

微脉冲激光雷达与小型后向散射探空仪对 气溶胶垂直结构联合观测研究

李辉¹, 王章军^{1*}, 王颢樾², 陈超¹, 孟祥谦¹, 刘兴涛¹, 李先欣¹, 庄全凤¹, 王秀芬¹

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 266100;

²云南大学大气科学系, 云南 昆明 650091

摘要 2017 年 7 月至 8 月, 使用微脉冲激光雷达与小型气溶胶后向散射探空仪在昆明开展了一个月的气溶胶垂直结构联合观测实验。对比 2 种仪器同步观测方法与探测后向散射比结果的异同, 分析激光雷达和后向散射探空仪测量获得的气溶胶垂直分布特征。探测结果表明, 两者具有较好的一致性, 在 1~4 km 高度范围内, 排除云层干扰后, 2 种仪器后向散射比测量结果的相关系数为 0.87, 方均根误差为 0.752; 观测实验表明, 研制的微脉冲激光雷达为连续探测气溶胶垂直结构演化过程提供了有效手段, 融合后向散射仪探空数据, 可以减少微脉冲激光雷达数据反演中的假设参数, 开展两者联合观测具有一定应用价值。

关键词 遥感; 微脉冲激光雷达; 气溶胶; 后向散射比; 后向散射探空仪

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.132801

Combined Observation of Aerosol Vertical Structure Using Micro-Pulse Lidar and Compact Optical Backscatter Aerosol Detector

Li Hui¹, Wang Zhangjun^{1*}, Wang Haoyue², Chen Chao¹, Meng Xiangqian¹,
Liu Xingtao¹, Li Xianxin¹, Zhuang Quanfeng¹, Wang Xiufen¹

¹*Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qilu University of Technology
(Shandong Academy of Sciences), Qingdao, Shandong 266100, China;*

²*Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China*

Abstract A micro-pulse lidar and a compact optical backscatter aerosol detector (COBALD) are deployed for the combined observation of aerosol vertical structures at Kunming from July to August 2017. The synchronous observation and comparison methods of these two instruments are introduced. The differences in the backscatter ratio profiles and vertical distribution characteristics of the aerosols, which are simultaneously measured by the lidar and COBALD, are analyzed. The observation results of the two instruments show good consistency with each other. The correlation coefficient between the backscatter ratio measured by lidar and that measured by COBALD is 0.87 in the absence of a cloud at a height of 1-4 km, and the corresponding root-mean-square error is 0.752. Atmospheric observation results indicate that the developed micro-pulse lidar is an effective tool for continuous detection of the evolution processes of aerosol vertical structures. Synchronous fusion with sounding data from the COBALD can reduce hypothetical parameters in the retrieve algorithm of lidar signals. In conclusion, the combined observation of these two instruments has certain application.

Key words remote sensing; micro-pulse lidar; aerosol; backscatter ratio; backscatter aerosol detector

OCIS codes 280.3640; 280.1100; 010.3640; 010.1100

收稿日期: 2018-12-26; 修回日期: 2019-01-05; 录用日期: 2019-01-24

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400300)、海洋公益性行业科研专项项目(201505031)、山东省自然科学基金(ZR2017QD009, ZR2019PD020, ZR2019PD023, ZR2019PEE027)

* E-mail: zhangjun.wang@hotmail.com

1 引言

气溶胶主要富集于和人类活动紧密相关的大气边界层内,多样小尺度的时空分布特点使其成为目前估算全球辐射强迫中最不确定的因素^[1]。气溶胶是影响空气质量的主要因素之一,提升气溶胶垂直结构的探测水平对人体健康、交通安全和雾霾治理等具有重要意义。微脉冲激光雷达(MPL)采用小能量、高重复频率的脉冲激光作为探测媒介,激光波长与气溶胶粒子尺度相近,通过分析载有粒子信息的后向散射光,能够实时、连续、高分辨率地探测气溶胶和云的光学性质、时空分布,其为气溶胶垂直结构研究中理想的遥感观测手段^[2-3]。

随着光机电技术与工艺的逐步提升,微脉冲激光雷达作为米氏散射雷达的一个分支,以其紧凑的结构、相对低廉的成本和连续稳定的探测能力,已成为目前大气激光雷达中最有潜力服务于业务化气象观测的技术。近年来,相关研究主要集中在雷达数据质量的改善与区域探测应用,如 Sigma Space、VAISLALA 等公司推出的商业产品在全球提供了多样的应用范例;中国科学院安徽光学精密机械研究所^[4]、中国海洋大学^[5]、西安理工大学^[6]以及南京信息工程大学^[7]等均对微脉冲激光雷达开展了深入研究。

山东省科学院海洋仪器仪表研究所研制了多种型号的激光雷达,同时开展了雷达向机载、船载平台迁移的相关研究^[8],其研制的微脉冲激光雷达体积小,能够实现无人值守条件下的长时间稳定观测^[9]。将微脉冲激光雷达应用于业务化气象观测,需要对雷达数据产品开展对比印证。目前,相关的对比方法主要有:使用多台激光雷达同步观测,数据结果相互印证^[10];地基激光雷达同星载激光雷达过境探测结果对比^[11-12];将激光雷达测量气溶胶消光系数廓线在路径上的积分同太阳光度计^[13-14]、卫星观测的气溶胶光学厚度(AOD)^[15]相比较等。然而,对于大气激光雷达测量的气溶胶垂直结构缺乏有效的廓线间直接对比手段。

小型光学气溶胶后向散射探空仪(COBALD)作为球载探空传感器,可以随探空气球升空原位测量后向散射比廓线,中国科学院大气物理研究所已使用该传感器在拉萨、昆明等地开展了多次探空实验^[16]。本文使用2种仪器采集昆明在2017年7月至8月同步观测的数据,介绍微脉冲激光雷达与COBALD以及两者反演后向散射比方法,通过对比

2种仪器测量气溶胶后向散射比结果的异同,分析气溶胶时空分布特征。实验结果表明,融合探空仪数据可以减少微脉冲激光雷达反演后向散射比算法中的假设参数;而微脉冲激光雷达在连续探测气溶胶垂直结构演化过程方面具有独特优势。

2 实验与仪器

2.1 扫描式微脉冲激光雷达

自研扫描式微脉冲激光雷达具有结构紧凑、三维扫描、人眼安全和全天时探测等特点,能够连续高精度地探测大气气溶胶、云和边界层的三维时空分布信息^[17]。该型激光雷达主要由光学收发模块、机械扫描控制模块和数据采集模块三部分组成,采用二极管抽运 Nd:YAG 固体激光器为光源,工作波长为 532 nm,可以在 7 kHz 重复频率下发射能量为 60 μJ 的脉冲激光,激光通过 10 倍扩束镜压缩发散角至 120 μrad 后经反射镜(M1、M2)调节角度射入大气。与大气中各成分相互作用产生的后向散射光由 200 mm 口径施密特-卡塞格林式望远镜接收,经焦平面处可调小孔(PH)和后继 1 nm 窄带干涉滤光片(IF)减弱背景光干扰后,通过平面凸透镜(L1、L2,焦距 $f=30$ mm)聚焦在光子计数型光电倍增管(PMT)光敏面上。光电转换后电信号送入外围设备互连(PCI)总线型光子计数卡量化,并累积记录。该型扫描式激光雷达最小采样门宽为 0.25 μs ,对应距离分辨率为 37.5 m,最小时间分辨率为 10 s。雷达整体外观与结构框图如图 1 所示。

扫描控制单元采用双转动轴设计,雷达出射光束方位角可以在 $0^\circ\sim 360^\circ$,俯仰角在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 连续变化,该激光雷达具备常规时间-高度显示(THI)连续观测模式外,还增加距离-高度(RHI)、平面-位置(PPI)扫描模式,能够根据需求实时灵活地获得周围大气气溶胶和云的三维时空分布信息。微脉冲激光雷达主要技术参数如表 1 所示。

2.2 COBALD

COBALD 由瑞士联邦理工学院(ETH Zurich)研制,该传感器在美国怀俄明大学后向散射探空仪原型^[18]基础上,将传感器总质量(含电池)降低至约为 500 g,光学收发与信号采集、通信元器件均集成于 170 mm \times 140 mm 规格的印刷电路板,适合作为探空气球载荷对大气气溶胶与云粒子的后向散射光进行原位测量。COBALD 采用 2 颗中心波长为 455 nm 和 940 nm 的发光二极管(LED)作为光源,激光功率为 250 mW,由置于 2 颗 LED 光源连线中

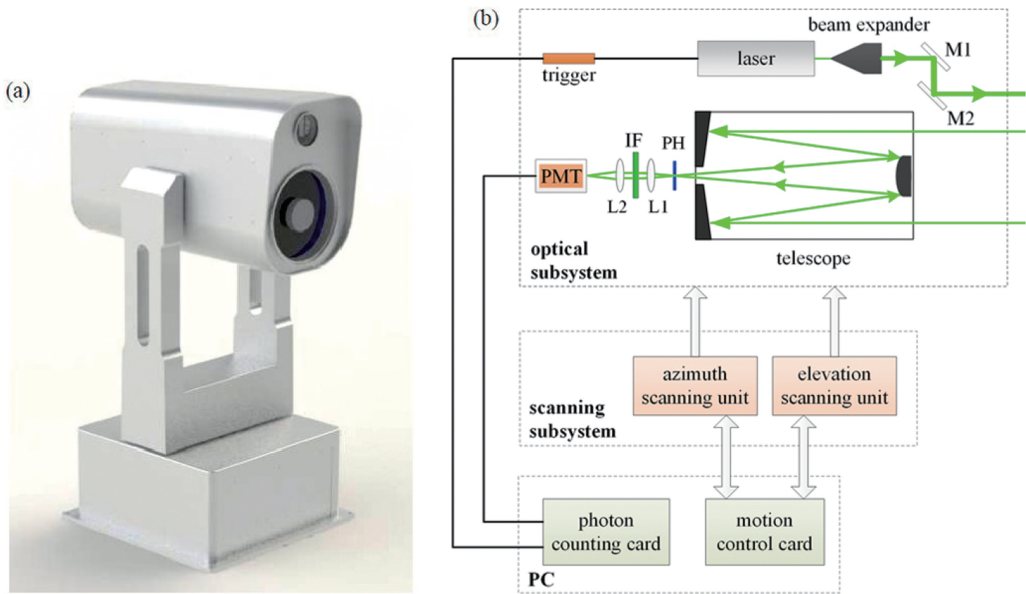


图 1 扫描式微脉冲激光雷达。(a)外观;(b)系统结构图
Fig. 1 Scanning MPL. (a) Photo; (b) schematic of system structure

表 1 扫描式微脉冲激光雷达技术参数

Table 1 Technical parameters of scanning MPL

Transmitting subsystem		Receiver subsystem	
Parameter	Specification	Parameter	Specification
Laser type	LD-pumped Nd : YAG	Telescope type	Schmidt_Cassegrain
Laser wavelength /nm	532	Diameter /mm	200
Pulse energy / μ J	60	Field of view / μ rad	500
Pulse duration /ns	10	Filter bandwidth /nm	1
Pulse repetition frequency /kHz	7		
Beam divergence / μ rad	120		
Data subsystem		Scanning subsystem	
Parameter	Specification	Parameter	Specification
Detector type	PMT	Azimuth angle /($^{\circ}$)	0~360
Detection mode	Photon counting	Elevation angle /($^{\circ}$)	0~180
Range resolution /m	37.5		

点的硅基光电二极管作为光电探测器,探测器接收视场角为 6° ,几何因子约束下探测器接收盲区为 0.5 m,主要测量距传感器 10 m 处的大气分子、气溶胶和云粒子的后向散射光信号。具体技术参数如表 2 所示。由于白天背景光造成光电探测器饱和,

表 2 COBALD 技术参数

Table 2 Technical parameters of COBALD

System parameter	Specification
Optical wavelengths /nm	455 and 940
Time resolution /s	1(typically)
Dimensions /(mm \times mm \times mm)	170 \times 40 \times 20
Weight with batteries /g	500
Power supply /V	8 \times 1.5, 2 \times 9
Altitude /km	0~30

COBALD 仅适用于夜晚测量。实验分析指出,对于整条探测廓线,COBALD 的绝对误差在 5% 以内,在平流层下层的精度优于 1%^[19]。

2.3 昆明大气观测实验

2017 年 7 月 15 日至 8 月 15 日,在昆明市西山区气象局(25.01 $^{\circ}$ N, 102.65 $^{\circ}$ E)开展了一个月的对流层-下平流层大气成分联合观测实验,实验仪器包括扫描式微脉冲激光雷达、多轴差分吸收光谱仪、自动气象站和携带 COBALD 载荷与数字式无线电探空仪的探空气球等。微脉冲激光雷达从 7 月 19 日至 8 月 15 日,全天 24 h 连续观测,探空气球在每晚 21:30 至 22:30 间视气象条件择机升空,气球施放地点与雷达布放位置水平距离约 15 m。激光雷达

观测时间完整覆盖探空气球上升全程,激光雷达单条廓线累计平均时间设置为 1 min,采样率为 4 MS/s,对应垂直空间分辨率为 37.5 m,COBALD 随气球上升中每秒记录一次数据,空间分辨率即探空气球每秒平均上升值为 5 m。

3 数据处理方法

3.1 数据同步算法

基于 COBALD 测量双波长(455 nm, 940 nm)的大气后向散射比(R_b),这一大气后向散射比可以表示为

$$R_b(r, \lambda) = \frac{\beta_a(r, \lambda) + \beta_m(r, \lambda)}{\beta_m(r, \lambda)}, \quad (1)$$

式中: $\beta(r, \lambda)$ 为对应波长 λ 在高度 r 处的后向散射系数;下标 a 代表气溶胶;m 代表分子散射部分。 $R_b(r, \lambda)$ 与波长 λ 间关系可表述为

$$\frac{R_b(r, \lambda_1) - 1}{R_b(r, \lambda_2) - 1} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{4-\alpha(r)}, \quad (2)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为 2 个不同的波长; α 为与粒子尺度相关的 Angstrom 波长指数,变换可得由 $R_b(r, \lambda)$ 表示的波长指数公式^[20],即

$$\alpha(r) = 4 - \ln \left[\frac{R_b(r, 940) - 1}{R_b(r, 455) - 1} \right] / \ln \left(\frac{940}{455} \right). \quad (3)$$

假设散射光主要受细粒子模态影响,忽略不同波长组合对计算波长指数的影响,使用 Angstrom 波长指数可以将 COBALD 测量结果转换至微脉冲激光雷达工作波长(532 nm),则有

$$R_b(r, 532) = 1 +$$

$$[R_b(r, 940) - 1] \times (532/940)^{4-\alpha(r)}, \quad (4)$$

(3)式可以进一步简写为

$$\alpha(r) = 4 - \ln C_1(r) / \ln(940/455), \quad (5)$$

式中: C_1 为色比,反映气溶胶粒子尺度大小,与粒子半径正相关^[21],其表达式为

$$C_1(r) = \frac{R_b(r, 940) - 1}{R_b(r, 455) - 1}. \quad (6)$$

3.2 边界条件约束下的激光雷达反演后向散射比方法

微脉冲激光雷达距离分辨随高度变化,且包含大气信息的后向散射光功率 $p(r)$, $X(r) = p(r) \times r^2$ 排除了距离衰减因素,突出大气变化对信号的影响,因而在分析激光雷达数据时常将距离修正信号 $X(r)$ 作为原始信号。Fernald 方法变形后,可以得到由米氏散射激光雷达回波信号计算大气后向散射比的方法,在参考高度 R_f 以下各层高度 R 处,大气后向散射比可表示为^[22]

$$R_{b-Lidar}(r) = \frac{X(R) \exp \left[2(S_a - S_m) \int_R^{R_f} \beta_m(r) dr \right]}{\frac{X(R_f)}{\beta_a(R_f) + \beta_m(R_f)} + 2S_a \int_R^{R_f} X(r) \exp \left[2(S_a - S_m) \int_R^{R_f} \beta_m(r') dr' \right] dr} \cdot \frac{1}{\beta_m(R)}, \quad (7)$$

式中: $R_{b-Lidar}$ 为激光雷达给出的大气后向散射比; $S_a = \alpha_a / \beta_a$ 为气溶胶激光雷达比,取值随波长和气溶胶粒子类型的不同而不同,计算中设置为一个不随高度变化的常数,在中国地区取值为 40~55 sr,一般取 50 sr^[23]; $S_m = \alpha_m / \beta_m$ 为分子雷达比,由瑞利散射理论计算可得 $S_m = 8\pi/3$ sr。

Fernald 方法反演后向散射比需要 3 个假设条件,除气溶胶激光雷达比外,还需要确定大气分子的后向散射系数和消光系数,并假定一个参考高度处的气溶胶后向散射系数,以其作为求解伯努利方程的边界条件^[24],假设条件取值的不同会造成反演结果的不同。在 COBALD 同步测量的条件下,忽略探空气球上升过程中水平漂移对测量结果的影响,COBALD 原位测量数据可以提供以上 3 项假设值中的两项,减少了反演过程中的不确定性。参考高度处气溶胶后向散射系数为

$$\beta_a(R_f) = \beta_m(R_f) [R_{b-COBALD}(R_f) - 1], \quad (8)$$

式中: $R_{b-COBALD}$ 为 COBALD 给出的大气后向散射比原位测量值。

分子后向散射系数廓线也可以通过探空仪实测温度、压力值计算得到,即

$$\beta_m(r) = N_m(r) \cdot \sigma_m(r) = \frac{296}{T_{measure}(r)} \cdot \frac{P_{measure}(r)}{1.013 \times 10^5} \cdot N_L \times 5.45 \left(\frac{550}{\lambda} \right)^4 \times 10^{-32}, \quad (9)$$

式中: $N_m(r)$ 为高度 r 处大气分子数密度; $\sigma_m(r)$ 为分子后向散射截面; $T_{measure}(r)$ 为探空仪实测温度值; $P_{measure}(r)$ 为实测大气压力值;常数 $N_L = 2.479 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$, 是温度为 $T = 296 \text{ K}$, 压强为 $P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的状态下 1 m^3 体积内大气分子个数。

4 实验结果与分析

4.1 同步观测个例分析

图 2 所示为 7 月 27 日夜晚激光雷达与探空气球的同步观测结果,气球于 21:59 释放升空,上升至 9 km 高度需要约 30 min,激光雷达在此期间连续观测。图 2(a)所示为激光雷达从放球前 5 min 开始,共 35 min 的平均距离修正信号,从雷达回波可以看出,气溶胶主要分布在 3 km 以下,随高度指数减少,分别在 4~6 km、7.5~8.5 km 高度范围探测到强粒子散射,可初步判断为高云与卷云层;图 2

(b)给出了 COBALD 测量得到的后向散射比廓线,实线和点划线分别对应 455 nm 和 940 nm 波长,点划线为利用 Angstrom 指数转换计算得到的 532 nm 后向散射比结果,相同高度处,后向散射比随波长变长而增大,3 km、7 km 高度附近后向散射比接近于 1,说明此高度范围内气溶胶含量稀少,后向散射接近于分子水平;图 2(c)所示为根据 COBALD 测量结果计算得到的色比 C_1 值廓线;图 2(d)所示为探空仪同步相对湿度(RH)廓线。从测量结果可以看出,存在云层的高度内,粒子半径与相对湿度均相应增大。

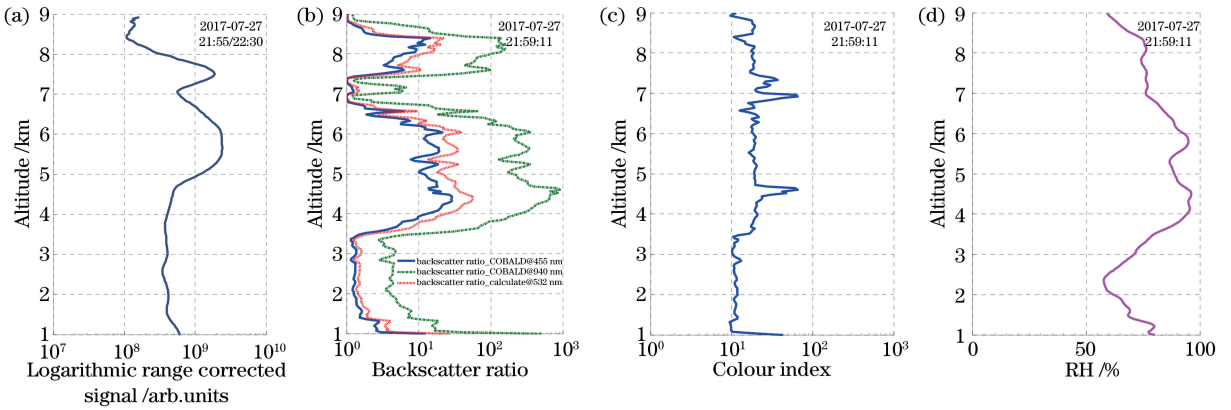


图 2 2017 年 7 月 27 日同步观测个例。(a)激光雷达 RCS 回波平均廓线;(b) COBALD 后向散射比廓线;(c) C_1 廓线;(d)相对湿度廓线

Fig. 2 Example of synchronous observation on 27th July, 2017. (a) Average profile of lidar RCS echo; (b) backscatter ratio profile measured by COBALD; (c) C_1 profile; (d) RH profile

4.2 激光雷达与探空仪探测结果对比

图 3 所示为 2017 年 7 月 31 日 2 种仪器后向散

射比的同步观测结果,图中实线和点划线分别为激光雷达测量结果和 COBALD 结果。探空仪释放时

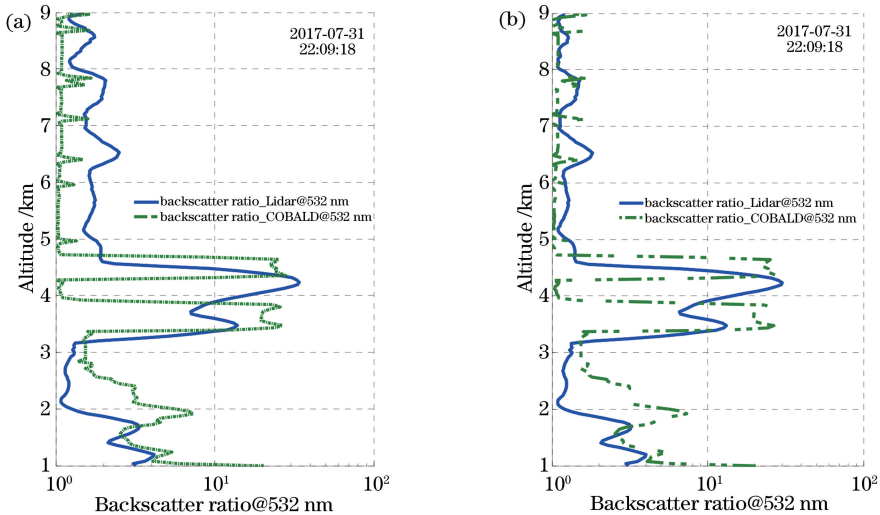


图 3 激光雷达与 COBALD 后向散射比测量结果对比。(a)使用模型值作边界条件的对比结果;(b)使用实测值作边界条件的对比结果

Fig. 3 Comparison of backscatter ratios measured by lidar and COBALD. (a) Comparison of results using model values as boundary conditions; (b) comparison of results using measured values as boundary conditions

间为 22:09,从探空仪升空时刻开始,取激光雷达连续 30 min 内 9 km 以下平均信号计算后向散射比廓线,对 COBALD 廓线抽样,取每间隔 7、8 点的平均值为该距离门内测量值,转换垂直空间分辨率同激光雷达一致。图 3(a)所示为使用标准大气模型温、压数值,参考高度处取假设值计算得到的结果;图 3(b)所示为融合 COBALD 数据,使用探空仪实测值作为边界条件后的计算结果,此时激光雷达反演中输入参数仅有激光雷达比为假设值(50 sr)。从图 3 可以看出,在整条廓线内 2 种仪器的观测结果具有良好的一致性,2 km 高度附近存在气溶胶层,在 3~5 km 内连续有 2 层云出现;与微脉冲激光雷达探测结果相比,COBALD 对各层高度上的气溶胶分布变化更敏感,融合 COBALD 探空数据后,6 km 以上高度 2 种仪器观测结果匹配度显著提高。

对比分析微脉冲激光雷达与 COBALD 探空仪测量后向散射比的差异,在同步时间窗口内,2 种仪器的测量结果在下列几种情况存在较大偏差,主要表现在:1) 在多层云出现或单层云较厚时,激光雷达回波信号过云后发生迅速衰减,COBALD 对云顶以上范围的气溶胶垂直结构变化更敏感;2) 水平风速的升高和探测高度的增加会加剧探空气球上升过程中位置漂移引入的观测差异。

对 2 种仪器同步窗口内的廓线(13 天数据)进行筛选与质量控制,为减少激光雷达几何因子和探空气球随风场偏移对测量结果相关性的影响,研究范围限定在 1~4 km 高度;使用增加阈值条件的微分零交叉法^[25]判断激光雷达回波廓线中云底位置,剔除雷达中有多层云出现或厚云底以上范围数据,将反演参考高度设在云底以下位置;剔除数值小于 1 和大于 6 的数据点。联合观测期内 2 种仪器的对比结果如图 4 所示,图中横坐标为激光雷达测量后向散射比结果,纵坐标为 COBALD 测量结果,质量控制后共有 $N=1203$ 组有效数据对,两者相关系数(R^2)为 0.87,方均根误差(R_{MSE})为 0.752,对比偏差(B_{IAS})为 0.47,激光雷达测量结果较 COBALD 整体偏大。图 5 给出了计算相同高度 2 种仪器后向散射比相对偏差 $100\% \times (R_{b-Lidar} - R_{b-COBALD}) / R_{b-COBALD}$ 得到的相对偏差廓线,可以看出在 1~4 km,除 7 月 20 日和 8 月 7 日的个别数据点外,整体相对偏差保持在 20% 以内。在整条廓线范围内,76% 的数据对相对偏差处于 10% 以内。

4.3 气溶胶垂直结构时空分布

微脉冲激光雷达与 COBALD 探空仪均能提供

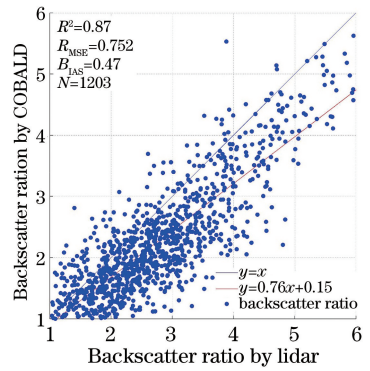


图 4 后向散射比对比结果

Fig. 4 Comparison of backscatter ratio

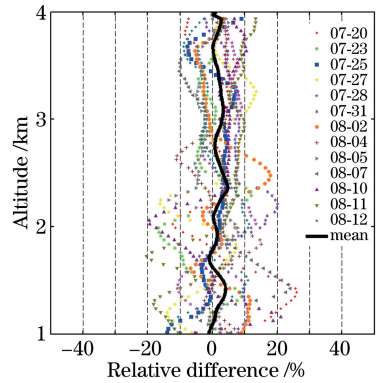


图 5 后向散射比相对偏差廓线

Fig. 5 Relative deviation profiles of backscatter ratio

大气后向散射比廓线,前者为遥感测量,具有时空分辨率高,能够连续实时观测等优点;后者随探空气球上升原位测量粒子后向散射比,测量精度高。2 种仪器相互补充,可以有效提高后向散射比的探测能力。图 6 所示为 7 月 31 日激光雷达连续 1 h 测量所得后向散射比 R_b ,实线框中区域为探空气球上升同步窗口,虚线框中显示了图 3 廓线中出现气溶胶层和云层的连续变化过程。图 7 为 8 月 14 日连续 24 h 测得的微脉冲激光雷达距离平方信号 R_{CS} 的 THI 图,7:00 起低云上升并逐步消散,20:00 开始云层沉降至 1 km 以下形成降雨的演变过程。可以看出,在连续探测气溶胶垂直结构精细变化过程中,激光雷达具有明显优势。

5 结 论

2017 年 7 月 15 日至 8 月 15 日,在昆明使用微脉冲激光雷达与球载传感器 COBALD 开展了同步观测实验,研究 2 种仪器数据的异同,分析气溶胶垂直结构分布的时空特征。2 种仪器实验测量结果具有较好的一致性,融合 COBALD 探空数据可以减少微脉冲激光雷达反演后向散射比中的假设参数。

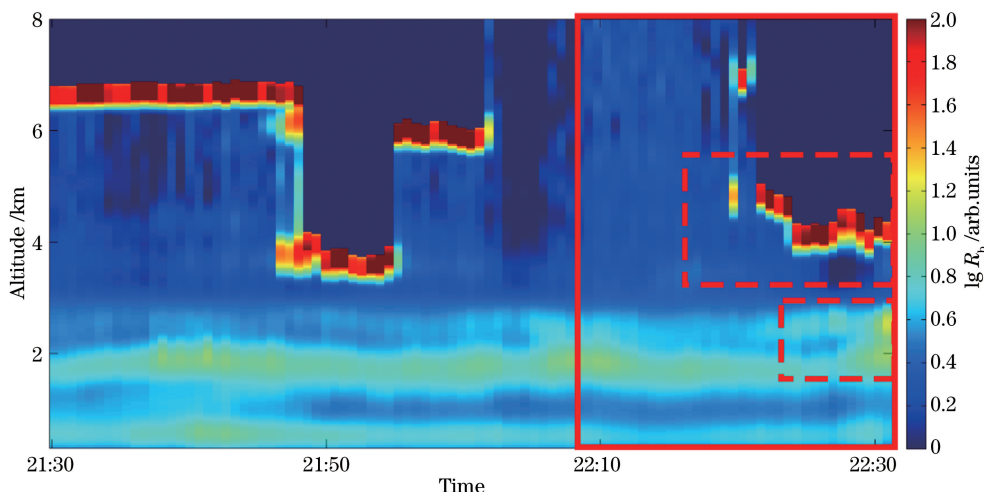


图6 2017年7月31日激光雷达后向散射比观测结果

Fig. 6 Backscatter ratio measured by lidar on 31th July, 2017

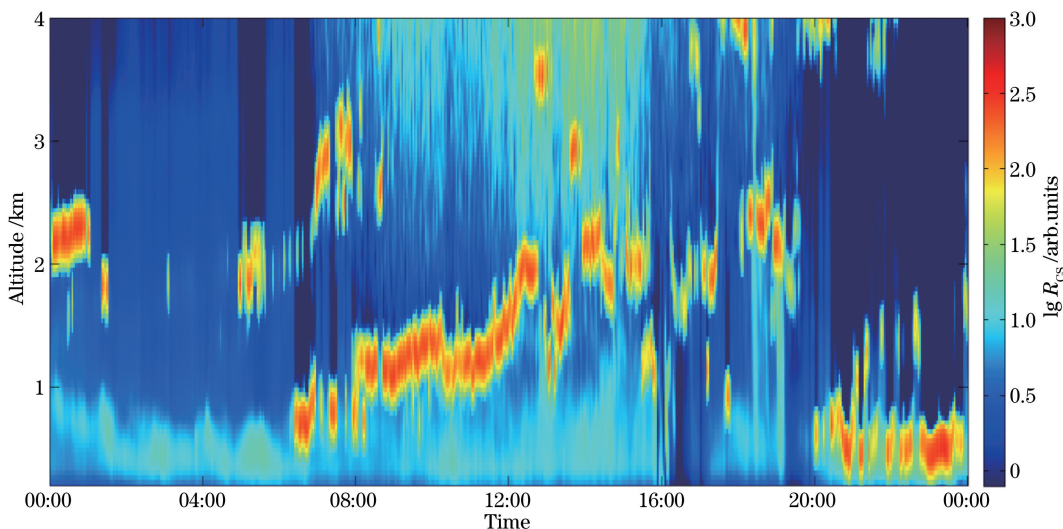


图7 2017年8月14日24 h激光雷达距离平方信号

Fig. 7 R_{CS} within 24 hours on 14th August, 2017

质量控制后,在1~4 km范围内后向散射比廓线相关系数为0.87,方均根误差为0.752。

结果表明:COBALD可以作为微脉冲激光雷达理想的对比与辅助测量仪器,可以为标定气溶胶光学参数廓线的激光雷达测量结果提供新思路;微脉冲激光雷达与探空数据相互补充,对提高气溶胶垂直结构探测水平、促进微脉冲激光雷达开展业务化观测具有一定意义。

参 考 文 献

- [1] Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, *et al.* Climate change 2013: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Song X Q, Liu Z S, He Y, *et al.* Experimental

researches of atmosphere lidar system working by day [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(4): 593-599.

宋小全, 刘智深, 贺岩, 等. 白天工作条件下大气激光雷达探测的实验研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(4): 593-599.

- [3] Hua D X, Song X Q. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 21-27.

华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 21-27.

- [4] Chen S S, Xu Q S, Xu C D, *et al.* Calculation of whole atmospheric aerosol optical depth based on micro-pulse lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0701002.

- 陈莎莎, 徐青山, 徐赤东, 等. 基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0701002.
- [5] Chen C, Song X Q. LabVIEW software design of data acquisition and visualization for atmospheric lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 116-122.
陈超, 宋小全. 基于 LabVIEW 大气激光雷达数据采集与可视化软件的设计[J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 116-122.
- [6] Mao J D, Hua D X, He T Y. A compact Mie scattering lidar and its observation [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 284-288.
毛建东, 华灯鑫, 何廷尧. 小型米散射激光雷达的研制及其探测[J]. 光子学报, 2010, 39(2): 284-288.
- [7] Zhu C X, Cao N W, Yang F K, *et al.* Micro pulse lidar observations of aerosols in Nanjing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 050101.
祝存兄, 曹念文, 杨丰恺, 等. 南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 050101.
- [8] Wang Z J, Du L B, Li X X, *et al.* Observations of marine aerosol by a shipborne multiwavelength lidar over the Yellow Sea of China [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9262: 926218.
- [9] Du L B, Wang Z J, Chen C, *et al.* Development and applications of a micropulse lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 84-88.
杜立彬, 王章军, 陈超, 等. 微脉冲激光雷达系统实验观测及应用[J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 84-88.
- [10] Yoon S C, Kim S W, Kim M H, *et al.* Ground-based Mie-scattering lidar measurements of aerosol extinction profiles during ABC-EAREX 2005: comparisons of instruments and inversion algorithms [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2008, 86(2): 377-396.
- [11] Tao Z, McCormick M P, Wu D. A comparison method for spaceborne and ground-based lidar and its application to the CALIPSO lidar [J]. Applied Physics B, 2008, 91(3/4): 639-644.
- [12] Solanki R, Singh N. LiDAR observations of the vertical distribution of aerosols in free troposphere: comparison with CALIPSO level-2 data over the central Himalayas [J]. Atmospheric Environment, 2014, 99: 227-238.
- [13] Zhu W Y, Xu C D, Qian X M, *et al.* Statistical analysis of the spatial-temporal distribution of aerosol extinction retrieved by micro-pulse lidar in Kashgar, China [J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2531-2537.
- [14] Zhang Z Y, Su L, Chen L F. The ground-based lidar combined with sun photometer for aerosol vertical profiles and optical properties over Beijing [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, 17: 012033.
- [15] He Q S, Li C C, Mao J T, *et al.* A study on the aerosol extinction-to-backscatter ratio with combination of micro-pulse LIDAR and MODIS over Hong Kong [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(11): 3243-3256.
- [16] Bian J C, Pan L L, Paulik L, *et al.* *In situ* water vapor and ozone measurements in Lhasa and Kunming during the Asian summer monsoon [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(19): L19808.
- [17] Chen C, Wang Z J, Meng X Q, *et al.* Development of a scanning micro-pulse lidar for aerosol and cloud detection [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9262: 926216.
- [18] Rosen J M, Kjome N T. Backscattersonde: a new instrument for atmospheric aerosol research [J]. Applied Optics, 1991, 30(12): 1552-1561.
- [19] Brabec M, Wienhold F G, Luo B P, *et al.* Particle backscatter and relative humidity measured across cirrus clouds and comparison with microphysical cirrus modelling [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(19): 9135-9148.
- [20] Vernier J P, Fairlie T D, Natarajan M, *et al.* Increase in upper tropospheric and lower stratospheric aerosol levels and its potential connection with Asian pollution [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(4): 1608-1619.
- [21] Khaykin S M, Engel I, Vömel H, *et al.* Arctic stratospheric dehydration - Part 1: unprecedented observation of vertical redistribution of water [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(22): 11503-11517.
- [22] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [23] Li H, Sun J Y, Chen Z, *et al.* Aerosol optical properties observation in Qingdao offshore area with shipborne lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(4): 486-494.
李辉, 孙加运, 陈震, 等. 船载激光雷达观测青岛海域气溶胶光学性质实验研究[J]. 量子电子学报,

- 2017, 34(4): 486-494.
- [24] Di H G, Hou X L, Zhao H, *et al.* Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 244206.
狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析[J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 244206.
- [25] Wang X P, Song X Q, Chen Y B, *et al.* Observation and validation of cloud layer structures from the mobile Doppler lidar and radiosonde during spring in Beijing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (s2): s201001.
王箫鹏, 宋小全, 陈玉宝, 等. 激光雷达观测北京春季云垂直结构及探空对比研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s201001.