

船载大气多参数探测激光雷达研发及 黄东海走航观测研究

王章军^{1,3*}, 庄全凤¹, 李辉¹, 李昊¹, 刘冬², 陈超¹, 潘新³, 陈硕¹,
李传东¹, 薛博洋¹, 徐志军²

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛华航环境科技有限责任公司, 山东 青岛 266100;

3. 山东山科神光科技有限公司, 山东 青岛 266061)

摘要: 气溶胶和风场作为海上大气研究的重要参数, 实现其高精度测量具有重要意义。为实现海上大气气溶胶和风场的高时空分辨率走航观测, 研制了一套船载大气多参数探测激光雷达, 并详细介绍了该激光雷达的结构设计、探测原理、技术指标及反演方法。通过大气分子瑞利散射信号标定和风场观测对比测试, 验证了系统的观测性能及数据准确性。基于2024年8月搭载“鲁青渔教16”试验船在中国黄海、东海海域开展的海上低空大气多参数走航观测实验, 获取了观测期间0~10 km的气溶胶光学参数及0~5 km的风场信息。数据结果表明: 海上气溶胶浓度空间变化明显, 且存在低空气溶胶层及低空云; 海上低空大气风速基本在 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下; 边界层高度在1 km左右波动变化; 气溶胶、风速及风向在200 m、500 m、1 000 m等不同高度分布特征存在差异。实验证明, 该船载大气多参数探测激光雷达可搭载船舶、浮标等海洋平台, 高效实现海洋上空气溶胶与风场的连续精确观测。

关键词: 激光雷达; 气溶胶; 风场; 反演算法; 海上观测

中图分类号: TN958.; 98

文献标识码: A

Development of shipborne multi-parameter atmospheric lidar and navigation observations in the Yellow and East China Seas

WANG Zhang-Jun^{1,3*}, ZHUANG Quan-Feng¹, LI Hui¹, LI Hao¹, LIU Dong², CHEN Chao¹,
PAN Xin³, CHEN Shuo¹, LI Chuan-Dong¹, XUE Bo-Yang¹, XU Zhi-Jun²

(1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),
Qingdao 266061, China;

2. Qingdao Huahang Seaglet Environmental Technology Ltd., Qingdao 266100, China;

3. Shandong SCICOM Shengguang Technology Co. Ltd., Qingdao 266061, China)

Abstract: Aerosol and wind field are critical parameters for studying the marine atmosphere, of which the high-precision measurements are of great significance. To achieve high spatiotemporal resolution observations of atmospheric aerosols and wind fields over the ocean, a shipborne multi-parameter atmospheric lidar has been developed. A detailed description of the structural design, detection principles, technical specifications, and retrieval methodology of the lidar system has been presented first. The lidar system was then calibrated by atmospheric molecular Rayleigh tests and wind field observing comparison tests, for verifying its detection accuracy and characteristics. Towards real applications, the system was deployed aboard the “Luqing Yujiao 16” research vessel during August 2024 for mobile observations in the

收稿日期: 2025-03-28, 修回日期: 2025-07-17

Received date: 2025-03-28, Revised date: 2025-07-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2807202), 山东省重点研发计划(2022JMRH0102、2022CXPT020、2024TSGC0164), 青岛市自然科学基金(24-4-4-zrjj-124-jch), 国家自然科学基金(62401306、12204260), 山东省自然科学基金(ZR2022MD068)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFC2807202), the Shandong Province Key Research and Development Program (2022JMRH0102, 2022CXPT020, 2024TSGC0164), the Natural Science Foundation of Qingdao (24-4-4-zrjj-124-jch), the National Natural Science Foundation of China (62401306, 12204260), the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2022MD068)

作者简介 (Biography): 王章军 (1982—), 男, 山东莘县人, 研究员, 博士, 主要研究领域为海洋光学与激光探测技术. E-mail: zhangjunwang@qlu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhangjunwang@qlu.edu.cn

Yellow and East China Seas. During the aboard experiments, the aerosol optical parameters within the height range of 0-10 km and wind field information of 0-5 km were obtained online. The results show that the aerosol concentrations over the ocean vary significantly in different areas, and the lidar system even captures low-level aerosol layers and low-level clouds. Furthermore, the atmospheric wind speed over the ocean remains lower than $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ at low heights; meanwhile, the height of the boundary layer fluctuates near 1 km; when comparing the time-resolved profiles at typical heights, the aerosol optical parameters, wind speed and wind direction exhibit distinct temporal evolution patterns among different height layers such as 200 m, 500 m and 1 000 m. It is demonstrated that the shipborne multi-parameter atmospheric lidar can perform as an effective tool for accurate, continuous, and online monitoring of the critical atmospheric parameters over the ocean by combining with advanced marine platforms.

Key words: lidar, aerosol, wind, retrieval algorithm, offshore observation

引言

大气气溶胶在地球辐射收支平衡和全球气候变化的研究中占有重要地位^[1],不仅能通过吸收和散射太阳短波辐射与地球长波辐射直接改变地球辐射收支平衡,还能改变云微物理特性和云量进而间接影响气候^[2]。与此同时,大气风场是大气中能量传播和物质交换最普遍的途径,是驱动水汽、气溶胶输运、碳循环以及海气交换的主要动力,是影响环境气候变化的主要因素之一^[3]。因此,实现气溶胶和风场的高精度测量具有重大科学意义。

我国濒临西太平洋,拥有超过 1.8 万公里海岸线和近 300 万平方公里海域管辖面积,约占陆地总面积的三分之一,且沿海地区经济发达、人口稠密。要深入、全面了解海上大气环境因素对沿海气候和空气质量的影响,研究海气相互作用、海洋资源开发、陆地污染物传输、相态变化等关键科学问题,亟需对海上大气气溶胶和风场等要素进行高精度、高时空分辨率探测^[3]。然而,常规的海上气溶胶与风场监测手段,以沿海定点观测和船舶走航定点采样为主,难以通过单次观测获取大时空尺度的海上气溶胶和风场分布特征。激光雷达是获取大气气溶胶和风场等参数的主动遥感设备之一,具有高时空分辨率的优势,突破了传统单点监测的局限,近年来被广泛应用于大气观测的研究,并可搭载于车、船、飞机等移动平台进行走航实验,实现连续观测,例如气溶胶激光雷达^[4-8]、相干多普勒测风激光雷达^[9-13]等。

国际上,已有研究机构将激光雷达搭载于科考船开展海洋大气观测研究。例如,日本海洋科学技术中心(JAMSTEC)利用双波长偏振米散射激光雷达,以 MIRAI 号科研考察船为船载平台,先后于 2001 年 MR01K05 航次、2004 年 MR04K07、MR04K08 航次和 2006 年 MR06K05 航次对热带太平

洋海域开展了多航次观测,揭示了走航海域海洋大气气溶胶与云的时空分布特征,为印证卫星遥感结果和全球气候变化数值模拟提供了原始数据^[14];法国研究团队 LACy (Atmosphere and Cyclone Lab) 在印度洋南部海域利用船载激光雷达对气溶胶光学特性与时空分布进行遥感探测研究^[15];德国莱布尼兹对流层研究所将其研制的小型多波长拉曼偏振激光雷达 Polly^{XT} 部署于科研调查船 Polarstern 号,于 2009 年在大西洋海域开展了三个航次的观测实验^[16],2013 年又将 Polly^{XT} 安装于科研调查船开展了近一个月的海上观测实验,获得了撒哈拉沙漠沙尘在海上长距离传输过程中光学特性垂直分布变化情况^[17]。

近年来,国内学者也积极开展中国近海海域的激光雷达观测研究。例如,Wang 等人研制了一套多波长气溶胶激光雷达,于 2014 年搭载“向阳红 8 号”科考船对胶州湾附近海域开展了海上走航观测实验,获得了海上气溶胶分布情况^[18],并后续对系统升级优化,于 2015 年在黄海海域进行了海上走航观测实验,利用反演得到的气溶胶光学特性与太阳光度计光学厚度进行对比分析,显示了良好的一致性^[19];王东祥等人于 2014 年利用一套相干多普勒激光雷达在渤海海域进行观测实验,利用其信噪比廓线数据反演得到海上大气边界层结构,并与同步的探空仪数据、Vaisala 商业化的 CL31 型云高仪边界层高度进行对比^[20];Chen 等人利用一套扫描式微脉冲激光雷达于 2015 年开展黄海海域上空观测实验,分析了海雾事件、卷云、边界层、扫描观测结果等^[21];曾宪江利用一套可用于水平方向大气气溶胶探测的激光雷达,于 2016 年搭乘“东方红 2 号”科考船在渤海海域进行了为期 25 天的实地海洋环境水平方向气溶胶探测实验,分别对晴朗、薄雾、阴雨天气下的水平大气气溶胶进行了观测^[22];王琪超等

人利用小型化机载多普勒激光雷达于2016年在广东省海陵岛近岸海域开展无人直升机载激光雷达海上风场观测实验,并将实验结果与陆基多普勒激光雷达观测结果进行了比对^[23];Jin等人利用一台相干多普勒测风激光雷达于2021年5月17日至6月5日期间,在渤海进行走航观测实验,利用观测数据结合WRF,估算渤海大气边界层湍流参数^[24]。

现有激光雷达系统大多专注于单一参数观测,能够对海上大气气溶胶和风场进行同步立体观测的设备仍较为匮乏。为此,山东省科学院海洋仪器仪表研究所研制了一套船载大气多参数探测激光雷达,可快速部署于调查船、浮标等海上移动平台,对海上大气气溶胶和风场进行高时空分辨率、同步立体观测。本文将详细介绍该系统的结构设计、探测原理、技术指标、反演方法,并重点分析其在黄海、东海海域走航观测的实验数据与结果。

1 船载大气多参数探测激光雷达

船载大气多参数探测激光雷达采用光-机-电一体化设计,集成了大气气溶胶激光探测模块及全光纤大气风场激光探测模块,并配备高精度、高响应的惯性导航单元(IMU)和卫星导航组合姿态运动测量设备,可实时校正船舶引起的姿态偏差。开发了激光雷达系统控制、数据采集与反演软件,便于快速适配调查船、浮标等海上移动平台。船载大气多参数探测激光雷达结构原理如图1所示,系统观测模式如图2所示,能够实现对气溶胶和风场的同步立体观测。系统主要技术指标如表1所示。

其中,大气气溶胶激光探测模块基于Mie散射原理,实现对大气气溶胶时空分布特征、光学特性

的观测与研究。该模块由激光发射单元、光学接收单元以及信号采集与处理单元构成。选用532 nm脉冲激光为探测光源,发射激光经反射镜发射入大气,其与大气相互作用产生的回波信号由接收望远镜收集,如图1所示,回波信号依次经过小孔光阑(PH)、准直透镜(L1)后,由偏振分光棱镜(PBS)分离为平行偏振分量与垂直偏振分量。两分量信号分别进入平行偏振通道与垂直偏振通道,经干涉滤波片(IF)与会聚透镜(L2、L3)后,由光电倍增管(PMT)转换为电信号,最终由双通道信号采集卡实现同步数据采集。通过优化光路结构、一体化封闭设计,该模块可全天时稳定运行,同时能够对本身的饱和度、发射接收光轴的重合度等参数进行自动检测,确保观测数据的可靠性。

全光纤大气风场激光探测模块基于光的多普勒效应,通过向大气中发射激光并检测回波信号的多普勒频移,从而获得大气风场信息。采用近红外1550 nm单频激光作为探测光源,具有抗干扰性强、人眼安全等特点,主要包括发射单元、接收单元、数据采集及控制单元和三维扫描装置等四个主要功能单元。如图1所示,发射单元主要由种子激光器、声光移频器、脉冲放大器、保偏光纤耦合器和光纤环形器组成,种子激光器(seed laser)产生的单纵模单频连续激光经1×2的单模保偏光纤分束器(splitter)分为两路:一路为本振光,另一路经声光调制器(AOM)产生80 MHz的频移偏量并进行脉冲调制。调制后激光脉冲经过光纤放大器(EDFA)放大,输出窄线宽、高功率的脉冲激光束。接收单元的光学天线接收到回波信号后,传输至2×2保偏光纤耦合

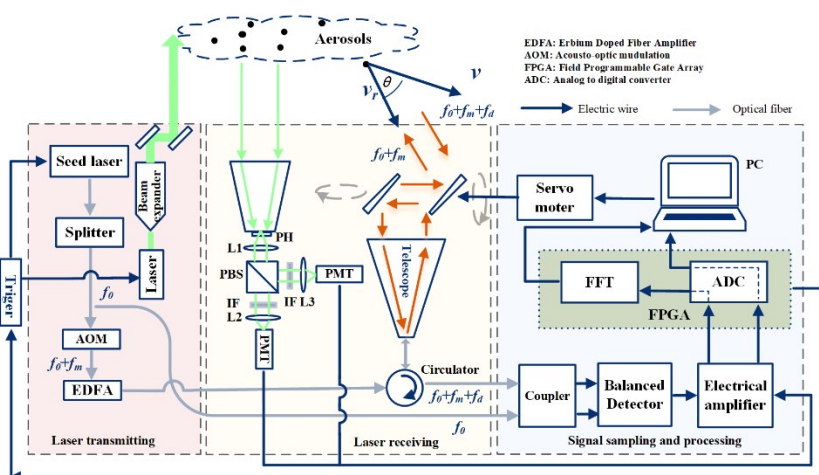


图1 船载大气多参数探测激光雷达结构原理图

Fig. 1 Schematic of shipborne multi-parameter atmospheric lidar

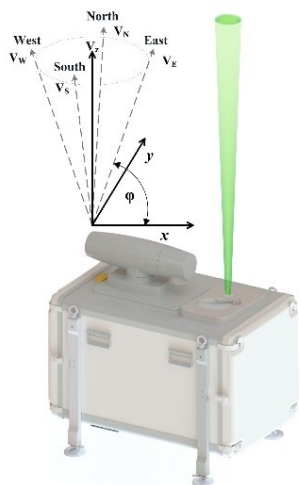


图2 船载大气多参数探测激光雷达观测模式
Fig. 2 Observation model of shipborne multi-parameter atmospheric lidar

表1 船载大气多参数探测激光雷达技术参数
Table 1 Technical parameters of shipborne multi-parameter atmospheric lidar

名称	参数
大气气溶胶激光探测模块	
激光器类型	LD-pumped Nd:YAG
发射波长	532 nm
平均功率	≤2 W
脉冲宽度	≤10 ns
望远镜类型	Schmidt-Cassegrain
接收口径	≤200 mm
视场角	500 μrad
干涉滤光片带宽	≤0.3 nm
距离分辨率	3.75 m
探测范围	≥10 km
大气风场激光探测模块	
激光波长	1 550 nm
激光脉冲能量	≥100 μJ
脉冲宽度	200 ns
重复频率	10 kHz
测速范围	0 ~ 75 m·s ⁻¹
最大测量距离	≥5 km
风速测量精度	≤0.5 m·s ⁻¹
3D 扫描	水平扫描范围(PPI):0°~360° 俯仰扫描范围(RHI):0°~180°
扫描方式	定点/PPI/RHI/DBS等(可自定义扫描模式,可定时启动扫描模式)
指向精度	<0.1°

器的输入端口1,在此与本振光发生相干拍频,拍频信号通过光纤传输到平衡探测器完成光电转换。

为适应海上复杂环境,接收单元采用具备防水、防尘、防盐雾能力的高透射率光学窗口,配合全封闭式转镜伺服扫描结构,通过方位角扫描实现风廓线测量。

2 数据校正及反演方法

2.1 移动平台姿态校正与运动补偿算法

在相干激光测风雷达理论中,多普勒波束摆动(Doppler Beam Swing, DBS)扫描模式是实现风场反演的关键核心技术,在该模式下,激光雷达以特定角度发射激光脉冲,大气中的气溶胶粒子散射激光脉冲,通过分析气溶胶粒子后向散射信号的多普勒频移实现反演径向风速。但在船载测量环境中,船体会产生三个姿态角(航向角、俯仰角、翻滚角)的变化和三个方向的直线运动(东向速度、北向速度和天向速度),这些不规则的运动会导致激光雷达测量产生误差,直接影响探测精度,具体的来源包括船体速度、雷达扫描波束角度偏移、各扫描波束径向距离不一致等。

为精准获取水平风速与风向,需要进行移动平台姿态校正与运动补偿。船载大气多参数探测激光雷达通过高精度和高响应度的惯导系统,实时测量船体的姿态角和运动速度,对船载雷达测量的各扫描方向的径向角度与速度进行校正,补偿船体运动带来的测量误差,进而采用空间矢量合成算法反演得到准确的风廓线。具体流程如图3所示。

运动补偿主要包括径向风速校正、测量高度位置校正,其中:

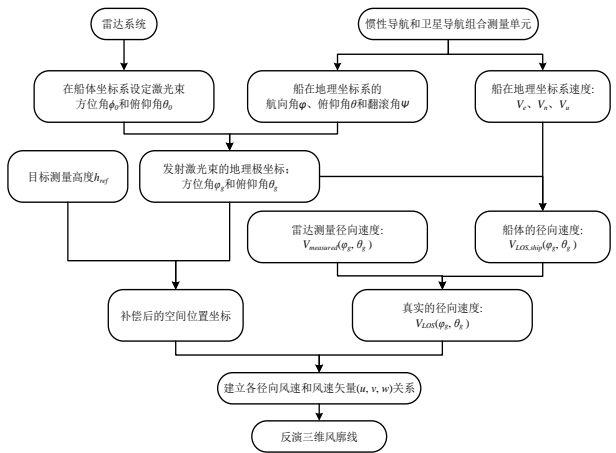


图3 船载大气多参数探测激光雷达数据姿态校正和风速反演流程图

Fig. 3 Flow chart for attitude correction and inversion for data detected by shipborne multi-parameter atmospheric lidar

(1) 径向风速校正。船体的姿态角和运动速度测量是径向风速数据补偿的基础, 姿态角和运动速度测量的实时性和准确性直接决定着补偿后水平风速和风向的准确性。该系统采用惯性导航 IMU 和卫星导航组合的姿态运动测量设备, 获取激光雷达在地理坐标系中的姿态信息和速度信息, 实时计算地理坐标系中激光雷达的真实指向。 V_e 、 V_n 、 V_u 分别表示船体的东向速度、北向速度和天向速度; φ_0 和 θ_0 分别表示激光发出的光束在船体坐标系中的方位角和俯仰角。激光光束在船体坐标系中的矢量表示:

$$r_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_0 \cos \varphi_0 \\ \cos \theta_0 \sin \varphi_0 \\ -\sin \theta_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

激光光束在地理坐标系中的矢量表示:

$$r = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (H_1 H_2 H_3)^{-1} \quad (2)$$

H_1 、 H_2 和 H_3 分别表示航向角 φ 、俯仰角 θ 和翻滚角 ψ 的变换矩阵:

$$H_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, H_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$H_3 = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

激光光束在地理坐标系中的方位角 φ_g 和仰角 θ_g 分别表示为:

$$\varphi_g = \tan^{-1}(y/x) \quad (4)$$

$$\theta_g = -\sin^{-1} z \quad (5)$$

根据方位角 φ_g 和仰角 θ_g , 将船体的运动速度进行矢量分解, 投影到径向方向上得到船体的径向速度 $V_{\text{LOS, ship}}(\varphi_g, \theta_g)$, 补偿雷达测量的径向风速 V_{measured} 中的船体引起的径向分量 $V_{\text{LOS, ship}}$, 即为校正后的径向风速:

$$V_{\text{LOS}}(\varphi_g, \theta_g) = V_{\text{measured}}(\varphi_g, \theta_g) + V_{\text{LOS, ship}}(\varphi_g, \theta_g) \quad (6)$$

(2) 测量高度位置校正。径向距离 R 是激光雷达与测量点之间的直线距离, 船体的姿态变化导致东西南北四个波束相对地理坐标系的俯仰角不同。在反演风速矢量时, 需要根据观测的高度和每一波束地理坐标系下的俯仰角, 计算得到每一波束的径向距离。然后对径向风速进行插值, 以确保所有测量点在同一高度上进行风速

反演。

首先确定测量点的空间坐标, 对于每个方向的测量点, 通过径向距离 R 和扫描角度(方位角 φ_g 和仰角 θ_g) 得到其空间坐标, 如图 4 所示。设定激光雷达测量的目标高度 h_{ref} , 将所有测量 (x, y, z) 点校正到该高度。对于每个测量点, 根据目标高度 h_{ref} 重新计算测量点的空间坐标 $(x_{\text{corr}}, y_{\text{corr}}, h_{\text{ref}})$:

$$x_{\text{corr}} = \frac{h_{\text{ref}}}{\tan \theta} \cos \varphi_g \quad (7)$$

$$y_{\text{corr}} = \frac{h_{\text{ref}}}{\tan \theta} \sin \varphi_g \quad (8)$$

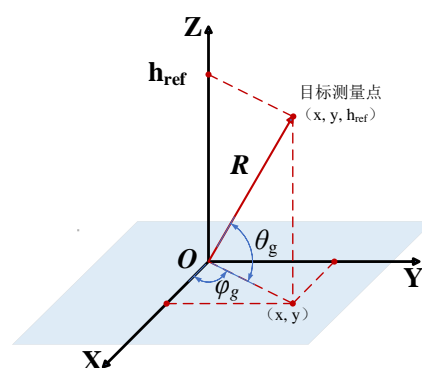


图 4 激光雷达极坐标和测量点坐标投影

Fig. 4 Polar coordinate and measurement point coordinate projection of lidar

2.2 风场反演方法

系统利用 DBS 扫描模式测量风廓线时, 采用空间矢量合成算法, 如 2.1 节所述, 在校正后的空间坐标下, 基于补偿后的东、西、南、北、垂直方向的径向风速进行风速反演, 从而得到准确的风速矢量信息。假设测量的三维风场的同一高度上大气状态均匀不变, 激光分别在垂直方向和以一定的仰角在东、南、西、北方向进行测量得到径向风速, 分别表示为 V_{losZ} 、 V_{losE} 、 V_{losS} 、 V_{losW} 、 V_{losN} 。径向风速是风场中垂直风速和水平风速在各个径向方向的矢量合成, 将大气风场看作一个 u - v - w 坐标系, 激光束与水平面的夹角为 θ , 则对大气风场进行矢量分解, 可表示为^[25]:

$$\begin{aligned} V_{\text{losE}} &= v \cos \theta + w \sin \theta \\ V_{\text{losS}} &= -u \cos \theta + w \sin \theta \\ V_{\text{losW}} &= -v \cos \theta + w \sin \theta \\ V_{\text{losN}} &= u \cos \theta + w \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

通过计算上式, 可以得到大气风场的水平分量 u 、 v 和垂直分量 w 的表达式为:

$$\begin{aligned} u &= \frac{V_{\text{losN}} - V_{\text{losS}}}{2 \cos \theta} \\ v &= \frac{V_{\text{losE}} - V_{\text{losW}}}{2 \cos \theta} \\ w &= V_{\text{losZ}} \end{aligned} \quad (10)$$

再通过矢量合成的方法求得水平风速和风向,其中水平风速值 \bar{V} 为南北分量和东西分量的平方和的根,即:

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (11)$$

合成风矢量方向可表示为:

$$\alpha = \left| \tan^{-1} \frac{\bar{v}}{\bar{u}} \right| \quad (12)$$

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z') \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz'' \right] dz'} \quad (14)$$

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz' \right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z_c)} - 2 \int_z^{z_c} X(z') \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z'') dz'' \right] dz'} \quad (15)$$

其中,下标 a、m 分别表示气溶胶与大气分子, $X(z) = P(z) \cdot z \cdot z$, 分子消光系数 α_m 可根据美国标准大气分子模式精确计算, S_m 、 S_a 分别为分子和气溶胶的消光散射比, $S_m = \alpha_m(z) / \beta_m(z) = 8\pi/3$ 可由理论计算得到, S_a 的取值取决于发射激光的波长、气溶胶的尺度谱分布、折射指数和地理位置,取值范围一般在 10~100 sr 之间。相比于气溶胶或云粒子,大气分子的性质比较稳定,标定高度 z_c 的设定可选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度(大气介质仅被视为分子),如视大气状况选定在 10 km 或其他高度,在参考高度气溶胶消光系数临界值可由 $1 + \beta_a(z_c) / \beta_m(z_c) = 1.01$ 确定。

大气多参数探测激光雷达系统的气溶胶探测模块两个接收通道的信号可分别由激光雷达方程式(16)和(17)描述:

$$P_p(z) = \frac{k_p P_0 A_r \beta_p(z)}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right], \quad (16)$$

$$P_s(z) = \frac{k_s P_0 A_r \beta_s(z)}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right]. \quad (17)$$

两个信号分量的比经过校正系数 K 校正后,可获得大气粒子的退偏振比 $\delta^{[27]}$:

需要注意,由于风矢量方向 α 是在 0° 到 360° 之间变化的,根据矢量所在的象限判断风向:若 $u \geq 0, v \geq 0$, 则 α 的值不变; $u \leq 0, v \geq 0$, 则 $\alpha = 180^\circ - \alpha$; $u \leq 0, v \leq 0$, 则 $\alpha = 180^\circ + \alpha$; $u \geq 0, v \leq 0$, 则 $\alpha = 360^\circ - \alpha$ 。另外,由于习惯上风向是风吹来的方向,因此真实的风向 Dir 和风矢量 α 的方向相差 180° ,在处理过程中需要加 180° ,即:

$$\text{Dir} = \alpha + 180^\circ \quad (13)$$

2.3 气溶胶光学参数反演方法

利用 Fernald 反演算法^[26]计算气溶胶消光系数时,标定高度 z_c 以下高度(后向积分)和 z_c 以上高度(前向积分)的消光系数表达式分别为:

$$\delta(z) = K \frac{P_s(z)}{P_p(z)} \quad (18)$$

2.4 大气边界层及云高反演方法

利用激光雷达数据反演边界层高度,常用方法主要有梯度法^[28]、小波法^[29]和拟合法^[30]等,由于拟合法主要适用于激光雷达廓线结构简单的情况,而小波法与梯度法的计算原理较接近,因此常用相对简便的梯度法进行大气边界层高度的反演。梯度法主要利用边界层气溶胶浓度的变化特点,激光雷达信号廓线的梯度在边界层顶会出现一个强的负峰值。

采用距离平方校正信号的第一归一化梯度法^[31]进行边界层高度的反演,边界层高度即为梯度最小值对应的高度。根据定义,可表示为:

$$D(z) = \frac{\Delta X(z)}{\Delta z \cdot X(z)} \quad (19)$$

云是影响大气性质的重要参数之一,对云特征参数的准确获取在气象观测中有重要作用。利用信号梯度变化可以进行云底高度的判断,当激光与云层相互作用时,大气回波值会出现幅值增大现象,此时回波信号的斜率 $dP(z)/dz$ 将由负变正,云底高度可通过微分零交叉法^[32]计算获得。

3 实验标定测试

船载大气多参数探测激光雷达研制完成后,在实验室及外场开展了系统调试和优化工作,重点围绕光路精密校准、机械结构稳定性改进展开,并对系统观测数据进行了严格的标定与验证。

3.1 大气分子瑞利散射信号标定

在有气溶胶或者云存在的高度,米散射回波信号会明显增强,而没有气溶胶存在时回波信号主要是由分子散射引起,因此应与分子瑞利散射信号的变化一致。利用激光雷达在清洁大气条件下获取的分子散射信号与标准大气分子瑞利散射理论信号比对,验证系统探测信号的准确性。选取2024年5月5日21:30的观测数据进行分析,此时大气相对清洁,标定条件理想,图5为532 nm平行与垂直偏振通道实测回波信号与其对应波长的标准分子瑞利信号廓线的对比结果。从图5的回波信号分布可以看出,系统探测性能良好,有效探测高度大于10 km,低空气溶胶主要分布在3 km以下,此时回波信号明显高于分子瑞利信号,说明米散射强于瑞利散射,而3 km以上实测回波信号与理论分子瑞利信号一致性较好,显示此处大气清洁,以大气分子瑞利散射为主。

3.2 风场观测标定测试

为验证船载大气多参数探测激光雷达的风场探测精度,课题组于2024年6月11日至15日,与一台商用相干多普勒测风激光雷达(型号:WindPrint S4000,许可证编号: SXZ-106-2023)进行了比对观测实验。为确保数据可比性,两台设备进行了精确

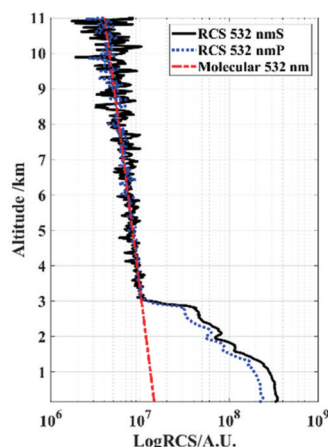


图5 船载大气多参数探测激光雷达实测回波信号与标准分子瑞利信号对比廓线

Fig. 5 Comparison profile of measured echo signal by shipborne multi-parameter atmospheric lidar and standard molecular Rayleigh signal

的时间同步与方位对准,并采用相同的扫描模式进行同时、同地、同步观测。

以比对期间某一典型时刻的观测结果为例,由图6可以看出,两台设备的风速、风向及垂直风速观测结果在5 km有效探测高度范围内表现出高度一致性,其中风速的相关系数为0.994,标准差为 $0.513 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;风向的相关系数为0.992,标准差为 5.756° ;垂直风的相关系数为0.926,标准差为 $0.137 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

剔除比对观测实验期间受降水、云层等天气条件干扰的数据后,共获得风速、风向及垂直风比对数据点20237对。风速比对结果如图7(a)所示,风

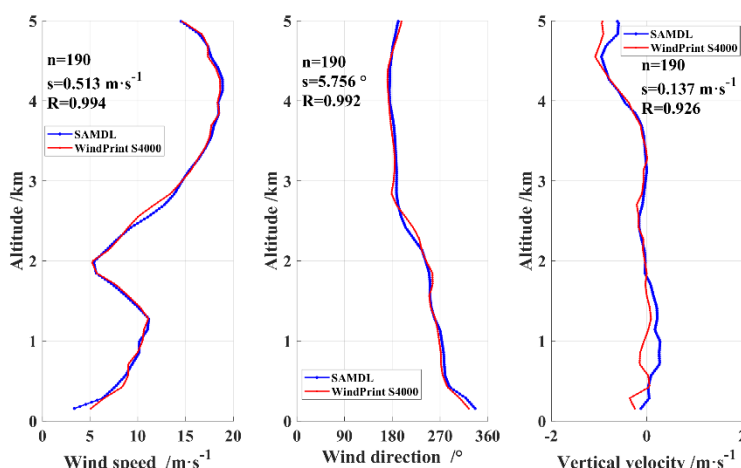


图6 船载大气多参数探测激光雷达与WindPrint S4000测风结果比对廓线:(a) 风速;(b) 风向;(c) 垂直风速:(a) (b) (c)

Fig. 6 Comparison profile of wind detection data acquired by shipborne multi-parameter atmospheric lidar and WindPrint S4000: (a) wind speed; (b) wind direction; (c) vertical velocity

速相关系数为 0.985, 标准差为 $0.327 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 风向比对结果如图 7(b) 所示, 风向相关系数为 0.978, 标准差为 6.531° ; 图 7(c) 为两设备垂直风比对结果, 相关系数为 0.926, 标准差为 $0.201 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。比对结果表明, 船载大气多参数探测激光雷达的风场观测数据具有较高的精度和可靠性。

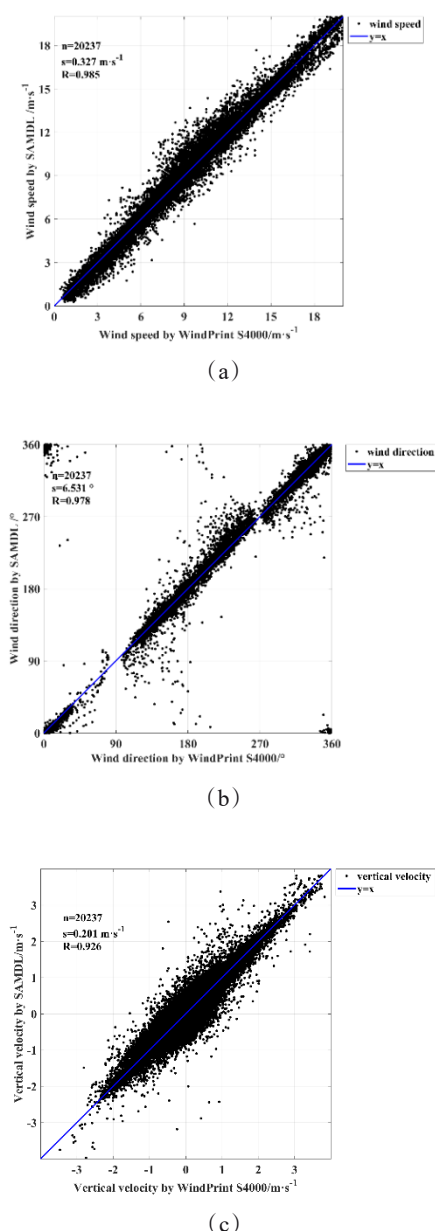


图7 船载大气多参数探测激光雷达与 WindPrint S4000 测风结果比对数据统计结果图: (a) 风速; (b) 风向; (c) 垂直风速
Fig. 7 Statistical results of wind detection data acquired by shipborne multi-parameter atmospheric lidar and WindPrint S4000: (a) wind speed; (b) wind direction; (c) vertical velocity

4 海上观测实验及数据分析

4.1 海上观测实验概况

海上大气气溶胶与风场的高精度观测, 对海洋环境监测、海上风电开发规划及海气相互作用研究具有重要价值。为验证船载大气多参数探测激光雷达在真实海洋环境下的探测性能, 2024年8月6日至15日, 该系统搭载“鲁青渔教16”试验船, 沿青岛至台州航线开展了为期10天的海上走航连续观测实验。实验期间, 该系统在海上复杂环境下运行稳定, 实现对海洋上空气溶胶光学特性与三维风场的实时、同步、连续探测。海上实验现场及走航轨迹如图8所示。

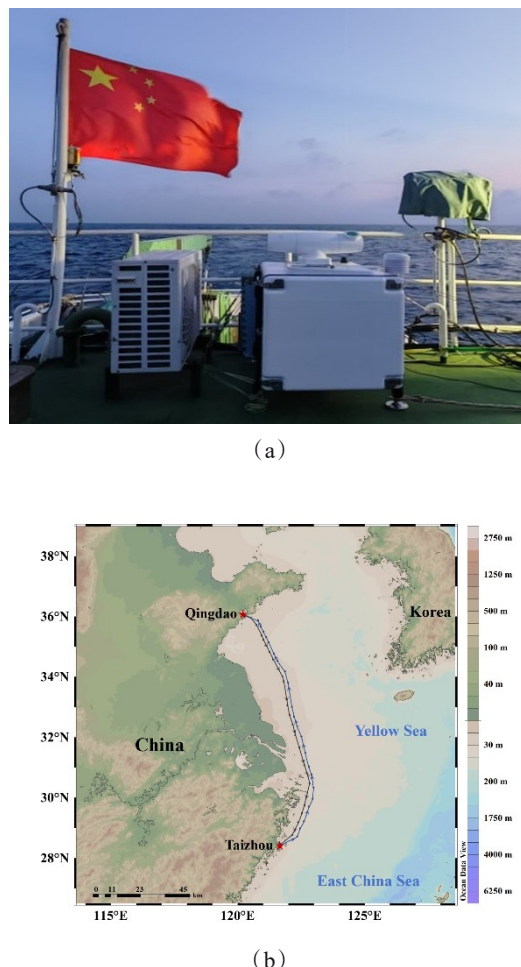


图8 船载大气多参数探测激光雷达海上观测实验: (a) 实验场景; (b) 航迹图

Fig. 8 Observation experiment at sea of shipborne multi-parameter atmospheric lidar: (a) experimental scenarios; (b) track map

4.2 数据分析

4.2.1 大气气溶胶和风场时空分布特性

在2024年8月6日至15日间海上走航观测实验中,系统连续获得了10天的观测数据。为直观呈现气溶胶和风场随时间与高度的动态变化,将数据绘制成时间-高度-强度(Time-Height-Intensity, THI)分布图。

气溶胶时空分布特征如图9所示,包括回波信号强度、消光系数、退偏振比。结果显示,观测期间大气结构相对稳定,但气溶胶空间变化明显,且存在明显的低空气溶胶层及低空云。低空气溶胶浓度较低,消光系数基本小于 0.2 km^{-1} ,退偏振比低于0.1,符合典型的海洋性气溶胶特征^[33];8月7日、8日、9日均观测到高度超过3 km的云层,对应消光系数大于 1 km^{-1} ,且其退偏振比数值存在大于0.3的情况,表明云中可能存在冰晶粒子^[34]。

风场时空分布观测结果如图10所示,包括风速、风向和垂直风。结果显示,观测期间海上低空风速基本维持在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,垂直风基本分布在 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 至 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,表明大气对流活动较弱;8月12日、13日期间风速显著变小(低于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),并伴随主导风向由北风转为南风,对应图8此变化期间的气溶胶浓度呈现显著上升,推测原因可能是船舶靠近沿岸区域,受陆源气溶胶输送的影响。

由于降水及伴随的低云结构会对激光造成严重的衰减,在降水环境下激光雷达的探测能力往往大大受限,但是在适宜条件下激光雷达仍能捕获降雨过程。以8月8日的一次降雨过程为例,从图9~10均可以看出,14:00~16:00回波信号显著增强,对应一次降雨过程,此次降雨过程持续时间约为2小时。如图9所示,降雨时大气中大量雨滴存在导致后向散射回波信号强度变大(图9(a)),而雨滴也使激光能量衰减加剧,导致消光系数有显著增大(图9(b)),同时低空退偏振比也出现增大并高于0.1(图9(c)),这与雨滴破裂有关^[35]。如图10所示,降雨期间风速增大,特别地,1 km以上高度出现高于 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速(图10(a)),风向由东北风变为南风、西南风为主(图10(b)),而图10(c)显示垂直风也明显变大,出现低于 $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数值,水平风与垂直风的变大都会加剧降雨过程中雨滴的破裂。

4.2.2 大气边界层高度及云高

基于2.4节所述算法,对观测期间数据进行处理,获得了大气边界层高度及云高的时序变化(图

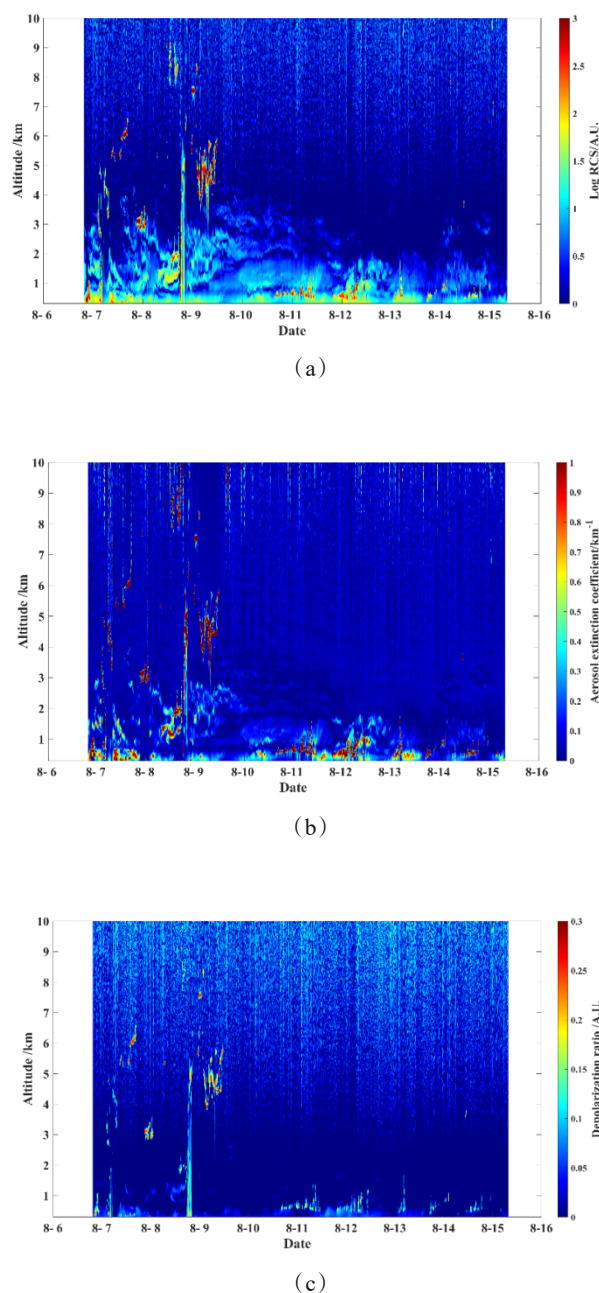


图9 船载大气多参数探测激光雷达2024年8月6日至15日气溶胶观测数据结果图:(a)532 nm信号强度分布图;(b)气溶胶消光系数分布图;(c)退偏振比结果分布图

Fig. 9 Aerosol observation data results of shipborne multi-parameter atmospheric lidar from August 6th to 15th, 2024: (a) distribution of signal strength at 532 nm; (b) distribution of aerosol extinction coefficient; (c) distribution of aerosol depolarization ratio

11)。分析表明,边界层高度在整个走航观测时段内相对稳定,主要在1 km附近波动变化,符合典型海洋上空大气结构的分布特征。云的时空分布变

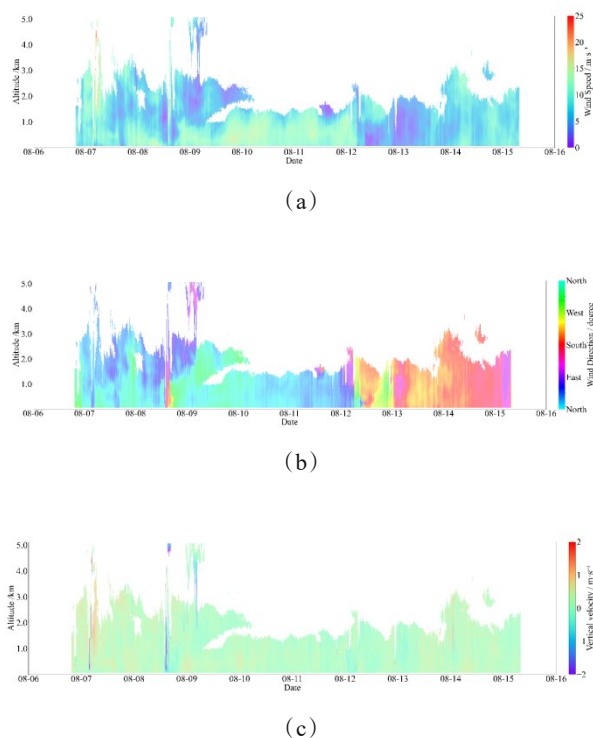


图10 船载大气多参数探测激光雷达2024年8月6日至15日风场观测数据结果图:(a)风速分布图;(b)风向分布图;(c)垂直风速分布图

Fig. 10 Wind observation data results of shipborne multi-parameter atmospheric lidar from August 6th to 15th, 2024: (a) distribution of wind speed; (b) distribution of wind direction; (c) distribution of vertical velocity

化较大,高、低云均有出现,1~9 km各高度均有云层出现,且存在短时间的云结构;从时间分布看,8月6日至9日云层分布较多,而10日之后云层减少。值得注意的是,8月8日观测到低空云的存在并伴随云层高度变化,与4.2.1节所述的降雨过程在时间上高度吻合,进一步印证了此次天气事件的综合特征。

4.2.3 海上不同高度大气多参数同步分析

为深入分析走航观测期间海上低空大气环境的精细结构,选取200 m、500 m及1 000 m三个典型高度层的气溶胶消光系数与风场参数进行同步分析。由于此次往返航线较为一致,以2024年8月6日19:00从青岛出发至8月12日6:00抵达台州的航段为例,绘制海上不同高度层气溶胶消光系数与风矢量(箭头长度表征风速、箭头方向表征风向)分布图,如图12所示。结果显示,在无云情况下,1 km高空处的消光系数显著低于200 m和500 m处,这与

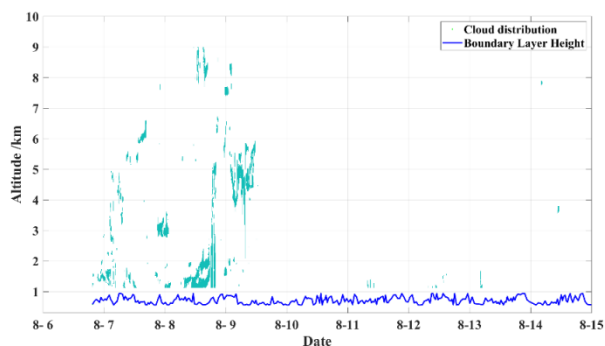


图11 船载大气多参数探测激光雷达2024年8月6日至15日观测边界层高度及云分布图

Fig. 11 Observation of boundary layer height and cloud distribution of shipborne multi-parameter atmospheric lidar observed from August 6th to 15th, 2024

大气边界层以内的气溶胶浓度明显高于边界层之上的自由大气部分的气溶胶浓度有直接关系;此外,在此航段期间三个高度层的风向基本以北风为主,垂直方向差异性较小,而风速略有差异,随高度的增加略有增大,存在风速梯度,但均低于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明大气层结相对稳定。

4 结论

针对海上大气气溶胶与风场等参数高时空分辨率、同步连续观测的需求,研制了一套紧凑型船载大气多参数探测激光雷达系统。通过搭载试验船在黄海、东海海域开展为期10天的连续走航观测,获取了海上低空大气气溶胶特性、三维风场的高时空分辨率数据。结果显示:(1)观测期间,气溶胶浓度空间变化明显,且存在低空气溶胶层及低空云,海上低空风速基本维持在 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下;成功捕捉到一次典型降雨过程,并记录了其伴随的气溶胶光学特性及风场变化特征;(2)大气边界层高度在1 km附近波动,符合海洋上空大气结构的分布特征;云层时空分布变化较大,高、低云均有出现,且存在短时间的云结构;(3)以200 m、500 m、1 000 m高度为例,分析海上不同高度的气溶胶、风速、风向分布存在的差异,气溶胶消光系数随高度增加而显著降低,各高度处风向基本以北风为主,差异性较小,而风速存在垂直梯度,但整体低于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大气层结较为稳定。

该研究成果提供了一套可靠的海上大气多参数同步立体观测设备,并获得了走航观测数据,对深入理解海洋大气边界层结构,提升海上环境监测

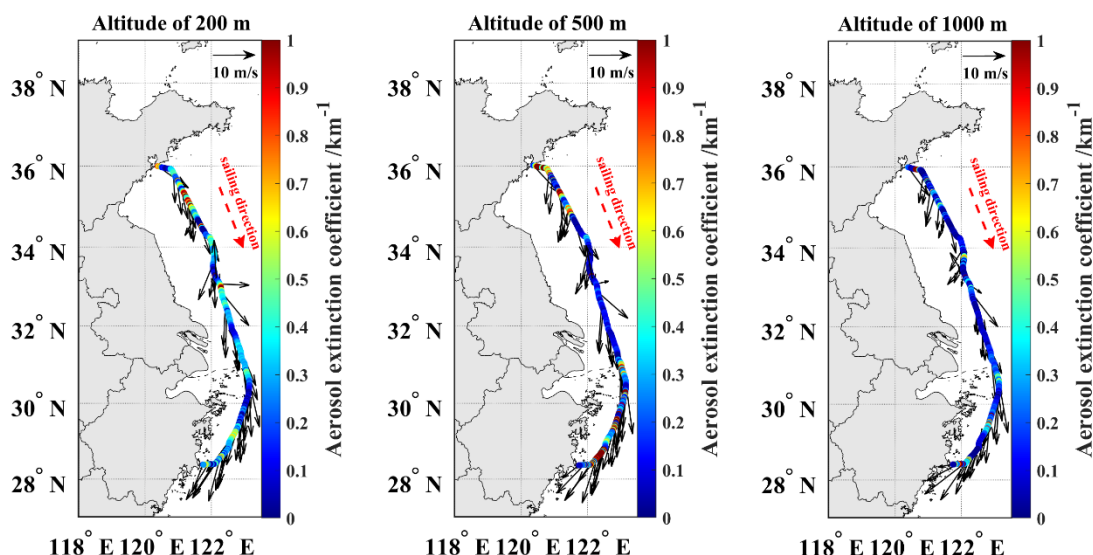


图12 大气多参数探测激光雷达2024年8月6日19:00至12日06:00观测海上不同高度(200 m、500 m、1 000 m)气溶胶消光系数、风速、风向分布图

Fig. 12 Observation of aerosol extinction coefficient, wind speed and wind direction distribution at different altitudes (200 m, 500 m, and 1 000 m) offshore by shipborne multi-parameter atmospheric lidar observed from 19:00 on August 6th, 2024 to 06:00 on August 12th, 2024

能力具有重要意义。

References

- [1] Li Zhan-Qing. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: an overview [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 76-92.
李占清. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 76-92.
- [2] Takemura T, Nakajima T, Dubovik O, et al. Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model [J]. Journal of Climate, 2002, 15(4): 333-352.
- [3] IPCC. The fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 153-171.
- [4] He Ying-Hong. Development of Mie scattering Lidar and inversion for return signal [D]. Chengdu: Sichuan University, 2024.
贺应红. Mie散射激光雷达实验系统设计与大气消光系数反演方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [5] Bo Guang-Yu, Liu Dong, Wu De-Cheng, et al. Two-wavelength Lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(01): 213-218.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. 中国激光, 2014, 41(01): 213-218.
- [6] Shen Ji, Cao Nian-Wen. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman Scattering Lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(06): 304-313.
沈吉, 曹念文. 米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线[J]. 中国激光, 2017, 44(06): 304-313.
- [7] Kang Xiang-Yu, Guo Ji, Zeng Xiang-Yu, et al. Design of an atmospheric aerosol detection system based on a Mie scattering lidar [J]. Optical Instruments, 2021, 43(02): 66-71.
康翔宇, 郭骥, 曾祥培, 等. 基于米散射激光雷达的大气气溶胶检测系统设计[J]. 光学仪器, 2021, 43(02): 66-71.
- [8] Hou Chun. Research on automatic control of atmospheric detection lidar [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
侯春. 大气探测激光雷达的自动控制技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [9] Wu Ke-Nan, Hu Jia-Dong, Xia Hai-Yun, et al. One-bit sampling coherent Doppler wind Lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(16): 365-369.
吴柯南, 胡佳栋, 夏海云, 等. 基于单比特采样的相干多普勒测风激光雷达[J]. 光学学报, 2024, 44(16): 365-369.
- [10] Gu Tao-Feng, Yue Hai-Yan, Wang Si-Hua, et al. A coherent wind lidar based on Doppler principle and its field application [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2024, 19(01): 22-37.
顾桃峰, 岳海燕, 王四化, 等. 一种基于多普勒原理的相干测风激光雷达及其外场应用[J]. 大气与环境光学学报, 2024, 19(01): 22-37.
- [11] Wang Xi-Tao, Liu Bing-Yi, Wu Song-Hua, et al. 1.55 μm all-fiber laser heterodyne detection and data analysis with high measurement accuracy of velocity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(06): 11-15.
王希涛, 刘秉义, 吴松华, 等. 高精度1.55 μm 全光纤激光相干测速实验及数据分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(06): 11-15.

- [12] Wang Zhang-Jun, Wang Rui, Li Hui, et al. Applied research on low-altitude wind field using coherent Doppler wind lidar at Zhongshan Station, Antarctic [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2022, 34(01): 11-19.
王章军, 王睿, 李辉, 等. 基于相干多普勒测风激光雷达的南极中山站低空大气风场应用研究[J]. 极地研究, 2022, 34(01): 11-19.
- [13] Bu Zhi-Chao, Guo Pan, Chen Si-Ying, et al. Optimization analysis of telescope aperture and truncation factor of coherent LIDAR [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(03): 694-699.
步志超, 郭磐, 陈思颖, 等. 相干测风激光雷达望远镜孔径及截断因子的优化分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(03): 694-699.
- [14] Nishizawa T, Sugimoto N, Matsui I, et al. Aerosol retrieval from dual-wavelength polarization Lidar measurements over tropical Pacific Ocean and validation of a global aerosol transport model [C]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1100(1): 303-306.
- [15] Duflo V, Royer P, Chazette P, et al. Marine and biomass burning aerosols in the southern Indian Ocean: retrieval of aerosol optical properties from shipborne Lidar and Sun photometer measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116 (D18): D18208-1-D18208-15.
- [16] Kanitz T, Ansmann A, Engelmann R, et al. North-south cross sections of the vertical aerosol distribution over the Atlantic Ocean from multiwavelength Raman/polarization Lidar during polarstern cruises [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(6): 2643-2655.
- [17] Kanitz T, Engelmann R, Heinold B, et al. Tracking the Saharan air layer with shipborne Lidar across the tropical Atlantic [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41 (3): 1044-1050.
- [18] Wang Z, Du L, Li X, et al. Observations of marine aerosol by a shipborne multiwavelength lidar over the Yellow Sea of China [C]. Conference on lidar remote sensing for environmental monitoring XIV, 2014: 926218-1-926218-6.
- [19] Wang Z, Li X, Meng X, et al. Optical properties of atmospheric aerosol from shipborne multiwavelength lidar measurements during the 2015 Yellow Sea experiment [C]. International Conference on Optical and Photonic Engineering, 2018.
- [20] Wang Dong-Xiang, Song Xiao-Quan, Feng Chang-Zhong, et al. Coherent Doppler Lidar observations of marine atmospheric boundary layer height in the Bohai and Yellow Sea [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (s1): s101001-1-s101001-7.
王东祥, 宋小全, 冯长中, 等. 相干多普勒激光雷达观测渤海黄海洋大气边界层高度研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s101001-1-s101001-7.
- [21] Chen C, Wang Z, Wang X, et al. Observations of marine aerosol using a scanning micro pulse Lidar in 2015 [C]. International Conference on Optical and Photonic Engineering, 2018.
- [22] Zeng Xian-Jiang. The research on development and inversion algorithm of Lidar for measurement of aerosol horizontal distribution in marine environment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
曾宪江. 海洋环境气溶胶水平分布测量激光雷达研制与反演方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [23] Wang Qi-Chao, Wu Song-Hua, Zhang Hong-Wei, et al. Observation and data processing of offshore wind field based on UAV-borne Doppler lidar [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(04): 516-529.
王琪超, 吴松华, 张洪玮, 等. 无人机载多普勒激光雷达海上风场观测及数据处理[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(04): 516-529.
- [24] Jin Xiang, Song Xiao-Quan, Yang Ya-Wen, et al. Estimation of turbulence parameters in the atmospheric boundary layer of the Bohai Sea, China, by coherent Doppler lidar and mesoscale model [J]. Opt. Express, 2022, 30 (8): 13263-13277.
- [25] Yin Jia-Ping. Research and observation of turbine wake and wind field of MABL by coherent Doppler wind Lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
尹嘉萍. 风机尾流场与海气边界层风场的多普勒激光雷达观测研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [26] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. Applied Optics, 1984, 23 (5): 652-653.
- [27] Chen C, Song X, Wang Z, et al. Calibration methods of atmospheric aerosol Lidar and a case study of haze process [J]. Frontiers in Physics, 2022, 942926(10): 1-12.
- [28] Yang T, Wang Z, Zhang W, et al. Technical note: boundary layer height determination from Lidar for improving air pollution episode modeling: development of new algorithm and evaluation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17: 6215-6225.
- [29] Mao F, Gong W, Song S, et al. Determination of the boundary layer top from lidar backscatter profiles using a Haar wavelet method over Wuhan, China [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 343-349.
- [30] Wang W, Gong W, Mao F, et al. An improved iterative fitting method to estimate nocturnal residual layer height [J]. Atmosphere, 2016, 106 (7): 1-11.
- [31] Zhang M, Tian P, Zeng H, et al. A comparison of winter-time atmospheric boundary layer heights determined by tethered balloon soundings and Lidar at the site of SACOL [J]. Remote Sensing, 2021, 1781(13): 1-16.
- [32] Wang Xiao-Peng. Automated algorithm for cloud parameter retrieval using Lidar data and its applied research [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
王箫鹏. 基于激光雷达数据自动反演云参数算法及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [33] Burton S, Ferrare R, Hostetler C, et al. Aerosol classification using airborne high spectral resolution Lidar measurements - methodology and examples [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(1): 73-98.
- [34] Sassen K, Hsueh C. Contrail properties derived from high-resolution polarization lidar studies during SUCCESS [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(8): 1165-1168.
- [35] Yi Y, Yi F, Liu F, et al. Microphysical process of precipitating hydrometeors from warm-front mid-level stratiform clouds revealed by ground-based lidar observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21 (23): 17649-17664.