探究山风阶段垂直高度上的风向切变特征,弥补了地面气象站等对高空风场信息获取的不足,增加了对山谷风垂直高度的认识,能够更好地应用于污染扩散等分析实际应用场景当中。

2.2 非山谷风出现的气象条件

武夷山市的特殊地势使得当地常年盛行山谷风,云层覆盖是使得山地与谷地热力差异减弱的重要因素。当出现大雾或降水天气过程时,空中被一定的云层覆盖,相对湿度较高,导致山地与谷地热力差异减小,热力差异减弱可能无法驱动山谷风形成。选用地面气象观测站的逐小时相对湿度数据对当地的湿度条件进行分析。由图 7a 可见,武夷山相对湿度整体偏高,相对湿度大于 60% 的天数占全年总天数的 80% 以上,湿度条件的年际差异较小,各湿度段分布相对稳定。图 7b 表明各季节山谷风日相对湿度整体偏高,其高值湿度段与全年的相对湿度分布相似。夏季,山谷风日出现的湿度条件差异较大,90%~100% 湿度段出现的频次最高。考虑武夷山特殊的地势条件,在夏季凌晨可能易出现大雾天气,大雾散去后,山地与谷地的热力差异可能再驱动山谷风的形成。夏季,40%~60% 湿度段下山谷风日出现频次可达 0.3,考虑夏季日照时长较长

(图 5b),温度较高,相对较干燥,有利于山谷风日形成。秋季和冬季,相对湿度分别集中在 40%~60%、60%~80%,春季则集中在 60%~80%。武夷山山谷风日出现时的湿度条件与相对湿度不是直接的线性关系,高湿度条件下也有山谷风的形成,考虑相对湿度是对大气整体潮湿程度的反映,可能受到季风、降水和大雾等气象因素影响较大,因此,仅通过不同季节的山谷风日出现时的湿度条件,难以对山谷风日与非山谷风日的气象条件差异进行直接评估。

地基激光雷达通过对气溶胶的垂直分布进行观测,来反演获取大气风场。云内含有的大量气溶胶粒子,使得激光束穿越较厚云层时能量快速衰减,导致探测高度受限。为了解决地基探测高度受限的问题,同时沿用激光雷达观测的高时空分辨率优势,选用星载激光雷达自高空向下的观测模式,利用地基和星载激光雷达观测融合,实现激光雷达技术对武夷山非山谷风日垂直各高度风场的观测分析。

本文利用 Aeolus 卫星与 PBL 激光雷达数据进行融合,实现对武夷山上空不同高度的风廓线观测。融合方式如下:首先,选取 Aeolus 卫星从武夷山上空过境的日期,在此基础上,根据地基测风激光雷达观测的风场结果,挑选出非山谷风日出现的日期,然后将有效垂直风场数据融合,并进行 10 点滑动平均,最终获得非山谷风日时,从近地面至高层大气的连续风廓线。发现,典型非山谷风日,低空风场可划分为两类:低空偏南风(2020 年 6 月 2 日和 15 日、7 月

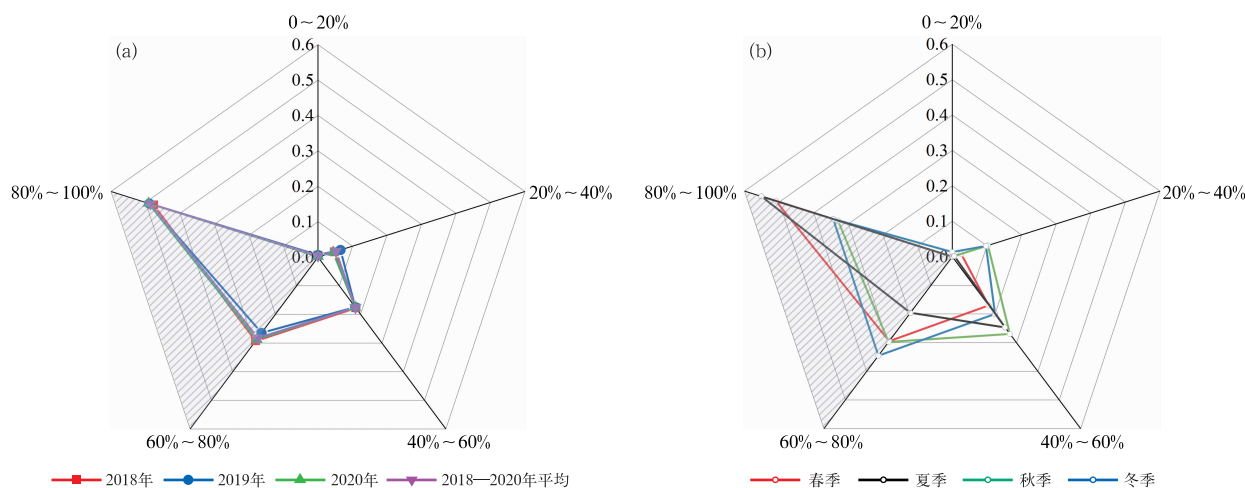


图 7 武夷山(a)2018—2020 年各年及三年平均和(b)2020 年 6 月至 2021 年 5 月各季节山谷风日的相对湿度出现频次

Fig. 7 Frequency of relative humidity of mountain-valley wind days of (a) the whole year from 2018 to 2020 and the average of three years, and (b) four seasons from June 2020 to May 2021

6日和7日);偏北风(2020年6月15日、2020年12月14日和15日、2021年1月26日)。

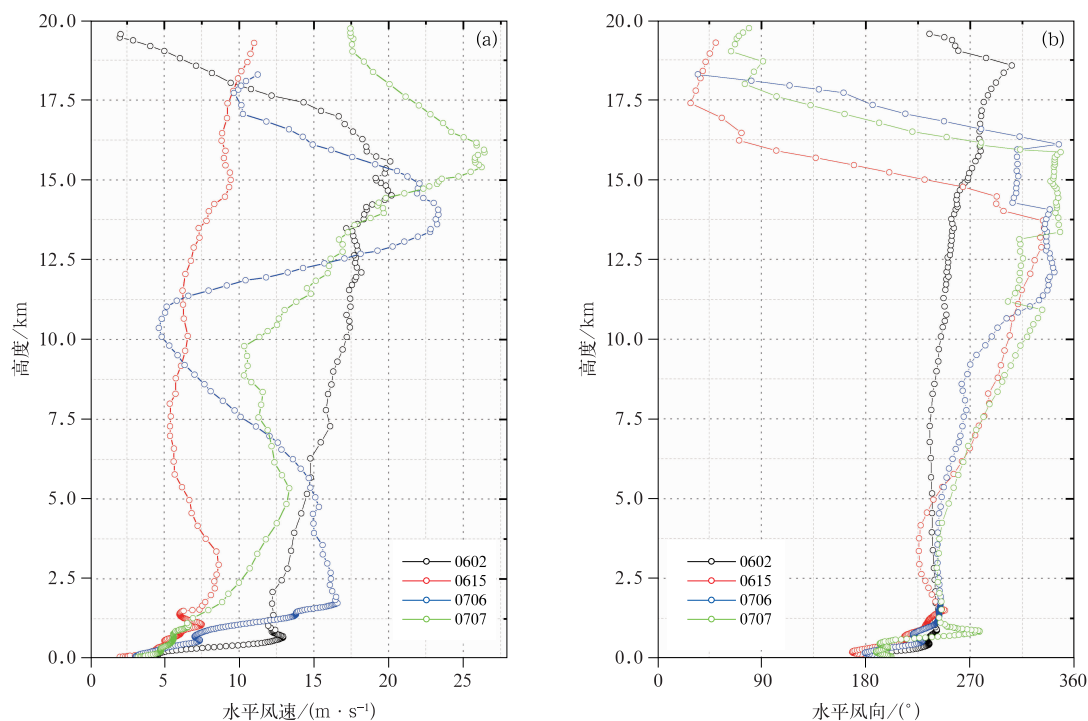
2.2.1 近地面偏南风

低空偏南风期间,地基激光雷达有效探测高度低于2 km,2 km以上的对流层中低层风场无法获取(图8),地基激光雷达与星载激光雷达的数据融合后可获取更高层大气的风场信息,得到较为完整的垂直风廓线。结果表明,低空为偏南风时,对流层中低层水平风向一致性较高(图8b),水平风速随着高度增大而增大(图8a)。对流层中高层,水平风速差异较大,水平风向一致性高,为西北风。地基激光雷达受空中气溶胶粒子浓度影响,使得其有效探测高度受影响,利用地基激光雷达的信噪比对气溶胶粒子随高度的分布特征进行分析。由图9可见,2020年6月2日,1~2 km高度,信噪比(图9a)的大值呈条带状分布,表明低空有云雾覆盖,云雾层较厚,高度贴近近地面,为夏季凌晨的大雾现象。随着太阳逐渐升高,雾层逐渐消散,垂直方向上的信噪比大值条带所在高度随时间呈“斜坡”式上升,10时,空中垂直气流(图9b)的下沉运动增强,空中信噪比大值迅速减小,垂直方向上大值出现断层,表明出现

降水过程,山谷风结构被破坏。6月15日(图9c)、7月6日(图9e),以及7月7日(图9g),1~2 km信噪比的大值为条带状分布,空中覆盖较厚云层,白天水平风速偏大,低空气流垂直运动较弱,强劲的垂直运动主要集中在云下,使得气流在山地与谷地之间的流动较弱;夜间云层覆盖使得辐射冷却效应减弱,低空为较弱的上升气流,山风无法形成。

2.2.2 近地面偏北风

图10表明,地基激光雷达观测到低空盛行偏北风时主要出现在冬季,与偏南风期间相比,低空水平风速偏小,在 $0\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对流层中高层风速显著增大。冬季,2020年12月14—15日,以及2021年1月26日(图10b),1.5 km高度以下以东北风为主,在对流层的中低层风向切变较强;夏季(6月8日)则为西北风,无显著风向切变(图10b)。地基激光雷达观测到低空为偏北风时,PBL激光雷达有效探测高度在1~2 km(图11),有效探测高度仍然偏低,6月8日,信噪比大值在空中呈现条带状分布(图11a),较稳定地覆盖在低空,使得信噪比大值上方激光回波信号很弱,空中有云雾层覆盖,08—14时,下沉气流增强(图11b),出现降水过程,17时起,降



注:不同颜色代表不同日期,如0602表示6月2日。

图8 近地面偏南风时地基和星载激光雷达观测融合的水平(a)风速和(b)风向廓线

Fig. 8 The curve profiles of (a) horizontal wind speed and (b) horizontal wind direction after the fusion of Aeolus satellite radar and PBL lidar at the time with southerly wind near the surface

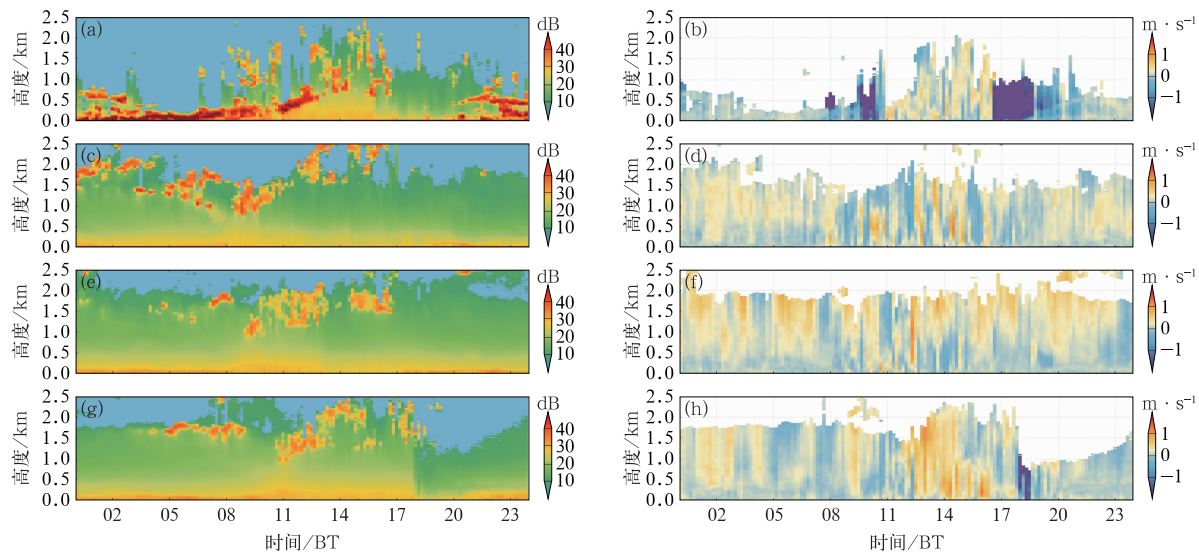
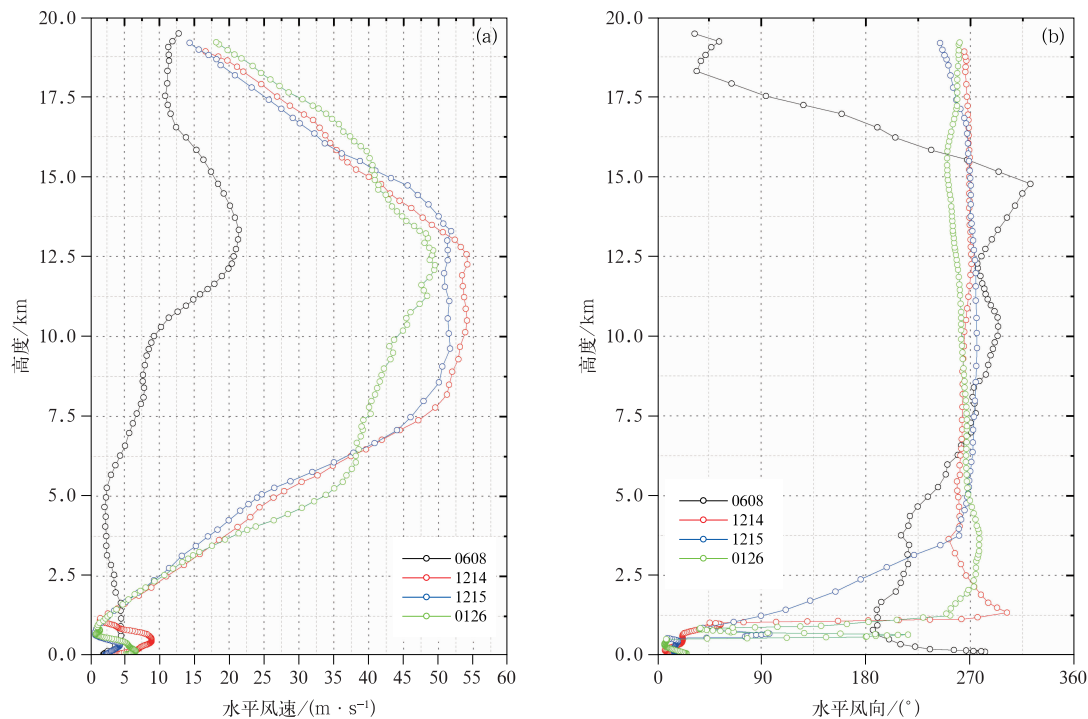


图 9 近地面偏南风时 PBL 激光雷达观测的(a,c,e,g)信噪比和(b,d,f,h)垂直速度的时间-高度剖面
(a,b)2020 年 6 月 2 日,(c,d)2020 年 6 月 15 日,(e,f)2020 年 7 月 6 日,(g,h)2020 年 7 月 7 日
Fig. 9 The time-altitude profiles of (a, c, e, g) SNR and (b, d, f, h) vertical velocity
observed by PBL lidar at the time with southerly wind near the surface
(a, b) 2 June 2020, (c, d) 15 June 2020, (e, f) 6 July 2020, (g, h) 7 July 2020



注:不同颜色代表不同日期,如 0608 表示 6 月 8 日。

图 10 近地面偏北风时地基和星载激光雷达观测融合的水平(a)风速和(b)风向廓线
. 10 The curve profiles of (a) horizontal wind speed and (b) horizontal wind direction after the fusion of
Aeolus satellite radar and PBL lidar at the time with northerly wind near the surface

水逐渐结束,1 km 高度出现信噪比大值条带,空中出现云层。融合所得风廓线表明 1.5~5.0 km 为

偏南风,输送水汽使得空中出现降水云,降水过程和低空云雾使得山谷风结构被破坏。12 月 14 日,

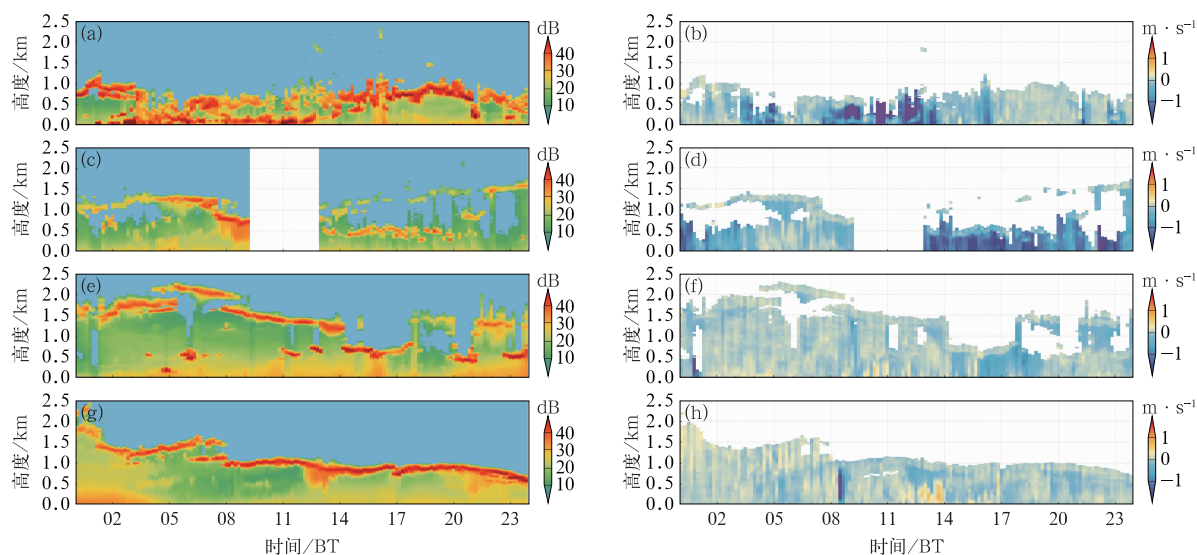


图 11 近地面偏北风时 PBL 激光雷达观测到的(a,c,e,g)信噪比和(b,d,f,h)垂直速度的时间-高度剖面

(a,b)2020 年 6 月 8 日,(c,d)2020 年 12 月 14 日,(e,f)2020 年 12 月 15 日,(g,h)2021 年 1 月 26 日

Fig. 11 The time-altitude profiles of (a, c, e, g) SNR and (b, d, f, h) vertical velocity

observed by PBL lidar at the time with northerly wind near the surface on

(a, b) 8 June 2020, (c, d) 14 December 2020, (e, f) 15 December 2020, and (g, h) 26 January 2021

00—09 时,1 km 高度附近出现显著的信噪比条带(图 11c),图 10b 显示,1~2 km 为西南风,其输送水汽使得空中形成低云,之后由于设备检修使得部分数据缺失;14 时,下沉气流增强(图 11d),降水过程使得气溶胶粒子浓度衰减显著,山地与谷地的热力差异减小,影响山谷风形成。12 月 15 日(图 11e)与 1 月 26 日(图 11g),云层在空中稳定覆盖,使得山地与谷地的昼夜热力差异变化较小,也影响了山谷风环流形成。

通过比较非山谷风日出现的两种低空风场表明,非山谷风日出现时,对流层中低层可能存在两种低空风向主导,但两种低空风场条件下,对流层中层均出现了稳定的偏南风,其输送水汽使得当地水汽条件充沛,PBL 激光测风雷达观测到空中的信噪比大值呈现条带状分布,空中出现水汽含量较大的云雾层,使得凌晨可能出现大雾天气,或白天强烈的对流活动触发降水等过程,导致山地与谷地的热力差异减弱,破坏山谷风热力结构。

3 结论与讨论

本文基于边界层测风激光雷达、地面气象观测站以及激光雷达卫星等数据,对武夷山地区的山谷风特征进行了分析,得出以下几个结论:

(1)山谷风日,大气具有显著日变化特征:山风阶段,以偏北风为主,风速较小,低空激光雷达回波信号较强,湍流发展较弱,以下沉气流为主;谷风阶段,以偏南风为主,风速较山风阶段有所增强,低空激光雷达回波信号较山风阶段减弱,湍流强度较强,以上升气流为主。

(2)谷风主要出现在 08—18 时,山风主要出现在 00—08 时以及 18 时至次日 00 时。

(3)山谷风日出现频次最多是在夏季,可占当季 50%以上,日照时间长且稳定,除了降水过程外,湿度条件相对较差。

(4)山风阶段,垂直方向上存在显著的风向切变环流圈,环流圈高度具有季节性特征。冬季最高,可达 1.0~1.5 km 高度,高度变化具有减小的趋势;其余三个季节环流圈在 500 m 高度附近,其中,夏季环流圈高度具有增大的趋势,春秋季节相对稳定。

(5)融合卫星激光雷达 Aeolus 与边界层测风激光雷达数据对非山谷风日的气象条件进行评估,非山谷风出现在对流层中低层的偏南风对水汽输送,使得当地被较厚云层覆盖或出现降水过程,气流的垂直交换剧烈,山地与谷地热力差异减小,热力驱动减弱使得山谷风无法形成。

本文基于激光雷达技术对武夷山山谷风特征进行了诊断,但受限于边界层测风激光雷达观测数据

的积累量,以及星载激光雷达的数据样本数,只选用了一年的边界层测风激光雷达和 Aeolus 卫星数据对武夷山谷风的基本特征进行分析,针对其他特殊气象条件下山谷风日特征的进一步评估,未来还需要更长时间的激光雷达观测数据进行更全面的诊断分析。

参考文献

- 湛芸,曹勇,孙健,等,2021.中央气象台精细化网格降水预报技术的发展和思考[J].气象,47(6):655-670. Chen Y, Cao Y, Sun J, et al, 2021. Progress of fine gridded quantitative precipitation forecast technology of National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6):655-670(in Chinese).
- 邓家铨,朱赛霞,郑敏,1989.不同地形边界层风场特性及山谷风污染气象个例分析[J].热带地理,(4):346-353. Deng J Q, Zhu S X, Zheng M, 1989. The characteristics of wind field within boundary layer of different topography and case analysis on pollution meteorology related to mountain-valley wind [J]. Trop Geogr, (4):346-353(in Chinese).
- 董丽萍,吴蕾,王令,等,2014.风廓线雷达组网资料初步对比分析[J].气象,40(9):1145-1151. Dong L P, Wu L, Wang L, et al, 2014. Preliminary comparison research of the wind profile radar network data[J]. Meteor Mon, 40(9):1145-1151(in Chinese).
- 董群,赵普生,王迎春,等,2017.北京山谷风环流特征分析及其对PM_{2.5}浓度的影响[J].环境科学,38(6):2218-2230. Dong Q, Zhao P S, Wang Y C, et al, 2017. Impact of mountain-valley wind circulation on typical cases of air pollution in Beijing[J]. Environ Sci, 38(6):2218-2230(in Chinese).
- 符娇兰,代刊,2016.基于CRA空间检验技术的西南地区东部强降水EC模式预报误差分析[J].气象,42(12):1456-1464. Fu J L, Dai K, 2016. The ECMWF model precipitation systematic error in the east of Southwest China based on the contiguous rain area method for spatial forecast verification [J]. Meteor Mon, 42(12):1456-1464(in Chinese).
- 付松琳,2021.星载气溶胶激光雷达的模拟仿真和反演算法应用研究[D].合肥:中国科学技术大学. Fu S L, 2021. Research on simulation and inversion algorithm of spaceborne lidar for aerosol [D]. Hefei: University of Science and Technology of China(in Chinese).
- 黄悦,陈斌,董莉,等,2021.利用星载和地基激光雷达分析2019年5月东亚沙尘天气过程[J].大气科学,45(3):524-538. Huang Y, Chen B, Dong L, et al, 2021. Analysis of a dust weather process over East Asia in May 2019 based on satellite and ground-based lidar[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):524-538(in Chinese).
- 贾春晖,窦晶晶,苗世光,等,2019.延庆-张家口地区复杂地形冬季山谷风特征分析[J].气象学报,77(3):475-488. Jia C H, Dou J J, Miao S G, et al, 2019. Analysis of characteristics of mountain-valley winds in the complex terrain area over Yanqing-Zhangjiakou in the winter[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):475-488(in Chinese).
- 鞠丽霞,王勤耕,张美根,等,2003.济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究[J].气候与环境研究,8(4):467-474. Ju L X, Wang Q G, Zhang M G, et al, 2003. A simulation of heat island circulation and mountain-valley breeze in Jinan[J]. Climatic Environ Res, 8(4):467-474(in Chinese).
- 刘超,花丛,张恒德,等,2017. L波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J].气象,43(5):591-597. Liu C, Hua C, Zhang H D, et al, 2017. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer[J]. Meteor Mon, 43(5):591-597(in Chinese).
- 孟丹,陈正洪,陈城,等,2019.基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J].气象,45(12):1756-1761. Meng D, Chen Z H, Chen C, et al, 2019. Research on wind changes at different heights in atmospheric boundary layer based on sounding wind data[J]. Meteor Mon, 45(12):1756-1761(in Chinese).
- 苗春生,高雅,王坚红,2015. HY-2 卫星近海面风场资料融合及在海上天气系统分析中的应用[J].海洋预报,32(4):12-22. Miao C S, Gao Y, Wang J H, 2015. Fusion of HY-2 satellite sea surface wind and the application in weather system analysis[J]. Mar Forec, 32(4):12-22(in Chinese).
- 齐亚琳,林明森,2012.数据融合技术在海洋二号卫星数据中的应用[J].航天器工程,21(3):117-123. Qi Y L, Lin M S, 2012. Application of the data fusion technique in HY-2 satellite data[J]. Spacecraft Eng, 21(3):117-123(in Chinese).
- 阮征,高祝宇,李丰,等,2017.风廓线雷达与天气雷达风廓线数据的融合及应用[J].气象,43(10):1213-1223. Ruan Z, Gao Z Y, Li F, et al, 2017. Integration and application of wind-profiles for wind profiling radar and weather radar[J]. Meteor Mon, 43(10):1213-1223(in Chinese).
- 王浩,易侃,杜梦蛟,等,2022.漂浮式激光雷达海上测风可靠性及影响因素研究[J].海洋预报,39(5):70-83. Wang H, Yi K, Du M J, et al, 2022. Research on the reliability and influencing factors of floating lidar for offshore wind measurement[J]. Mar fore, 39(5):70-83(in Chinese).
- 王强,王通,路继宁,2020. Fraunhofer 漂浮式雷达与固定式测风塔测试阶段结果对比[J].海岸工程,39(2):130-141. Wang Q, Wang T, Lu J N, 2020. Comparison of the data measured by Fraunhofer IWES buoy and fixed wind tower in testing stage[J]. Coastal Eng, 39(2):130-141(in Chinese).
- 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[J].气象,39(11):1431-1436. Wang X Y, Li D, Ren Y, et al, 2013. Preliminary analyses on application of wind profiler radar data to the landing process of Typhoon Saola[J]. Meteor Mon, 39(11):1431-1436(in Chinese).
- 汪自军,张扬,刘东,等,2021.新型多波束陆海激光雷达探测卫星技术发展研究[J].红外与激光工程,50(7):20211041. Wang Z J, Zhang Y, Liu D, et al, 2021. Research on the development of detection satellite technology in the novel multi-beam land and ocean lidar[J]. Infrared Laser Eng, 50(7):20211041(in Chinese).
- 吴进,李琛,马志强,等,2021.北京平原和延庆地区山谷风异同及对

- 污染的影响[J]. 环境科学, 42(10):4660-4668. Wu J, Li C, Ma Z Q, et al, 2021. Similarities and differences of valley winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and its impact on pollution[J]. Environ Sci, 42(10):4660-4668(in Chinese).
- 吴进, 李琛, 马志强, 等, 2022. 延庆地区山谷风对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响[J]. 中国环境科学, 42(1):61-67. Wu J, Li C, Ma Z Q, et al, 2022. Effect of mountain-valley wind on $PM_{2.5}$ concentrations in Yanqing Area[J]. China Environ Sci, 42(1):61-67(in Chinese).
- 易仕明, 陈奕隆, 1988. 观测高空风的新装备—风廓线雷达[J]. 气象, 14(11):3-8. Yi S M, Chen Y L, 1988. A new instrument for upper-wind measurements—wind profiler[J]. Meteor Mon, 14(11):3-8(in Chinese).
- 翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等, 2012. 机载激光测深技术研究进展[J]. 海洋测绘, 32(2):67-71. Zhai G J, Wu T Q, Ouyang Y Z, et al, 2012. The development of airborne laser bathymetry[J]. Hydrogr Surv Chart, 32(2):67-71(in Chinese).
- 周璇, 罗亚丽, 郭学良, 2015. CMORPH 卫星-地面自动站融合降水数据在中国南方短时强降水分析中的应用[J]. 热带气象学报, 31(3):333-344. Zhou X, Luo Y L, Guo X L, 2015. Application of a CMORPH-AWS merged hourly gridded precipitation product in analyzing characteristics of short-duration heavy rainfall over southern China[J]. J Trop Meteor, 31(3):333-344(in Chinese).
- Baker W E, Atlas R, Cardinali C, et al, 2014. Lidar-measured wind profiles; the missing link in the global observing system[J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(4):543-564.
- Gottschall J, Gribben B, Stein D, et al, 2017. Floating lidar as an advanced offshore wind speed measurement technique: current technology status and gap analysis in regard to full maturity[J]. WIREs Energy Environ, 6(5):e250.
- Gutleben M, Gro S, 2021. Turbulence analysis in long-range-transported Saharan dust layers with airborne lidar[J]. Geophys Res Lett, 48(18):e2021GL094418.
- Högström U, Asimakopoulou D N, Kambezidis H, et al, 1988. A field study of the wake behind a 2 MW wind turbine[J]. Atmos Environ(1967), 22(4):803-820.
- Reitebuch O, 2012. The spaceborne wind lidar mission ADM-Aeolus [M] // Schumann U. Atmospheric Physics. Berlin, Heidelberg: Springer:815-827.
- Rennie M, Tan D, Andersson E, et al. 2020. Aeolus Level-2B Algorithm Theoretical Basis Document, version 3. 40 [EB/OL]. (2020-07-16)[2022-11-07]. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Aeolus-L2B-Algorithm-ATBD.pdf>.

(本文责编:戴洋)