文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-14

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. XXXX. XX. 001

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*]，庄全风[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：气溶胶和风场作为研究海上大气的重要参数，实现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。主要介绍了船载大气多参数探测激光雷达的结构设计、探测原理、技术指标和反演方法。通过实验标定测试，对系统进行大气分子瑞利散射信号标定及风场观测标定测试，验证了系统的观测特性及准确性。分析了2024年8月搭载“鲁青渔教16”试验船在中国黄海、东海开展的海上低空大气多参数走航观测实验数据，获取了走航观测期间0-10 km的气溶胶光学参数及0-5 km的风场信息。数据结果显示，海上气溶胶浓度变化明显，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 m/s以下；边界层高度分布在1 km附近波动变化；以200 m、500 m、1000 m高度为例，分析了海上不同高度的气溶胶、风速、风向分布存在的差异。实验结果表明，船载大气多参数探测激光雷达可搭载船、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 ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar and research on navigation observation of the Yellow Sea and East China Sea

WANG Zhang-Jun[1,3*]，ZHUANG Quan-Feng[1]，LI Hui[1]，LI Hao[1]，LIU Dong[2]，CHEN Chao[1]，PAN Xin[3]，CHEN Shuo[1]，LI Chuan-Dong[1]，XUE Bo-Yang[1]，XU Zhi-Jun[2]

（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 Shenguang Technology Co.，Ltd.，Qingdao 266061，China）

Abstract：Aerosol and wind field are important parameters for studying the marine atmosphere，and it is of great significance to achieve high-precision measurements. In order to realize high-temporal and spatial resolution airborne observation of atmospheric aerosols and wind fields at sea，the ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar has been developed. The structural design，detection principle，technical indicators and retrieval method of ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar are introduced. Through experimental calibration tests，the system was calibrat-

收稿日期：2025-03-28，**Received date**：2025-03-28，

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)，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)，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，博士学位，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

ed for atmospheric molecular Rayleigh tests and wind field observation calibration tests, which verified the observation characteristics and accuracy of the system. The experimental data of low-altitude atmospheric multi-parameter walking observation at sea carried out in the Yellow Sea and East China Sea of China on board the "Luqing Yujiao 16" test vessel in August 2024 were analyzed, and aerosol optical parameters of 0-10 km and wind field information of 0-5 km during the walking observation period were obtained. The data results show that the aerosol concentration at sea changes significantly, and there are low-level aerosol layers and low-level clouds. The atmospheric wind speed at low-level sea is basically below 20 m/s; the boundary layer height distribution fluctuates around 1 km; taking altitudes of 200 m, 500 m and 1000 m as examples, the differences in aerosol, wind speed and wind direction distribution at different altitudes on the sea are analyzed. Experimental results show that atmospheric multi-parameter detection lidar can be equipped with ocean platforms such as ships and buoys to efficiently achieve continuous and accurate observations of aerosol and wind fields over the ocean.

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

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],可通过吸收和散射太阳短波辐射和地球长波辐射直接改变地球辐射收支平衡,也可改变云微物理特性和云量进而间接影响气候[2]。大气风场是大气中能量传播和物质交换最普遍的途径,是水汽、气溶胶、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要意义。

我国濒临西太平洋,海岸线长度超过1.8万公里,所管辖海域总面积接近300万平方公里,是我国陆地总面积的三分之一,且沿海地区是我国经济社会发展较为迅速的地区。想要全面了解海上大气环境因素对沿海地区对气候和空气质量的影响,需要实现对海上气溶胶和风等大气要素的探测,对于研究海气相互作用、海洋资源开发、陆地污染物传输、相态变化、环境影响等具有重要的研究意义[3]。常规的海洋上气溶胶以及风的监测手段主要以沿海定点观测以及海上船舶走航定点观测为主,无法通过单次观测得到时空尺度较大的海洋上空气溶胶和风场分布特征。激光雷达是获取大气气溶胶和风等重要参数的主动遥感设备之一,具有高时空分辨率的特点,突破了传统的单点式监测设备的局限性,近年来被越来越多地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[8]、相干多普勒测风激光雷达[9-14][9]等。

基于将激光雷达安装于科考船开展海洋大气观测研究,国外相关科研机构开展了一系列多航次的尝试和科学研究。日本海洋科学技术中心(JAMSTEC)使用日本国立环境研究所(NIES)研制的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的观测研究,获得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[15];法国研究团队LACy (Atmosphere and Cyclone Lab)为法国LEOSPHERE公司气溶胶与云激光雷达ALS450添加保护罩后,安装于法国科考船Marion Dufresne号,分别于2009年4月19日至5月13日的MACAMOZ任务,8月27日至9月17日的KAMASUTRA任务两航次对印度洋南部开展了海洋气溶胶光学性质观测实验,首次在南印度洋海域进行的船载激光雷达对气溶胶光学性质与时空分布的遥感探测研究[16];德国莱布尼兹对流层研究所在OCEANET项目的框架下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[17];2013年德国莱布尼兹对流层研究所又将Polly^{XT}型激光雷达安装于科研调查船在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性质垂直分布变化情况[18]。

近年来,国内学者陆续在中国近海海域开展利用激光雷达进行海上大气观测研究,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观测实验,获得了气溶胶分布情况[19],并后续对系统升级优化后,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,显示良好的一致性[20];王东祥等人于2014年利用一套相干多普勒激光雷达在渤黄海区域进行观测实验,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[21];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[22];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"科考船在渤黄海海域进行了为期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了观测[23];王琪超等人利用小型化机载多普勒激光雷达,2016年在广东省海陵岛近岸海域开展国内首次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[24];Jin等人利用一台相干多普勒测风激光雷达2021年5月17日至6月5日期间,在渤海进行航行观测实验,利用观测数据结合WRF,估算渤海大气边界层湍流参数[25]。然而,上述激光雷达系统大多只具有单一功能,能同时观测海上气溶胶和风的系统鲜有报道。

针对以上需求,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,能够快速部署于调查船、海洋浮标等海上移动平台,对海上大气气溶胶和风场进行同步立体观测。本文介绍了该雷达系统的结构设计、探测原理、技术指标、反演方法和出海观测实验数据分析等。

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、电集成化、一体化结构设计,同时包含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,并安装高精度和高响应度的惯性导航IMU和卫星导航组合的姿态运动测量设备,开发了智能化激光雷达系统控制、数据采集和反演软件,便于搭载调查船、海洋浮标等海上移动平台。船载大气多参数探测激光雷达系统内部结构原理如图1所示,系统观测效果示意图如图2所示,可进行气溶胶和风场的同步观测,系统主要技术指标如表1所列。

其中,大气气溶胶激光探测模块主要基于Mie散射原理,实现对大气气溶胶的时空分布特征、光学特性进行观测与研究,主要包括激光发射单元、光学接收单元以及信号采集与处理单元,通过光路结构设计、背景噪声抑制与信号校准研究等,实现大气气溶胶信息的全天时精确探测。利用532 nm波长的绿光对大气中气溶胶粒子探测较为敏感可获得较强的大气回波信号的优势,该模块以532 nm脉冲激光为探测光源,用以实现大气气溶胶远距离、精细探测。发射激光通过反射镜发射到大气中,激光与大气相互作用的回波信号由接收光路接收,如图1所示,回波信号首先由接收望远镜接收,后经过小孔光阑(PH)、准直透镜(L1)后,由偏振分光棱镜(PBS)将回波信号的平行偏振分量与垂直偏振分量分离,分别进入平行偏振通道与垂直偏振通道,经过干涉滤波片(IF)与会聚透镜(L2、L3)后,由光电倍增管(PMT)将光信号接收并转换为电信号,

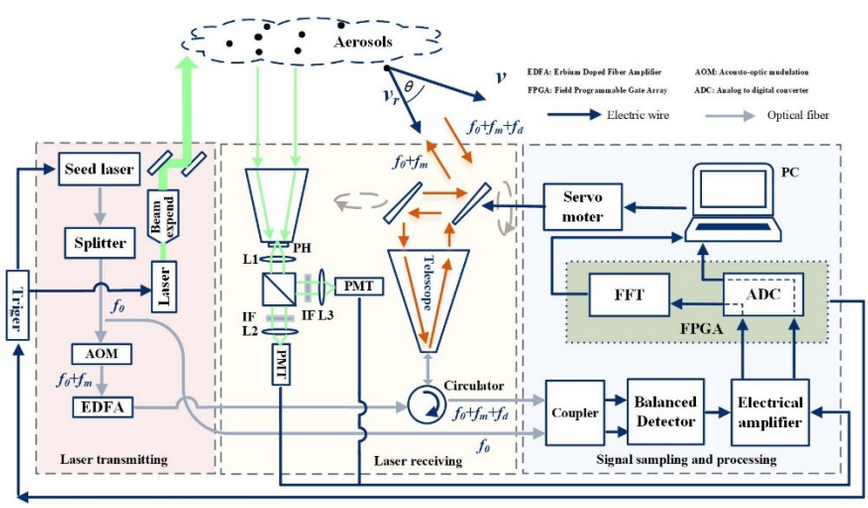

图1　船载大气多参数探测激光雷达结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar

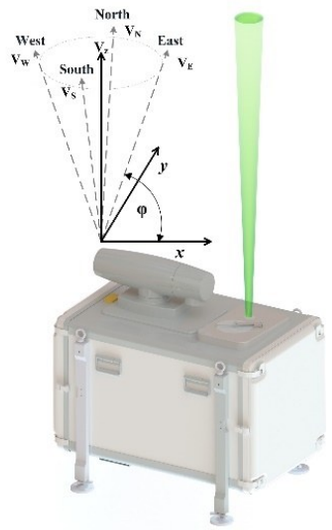

图2 船载大气多参数探测激光雷达观测模式

Fig. 2 Observation model of ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar

最终数据由双通道信号采集卡采集。通过光路结构设计、一体化结构设计、背景噪声抑制与信号校准研究，大气气溶胶激光探测模块可全天时精确探测，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，保障观测数据的可靠性。

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，具有较高的灵敏度，同时还具备探测微弱信号的能力。采用高稳定性、人眼安全的近红外波长1550 nm单频激光器作为探测光源，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，采用全光纤集成结构设计、高精度扫描系统与三维扫描技术，实现集成化、模块化设计。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行器组成，种子激光器(seed laser)产生的单纵模单频CW激光经过一个1×2的单模保偏光纤分束器(splitter)，一路输出作为本振光，另一路经过声光调制器(AOM)，产生120 MHz的频移偏量并实现脉冲调制，调制的激光脉冲经过光纤放大器(EDFA)，输出窄线宽、高功率的脉冲激光束；接收单元的光学天

表1 大气多参数探测激光雷达技术参数

Table 1 Technical parameters of atmospheric multi-parameter detection 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	1550 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	
最大测量距离		≥5 km
风速测量精度	≤0.5 m/s	
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°	

线接收到回波信号后,传输到2*2保偏光纤耦合器的输入端口1,在耦合器内,本振光与回波信号发生拍频,通过光纤传输到平衡探测器,接收单元选用具备三防能力、高透射率的光学窗口,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反演。

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的理论中,DBS(Doppler Beam Swing)扫描模式是关键测量技术,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φ、俯仰角θ、横滚角ψ)的变化和三个方向的直线运动(东向速度V_e、北向速度V_n和天向速度V_u),这些不规则的运动行为使得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。

因此,为了得到准确的水平风速风向,首先需要进行移动平台姿态校正与运动补偿,本文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,对船载雷达测量的东西南北各方向的径向角度和速度进行校正,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,具体补偿流程如下图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:

(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。本文采用惯性导航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:

$$r_0=\begin{pmatrix}x_0\\y_0\\z_0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\theta_0\cos\varphi_0\\\cos\theta_0\sin\varphi_0\\-\sin\theta_0\end{pmatrix},\tag{1}$$

激光光束在地理坐标系中的矢量表示:

$$r=\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}=\left(H_1H_2H_3\right)^{-1}r_0,\tag{2}$$

H_1,H_2和H_3分别表示翻滚角φ、俯仰角θ和航向角ψ的变换矩阵:

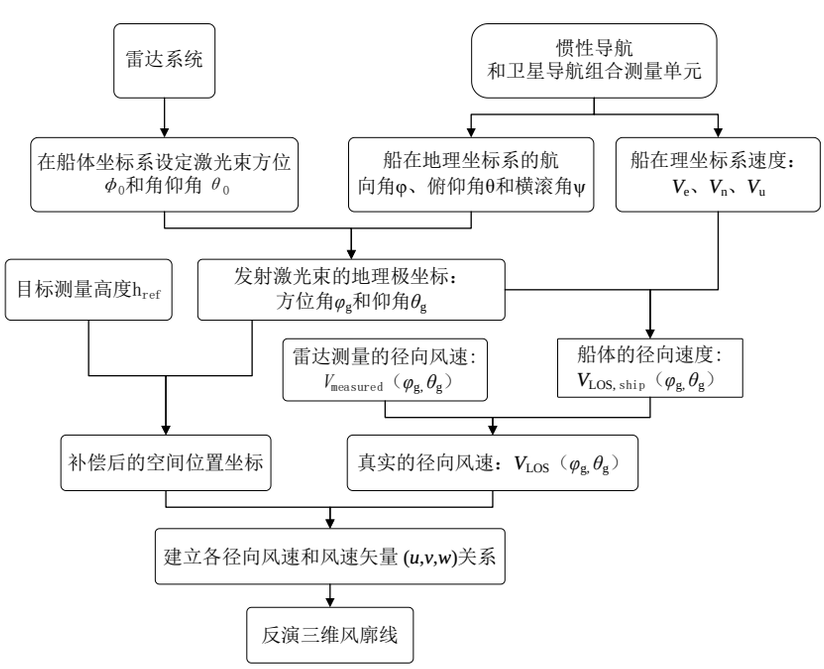

图3　船载大气多参数探测激光雷达数据姿态校正和风速反演流程图

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

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

$$H_3=\begin{pmatrix}\cos\psi&\sin\psi&0\\-\sin\psi&\cos\psi&0\\0&0&1\end{pmatrix},\tag{3}$$

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：

$$\varphi_g=\arctan\left(y/x\right),\tag{4}$$

$$\theta_g=-\arcsin z,\tag{5}$$

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$V_{\mathrm{LOS,ship}}(\varphi_g,\theta_g)$，补偿雷达测量的径向风速$V_{\mathrm{measured}}$中的船体引起的径向分量$V_{\mathrm{LOS,ship}}$，即为校正后的径向风速：

$$V_{LOS}(\phi_g,\theta_g)=V_{measured}(\phi_g,\theta_g)+V_{LOS,ship}(\phi_g,\theta_g),\tag{6}$$

（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$(x_{\mathrm{corr}},y_{\mathrm{corr}},h_{\mathrm{ref}})$：

$$x_{corr}=\frac{h_{ref}}{\tan(\theta)}\cdot\cos(\phi_g),\tag{7}$$

$$y_{corr}=\frac{h_{ref}}{\tan(\theta)}\cdot\sin(\phi_g),\tag{8}$$

2.2 风场反演方法

系统利用DBS扫描技术测量风廓线时，采用空间矢量合成算法，如2.1节所述方法，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，

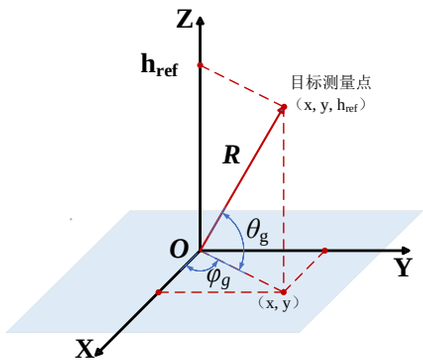

图4 雷达极坐标和测量点坐标投影

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

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[26]：

$$\begin{aligned}V_{losE}&=v\cos\theta+w\sin\theta\\V_{losS}&=-u\cos\theta+w\sin\theta\\V_{losW}&=-v\cos\theta+w\sin\theta\\V_{losN}&=u\cos\theta+w\sin\theta\end{aligned},\tag{9}$$

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：

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

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$\overline{V}$为南北分量和东西分量的平方和的根，即：

$$\overline{V}=\sqrt{\overline{u}^2+\overline{v}^2},\tag{11}$$

合成风矢量方向可表示为：

$$\alpha=\left|\tan^{-1}\frac{\overline{v}}{\overline{u}}\right|,\tag{12}$$

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$u\geqslant0$，$v\geqslant0$，则α的值不变；$u\leqslant0$，$v\geqslant0$，则$\alpha=180^\circ-\alpha$；$u\leqslant0$，$v\leqslant0$，则$\alpha=180^\circ+\alpha$；$u\geqslant0$，$v\leqslant0$，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：

$$Dir=\alpha+180^\circ,\tag{13}$$

2.3 气溶胶光学参数反演方法

利用Fernald反演算法[27]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:

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

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

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或其它高度,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公式(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比δ[28]:

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

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[29]、小波法[30]和拟合法[31]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。

本文采用距离平方校正信号的第一归一化梯度法[32]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:

$$D_{NG-RCS}(z) = \frac{\Delta RCS(z)}{\Delta r \times RCS(z)}, \quad (19)$$

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。本文主要利用信号梯度变化来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(r)/dr将由负变正,云底高度可通过微分零交叉法[33]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,进行了大量实验进行系统调试与优化,包括对光路校准和提升机械结构设计,并对观测数据结果进行了标定与验证。

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。利用激光雷达获取的分子散射信号与标准大气分子瑞利信号比对,可检验激光雷达回波信号是否准确。选取2024年5月5日21:30的数据为例,此时大气相对清洁,标定效果理想,通过532 nm平行与垂直通道回波信号与对应波长的标准分子瑞利信号的对比,结果如图5所示。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以上回波信号与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

为进一步对船载大气多参数探测激光雷达测风结果进行数据比对验证，课题组于2024年6月11日—6月15日期间进行比对观测实验。用于比对检验的设备为一款相干多普勒测风激光雷达（型号：WindPrint S4000，许可证编号：SXZ-106-2023），两台设备进行校时和对北，采用相同扫描模式开展同时同地同步对比测试。

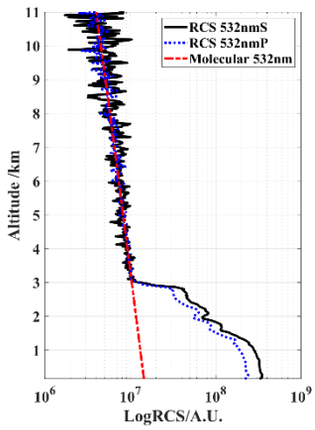

图5 船载大气多参数探测激光雷达距离平方校正信号与标准分子瑞利信号对比廓线

Fig. 5 Comparison profile of range-square correction signal of ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar and standard molecular Rayleigh signal

以比对期间某时刻的廓线结果为例，如图6所示，可以看出，两设备的风速、风向、垂直风观测结果一致性较好，有效探测高度可达5 km，其中风速的相关系数0.994，标准差0.513 m/s；风向的相关系数0.992，标准差5.756°；垂直风的相关系数0.926，标准差0.137 m/s。

在剔除比对观测实验期间受降水、云层等天气条件下干扰数据后，经统计，共有风速、风向、垂直风可对比统计点20237对，风速比对结果如图7(a)所示，两设备风速相关系数为0.985，标准差为0.327 m/s，风向比对结果如图7(b)所示，计算获得风向相关系数为0.978，标准差6.531°，图7(c)为两设备垂直风探测比对结果，显示相关系数0.926，标准差0.201 m/s。以上对比结果表明，船载大气多参数探测激光雷达系统数据质量较好，满足设计要求。

4 海上试验及数据分析

4.1 海上观测实验概况

海上气溶胶、风场信息观测对海洋环境监测预报、海上风电开发、海气相互作用研究具有重要意义。船载大气多参数探测激光雷达完成整机集成、调试与优化后，于2024年8月6日至15日，搭载“鲁青渔教16”试验船，从青岛出发开赴台州，开展了海上走航连续观测试验。走航实验过程中，大气多参数探测激光雷达在海上复杂环境下工作稳定，实现对海洋上空气溶胶与风场时空变化的实时连续探测，海上实验现场及走航轨迹见图8。

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日海上走航观测试验期间，共获得了10天连续观测数据，将各数据结果绘制为THI（Time-Height-Intensity）图，得到海上观测期间气溶胶及风场的完整分布信息，便于分析随时间、高度变化过程。

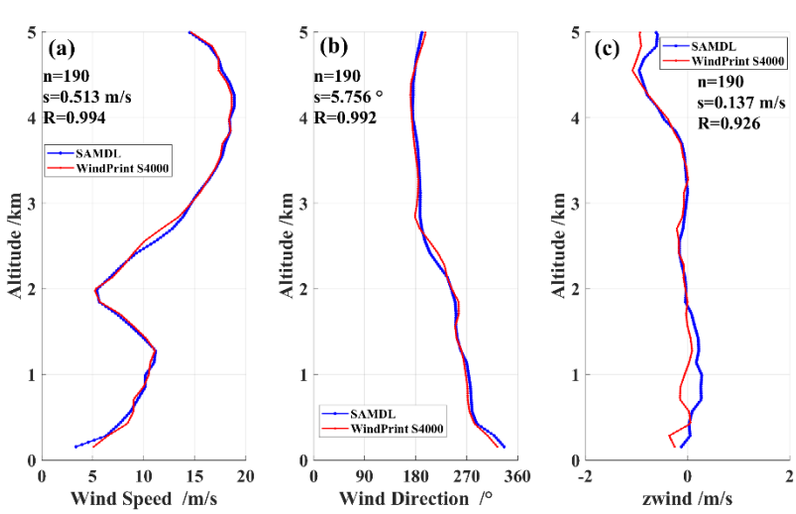

图6 船载大气多参数探测激光雷达与WindPrint S4000测风结果比对廓线：(a) 风速；(b)风向；(c)垂直风

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

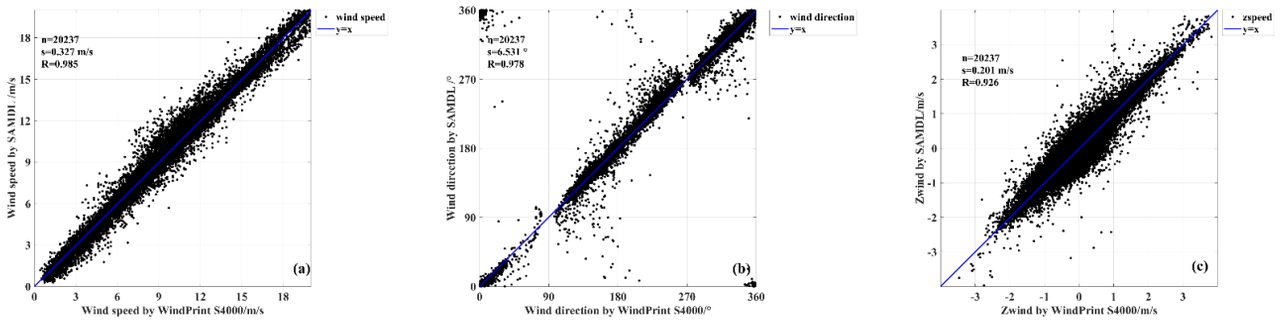

图 7　船载大气多参数探测激光雷达与 WindPrint S4000 测风结果比对数据统计结果图:(a) 风速;(b)风向;(c)垂直风

Fig. 7　Statistical results of wind detection data acquired by the ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar and WindPrint S4000: (a) wind speed; (b) wind direction; (c)zwind

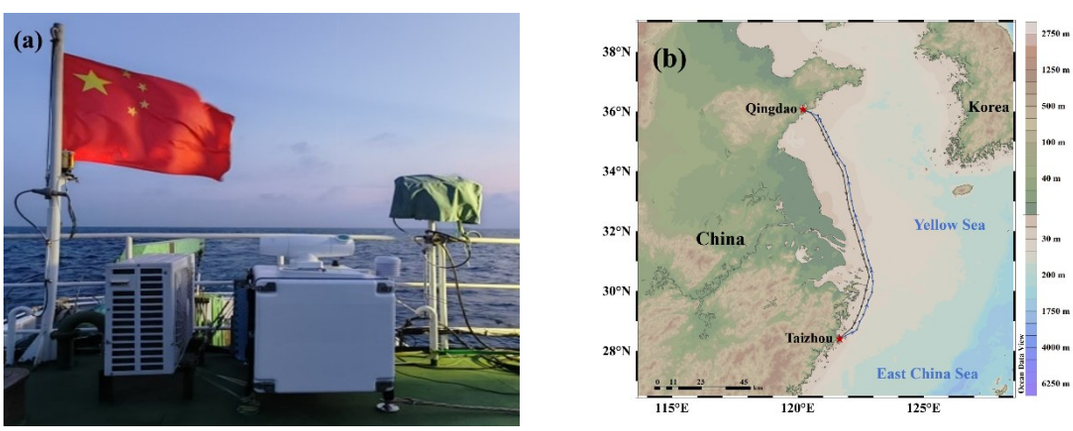

图 8　船载大气多参数探测激光雷达出海观测试验:(a) 实验场景;(b) 航迹图

Fig. 8　Observation experiment at sea of ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar: (a) experimental scenarios; (b) the sea test route

气溶胶数据结果如图 9,包括回波信号强度、消光系数、退偏振比 THI 分布,可以看出,观测期间大气结构相对稳定,气溶胶浓度变化明显,且存在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,显示海洋性气溶胶分布特征[34];另外,8 月 7 日、8 日、9 日均出现高于 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,推测云内部有冰晶粒子存在[35]。

测风数据结果如图 10,包括风速、风向、垂直风的 THI 分布图,可以看出,在整个观测期间,海上低空风速基本在 20 m/s 以下,垂直风基本分布在−1 m/s 至 1 m/s 之间,大气对流较弱;8 月 12 日、13 日期间风速显著变小(低于 10 m/s),并伴随风向的改变(由北风为主变为南风为主),对应图 8 的气溶胶结果也可看出这期间气溶胶浓度有显著增大,推测为此期间船行驶至离岸边较近区域,受陆地气溶胶输送影响。

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,但是在适宜的条件下,激光雷达可以捕获降雨过程。以此次出海观测实验过程中 8 月 8 日约 14:00 起的一次降雨过程为例,从图 9−10 均可以看出,在 8 月 8 日约 14:00 起有明显的信号变化,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(对应图 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(对应图 9(b)),同时低空退偏振比也出现增大并高于 0.1(对应图 9(c)),分析其原因,与雨滴破裂有

关[36]；如图10所示，降雨期间风速增大，特别地1km以上高度出现风速高于25 m/s(对应图10(a))，风向由东北风变为南风、西南风为主(对应图10(b))，而图10(c)显示垂直风也明显变大，出现大于−2 m/s，水平风与垂直风的变大都会加剧降雨过程中雨滴的破裂。

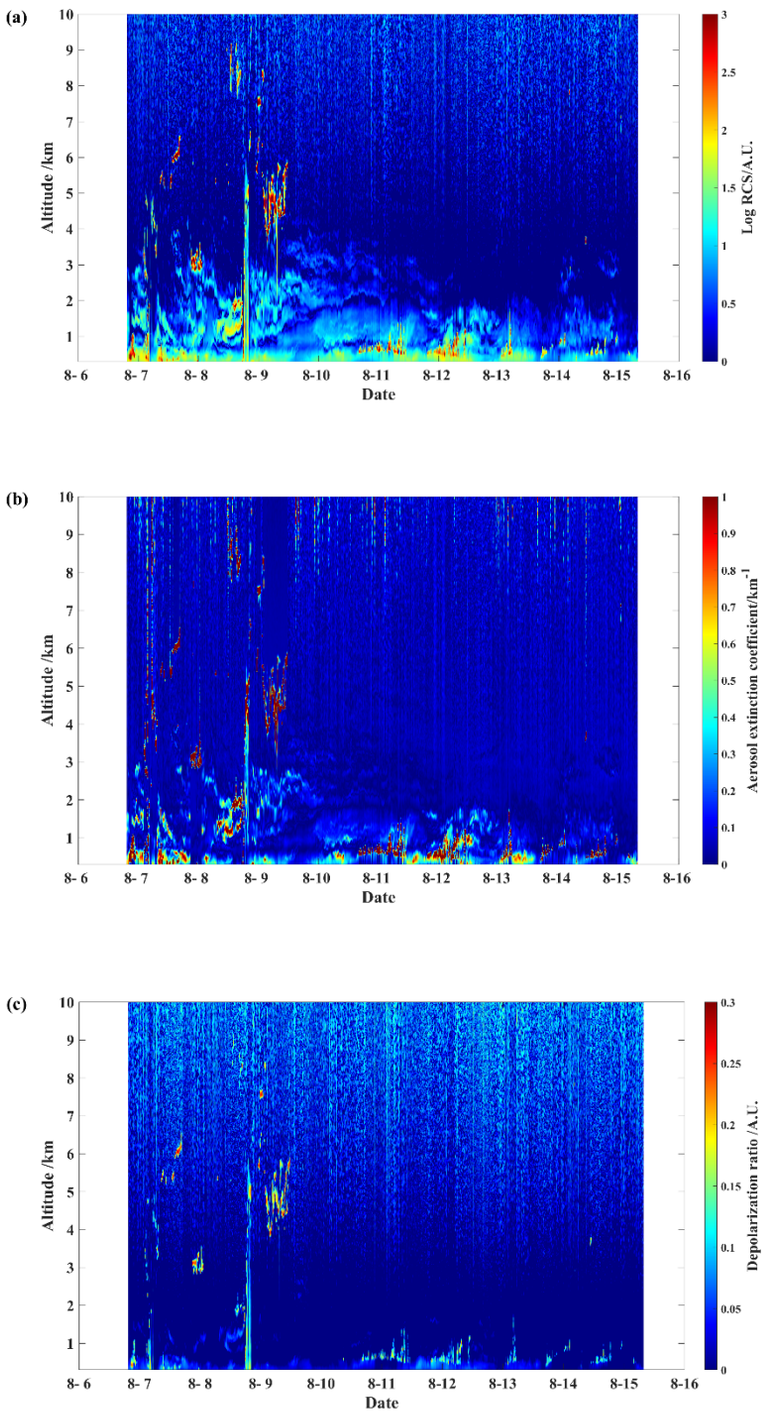

图9 船载大气多参数探测激光雷达2024年8月6日至15日气溶胶观测数据结果图：(a) 532nm信号强度分布图；(b) 气溶胶消光系数分布图；(c) 退偏振比结果分布图

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

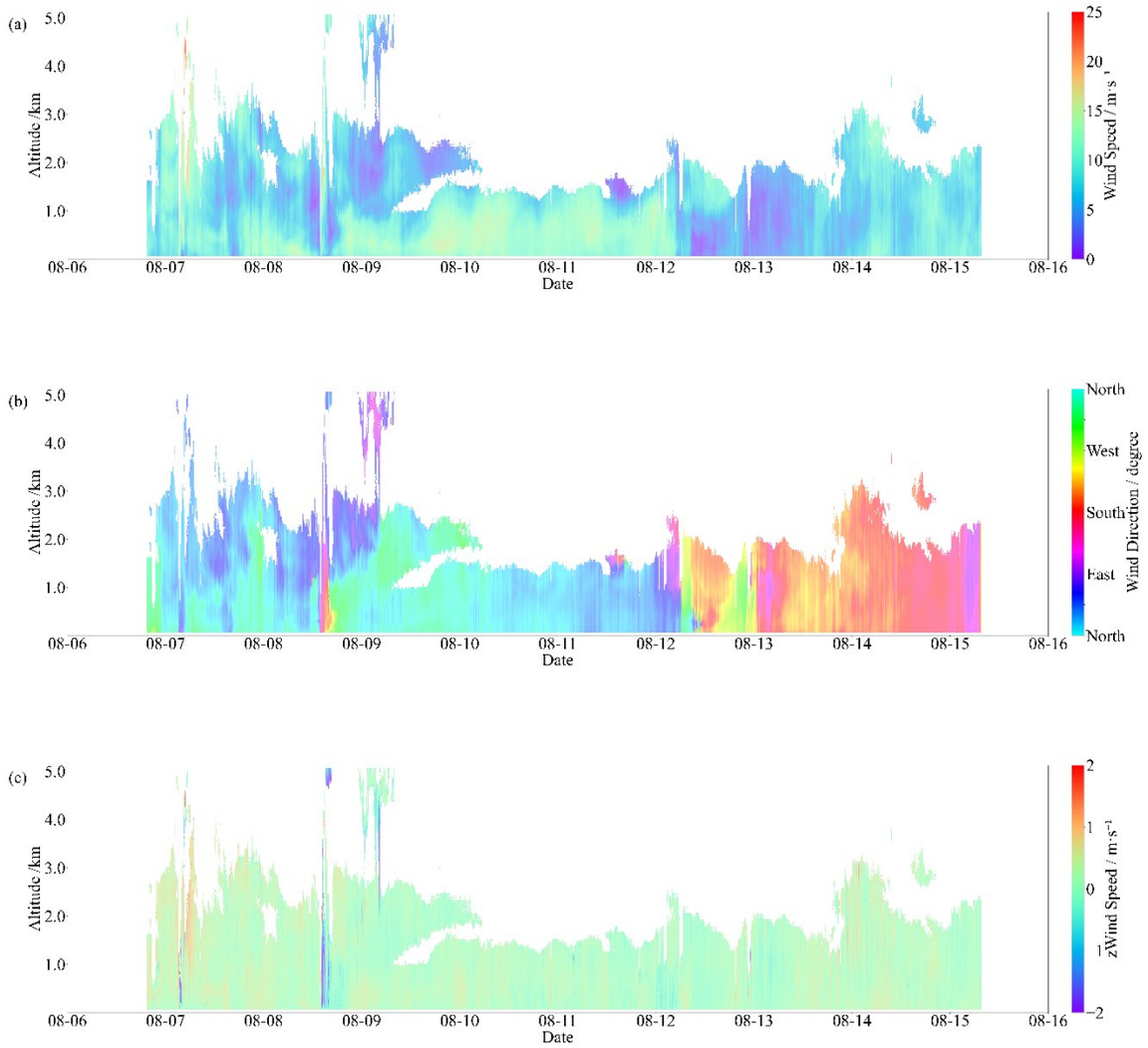

图 10　船载大气多参数探测激光雷达2024年8月6日至15日风场观测数据结果图:(a) 风速分布图;(b) 风向分布图;(c) 垂直风分布图

Fig. 10　Wind observation data results of ship-borne atmospheric multi-parameter detection lidar from August 6 to 15, 2024:(a) distribution of wind speed; (b) distribution of wind direction; (c) distribution of z-wind

4.2.2　大气边界层高度及云高

将观测期间的数据利用2.4所述算法,得到期间大气边界层高度及云高变化如图11,可以看出,边界层高度在整个走航观测时段内相对稳定,分布在1 km附近波动变化,符合海洋上空大气结构的分布特点。云的时空分布变化较大,高、低云均有出现,从1至9 km各高度均有云层出现,且存在短时间的云结构;观测期间,8月6日至9日云层分布较多,10日后云层减少;另外,可以看出在8月8日有低空云的存在并伴随云层高度变化,对应4.2.1所述节降雨过程。

4.2.3　海上不同高度大气多参数同步分析

进一步地,为更加精细地分析此次海上走航观测期间海上低空大气环境特征,选取不同高度(例200 m、500 m、1000 m)处的气溶胶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抵达台州航段为例,绘制期间海上不同高度处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。从图12可以看出,1 km高空处的消光系数要显著低于较低高度的消光系数(有云存在的情况除外),这与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

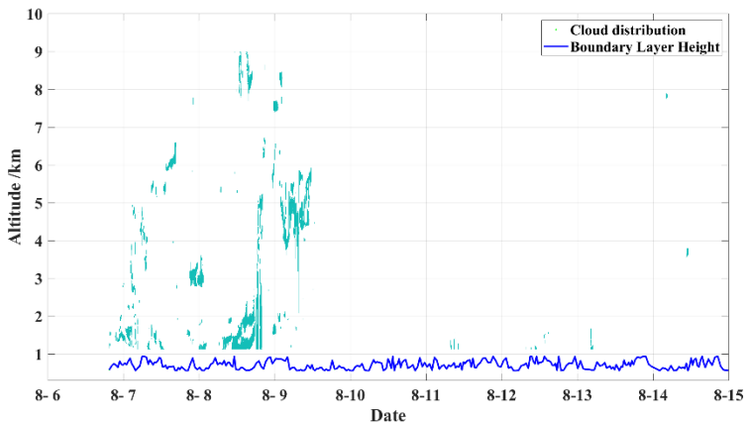

图 11　船载大气多参数探测激光雷达2024年8月6日至15日观测边界层高度及云分布图

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

的气溶胶浓度有直接关系;此外,可以观察,在此航段期间各个高度处风向基本以北风为主,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 m/s,大气环境较为稳定。

4　结论

本文主要介绍了为实现大气多参数同步高时空分辨率、连续探测需要,研制的紧凑型结构设计、同时具备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的大气多参数探测激光雷达系统。通过搭载试验船,实现为期10天的黄海、东海低空大气多参数观测实验,获取了走航观测期间海上气溶胶、风场的时空分布变化,数据结果显示:(1)观测期间气溶胶浓度变化明显,且存在低空气溶胶层及低空云,海上低空风速基本在20 m/s以下,并捕捉一次降雨过程;(2)边界层高度分布在1 km附近波动变化,符合海洋上空大气结构的分布特点,云时空分布变化较大,高、低云均有出现,且存

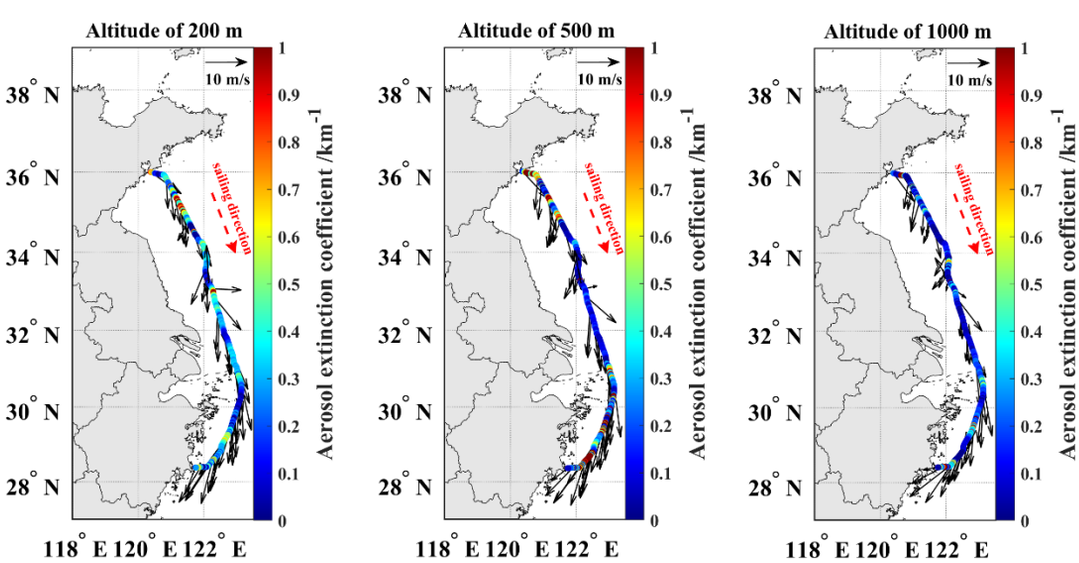

图 12　大气多参数探测激光雷达2024年8月6日19:00至12日06:00观测海上不同高度(200 m、500 m、1000 m)气溶胶消光系数、风速、风向分布图

Fig. 12　Observation of aerosol extinction coefficient, wind speed and wind direction distribution at different altitudes (200 m, 500 m, and 1000 m) offshore by atmospheric multi-parameter detection lidar observed from August 6, 2024, 19:00 to August 12, 2024, 06:00

在短时间的云结构;(3)以以 200 m、500 m、1000 m 高度为例,分析海上不同高度的气溶胶、风速、风向分布存在差异,1km高空处的消光系数要显著低于较低高度的消光系数(有云存在的情况除外),各高度处风向基本以北风为主,差异性较小,而风速存在风速梯度,但均低于20 m/s,大气环境较为稳定。

该研究成果为实现海上大气多参数同步观测与研究提供了可靠的设备和科学数据,对海上大气环境监测、气象监测领域服务与业务化应用具有重要的意义。

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. Can bridge: Canbridge 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,曾祥堉,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 antomatic 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1.55μm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

[14] 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.

[15] 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.

[16] Duflot 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 (1984 - 2012), 2011, 116(D18).

[17] 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

[18] 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

[19] Wang Z, Du L, Li X, et al. Observations of marine aerosol by a shipborne multiwavelength lidar over the Yellow Sea of China [J]. Proc Spie, 2014, 9262(18)1-16.

[20] Wang Z, Li X, Meng X, et al. Optical properties of atmo-

spheric aerosol from shipborne multiwavelength lidar measurements during the 2015 Yellow Sea Experiment[C]. International Conference on Optical and Photonic Engineering.2018.

[21] 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(A01):7.
(王东祥,宋小全,冯长中,等.相干多普勒激光雷达观测渤黄海海洋大气边界层高度研究[J].光学学报), 2015, 35(A01):7.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] Xiang Jin, Xiaoquan Song, Yawen Yang, 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 30, 13263-13277 (2022)

[26] 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.

[27] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. Applied Optics, 1984, 23 (5): 652-653.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] 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.

[32] Zhang M, Tian P, Zeng H, et al. A Comparison of Wintertime Atmospheric Boundary Layer Heights Determined by Tethered Balloon Soundings and Lidar at the Site of SACOL [J]. Remote Sensing, 2021, 1781(13):1-16.

[33] 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.

[34] 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.

[35] Sassen K, Hsueh C. Contrail properties derived from high-resolution polarization lidar studies during SUCCESS[J]. Geophysical research letters, 1998, 25(8): 1165-1168.

[36] 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.