

# 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶光学特性及污染研究

朱首正<sup>1,2</sup>, 卜令兵<sup>1\*</sup>, 刘继桥<sup>2</sup>, 王勤<sup>1</sup>, 杨巨鑫<sup>2</sup>, 张扬<sup>3</sup>, 竹孝鹏<sup>2</sup>, 陈卫标<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>上海卫星工程研究所, 上海 201109

**摘要** 为实现对气溶胶光学参数的大范围、高精度、定量化探测,使用一套基于碘分子滤波器的机载高光谱分辨率激光雷达(HSRL)系统开展飞行实验,同时在地面设置辅助验证观测站。实验研究了秦皇岛地区的气溶胶变化趋势、不同下垫面类型下的气溶胶分布以及秦皇岛气溶胶光学厚度(AOD)的高值地区,并将 HSRL 系统反演的 AOD 数据与地面站点的太阳光度计和卫星遥感器测得的数据进行对比分析,三者相关性优于 0.95。结合地面气象数据和机载观测数据,对不同飞行天次下秦皇岛地区的污染物来源以及城镇、山地、海洋等不同下垫面类型下的气溶胶光学参数分布特征进行分析,包括气溶胶后向散射系数、气溶胶消光系数、雷达比、色比和退偏比。结果表明:城镇地区的大气低层中以生物质燃烧和工业产生的气溶胶为主,海洋地区大气低层中以污染型海洋气溶胶为主,山地地区大气低层中的粒子尺寸较大,以污染型沙尘粒子为主。

**关键词** 遥感; 机载高光谱分辨率激光雷达; 气溶胶垂直分布; 气溶胶光学参数; 污染分析

中图分类号 P412.25

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1710003

## 1 引言

气溶胶在大气辐射收支平衡、气候变化、雨水和云的形成以及环境污染研究等方面起着重要作用<sup>[1]</sup>。气溶胶的光化学特性也对空气污染物的形成和传输有着重要影响。研究对流层气溶胶的时空分布特征对掌握环境变化和气候变化非常重要。因此,利用有效的观测手段对气溶胶的光学特性和垂直分布特征进行研究具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。激光雷达作为应用较为广泛的气溶胶主动探测仪器,在气溶胶的垂直分布特征研究和污染物传输探测方面发挥着不可替代的作用。Huang 等<sup>[5]</sup>应用微脉冲偏振激光雷达及相应的地面配套仪器对一次大规模沙尘传输过程中的气溶胶垂直分布特征和长距离传输特征进行了研究,并且估计了沙尘对辐射强迫效应及气候的影响。麻晓敏等<sup>[6]</sup>研究了气溶胶消光系数

(AEC)廓线和气溶胶后向散射系数(ABC)廓线的分布特征。Gong 等<sup>[7-9]</sup>研究了不同类型的气溶胶分布所引起的区域污染和气候效应。毛建东等<sup>[10-12]</sup>利用激光雷达探测了大气气溶胶特性,推进了激光雷达技术的发展。与常规的激光雷达相比,高光谱分辨率激光雷达(HSRL)可以准确探测 AEC 和 ABC 等光学参数,可有效避免假设激光雷达比(LR)对气溶胶光学参数的反演精度所带来的影响<sup>[13]</sup>,为准确分析气溶胶的区域性和长期性污染特征演变及其带来的气候效应提供了很好的研究手段。

HSRL 主要利用滤波器来分离气溶胶的后向散射回波信号和大气分子的后向散射回波信号,进而得到精确的气溶胶参数<sup>[14]</sup>。国内研究人员利用高光谱滤波器对大气风速和气溶胶光学参数的探测方法进行了研究,验证了碘分子滤波器的优点、适用性以及 HSRL 在大气气溶胶探测方面的独特优势,促

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-24; 录用日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(41675133)、国家重点研究计划(2017YFF0104605)、民用航天预研项目(D040103)

通信作者: \*lingbingbu@nuist.edu.cn

进了 HSRL 的发展和应<sup>[15-16]</sup>。国外方面, McGill 等<sup>[17]</sup>开展了机载 HSRL 实验,对观测地区的气溶胶垂直分布特征以及 AEC 和 ABC 进行了准确的探测,为机载 HSRL 探测气溶胶光学参数提供了参考。美国国家航空航天局(NASA)进行了长时间的机载 HSRL 观测气溶胶的实验,飞行区域覆盖了美国本土大面积地区,得到了气溶胶分布特征和光学参数特性。一方面,NASA 将观测到的气溶胶参数与星载“卡利普索”(CALIPSO)探测到的数据进行对比,实现了对卫星数据的校正和验证,为全球的气溶胶数据定标提供了依据<sup>[18-20]</sup>。另一方面,NASA 结合大量的气溶胶观测数据,对气溶胶的种类和微物理特性也进行了相关的研究<sup>[21-23]</sup>。此外,NASA 还开展联合观测实验,对区域气溶胶污染物传输及其传输过程中污染物的分层现象和演变进行了详细分析。Reid 等<sup>[24]</sup>利用长时间的观测数据对美国东南部地区的气溶胶边界层演变特征及污染物生成和传输过程进行了研究,得到了该地区精确的气溶胶微物理特征。

本文介绍了一套基于碘分子滤波器的机载 HSRL 系统,于 2019 年 3 月利用此系统在秦皇岛地区进行了多次飞行实验,并在地面布置了辅助验证站点。将机载 HSRL 系统反演得到的气溶胶光学厚度(AOD)数据与地基太阳光度计以及卫星遥感器得到的结果进行对比验证。另外,结合机载 HSRL 系统反演结果和秦皇岛本地的气象条件,对一次污染过程进行了分析。分析了飞行过程中清洁

天和污染天时不同下垫面类型下的气溶胶光学参数的垂直分布特征及气溶胶参数的变化特征,包括 AEC、ABC、退偏比(DR)、LR、色比(CR)。

## 2 机载实验、HSRL 系统及数据介绍

### 2.1 机载实验介绍

2019 年 3 月,在秦皇岛地区开展了多次飞行观测实验,原因是秦皇岛市地处河北省东北部,临近渤海湾,具有多个地表类型,有利于测试不同下垫面类型下雷达系统探测气溶胶特性的能力。飞机主要围绕秦皇岛周边地区进行观测,路线途经渤海湾近海、城镇以及山地地区。利用机载 HSRL 系统对短时间内秦皇岛地区不同下垫面类型下的气溶胶分布和演变特征展开了大范围的实时观测。

表 1 为 2019 年 3 月在秦皇岛地区进行的飞行实验的时间段及飞行高度参数表。图 1 为飞行过程中机载相机拍摄到的不同地表类型的图片,从左到右依次对应山地、城镇和海洋区域。

表 1 飞行实验时间表

Table 1 Schedule of flight experiment

Date	Begin time	End time	Flight height /km
2019-03-04	10:23	14:11	4
2019-03-11	10:20	15:04	5
2019-03-14	10:15	13:30	7
2019-03-16	10:16	13:49	8
2019-03-18	10:18	14:56	4
2019-03-19	10:09	14:38	5

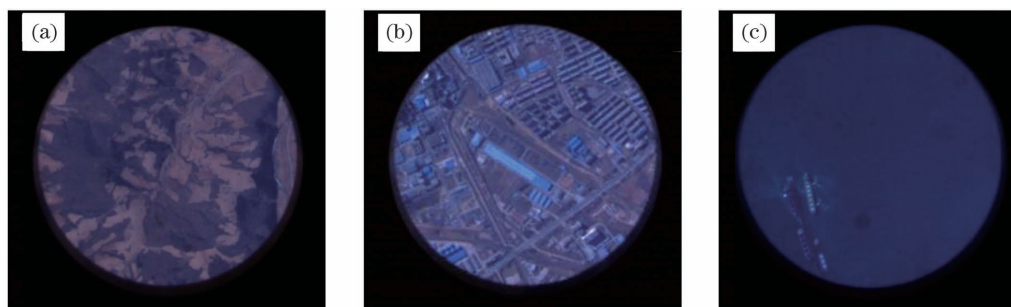


图 1 相机拍摄的不同地表类型图。(a)山地;(b)城镇;(c)海洋

Fig. 1 Images of different surface types taken by camera. (a) mount; (b) town; (c) ocean

### 2.2 地面验证点和卫星数据

为了进行对比验证,在抚宁地面站和北戴河站分别安装了两台 CE318 太阳光度计,太阳光度计可测量的波长为 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940, 1020 nm,通过该仪器可实时监测飞行过程中的 AOD 值和大气中的水汽含量。将光度计测量到的 500 nm 波长处的 AOD 值与 HSRL 系统的反演值

进行对比。太阳光度计参数及反演方法可参照 AERONET 网站 (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)。同时,将卫星遥感器获得的 AOD 值与 HSRL 系统的反演值进行相关性分析。卫星遥感器主要包括 Terra 卫星和 Aqua 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)、臭氧监测仪(OMI)、可见光红外成像辐射仪(VIIRS)。在空间上,将卫星上

搭载的卫星遥感器获得的 AOD 数据在经纬度格点上进行插值,插值间隔为  $0.1^\circ$ ,这样可实现不同日期飞行路径上对应经纬度范围内的卫星数据点与机载 HSRL 系统计算的数据点的匹配,便于对两组数据进行对比分析。在时间上,卫星过境时间相对较短,故主要选取卫星过境时间点对应的机载 HSRL 计算的 AOD 值与卫星遥感器测得的数据来进行对比分析。

### 2.3 HSRL 系统参数、气溶胶通道接收系统和光学参数的介绍

机载 HSRL 系统的主要参数如表 2 所示,气溶胶通道接收系统如图 2 所示。大气回波信号首先经过分色片,波长为  $1064\text{ nm}$  的信号透射过滤光片之后,经聚焦透镜入射到探测器中。图 2 虚线框中是三个波长为  $532\text{ nm}$  的接收探测器。大气分子的后向散射信号先经过一个波长为  $532\text{ nm}$  的窄带滤光片,之后进入法布里-珀罗干涉仪(FPI)中,背景噪声被滤除。滤光后再经过一个偏振分束器,其中一束光被反射进垂直通道并被探测器接收,另一束光经

过一个波长为  $532\text{ nm}$  的半波片和另一个偏振分束器。分束后得到的反射光和透射光强度的比值为  $0.71:0.29$ ,透射光信号经过聚焦透镜后进入平行通道探测器,反射光信号经过碘分子滤波器后进入分子通道探测器。

表 2 HSRL 系统的主要参数

Table 2 Main parameters of HSRL system

Parameter	Value
Wavelength /nm	532.245
Laser energy /mJ	21
Laser pulse width /ns	15
Pulse repeat frequency /Hz	40
Telescope aperture /mm	150
Beam divergence angle /mrad	0.16
Field of view /mrad	1
Filter bandwidth /nm	0.35
Filter transmittance /%	80
Sampling rate of data acquisition card /MHz	250
Resolution of data acquisition card /bit	14

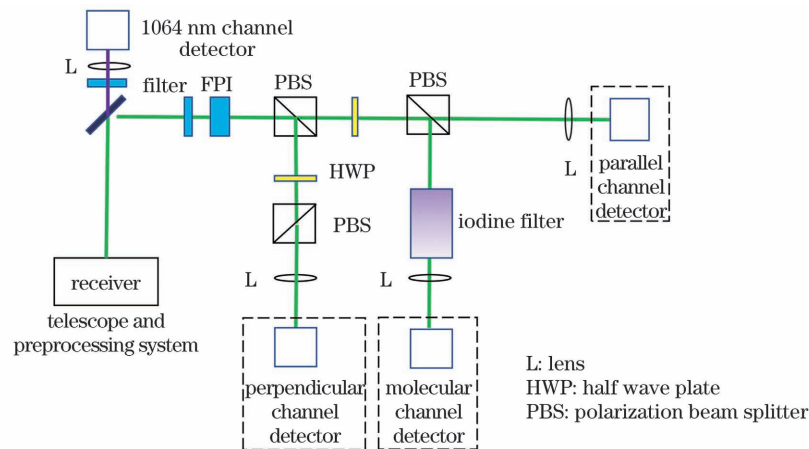


图 2 气溶胶通道接收系统

Fig. 2 Receiving system of aerosol channels

本文主要对 HSRL 系统反演的气溶胶光学参数进行分析,相关机载激光雷达回波信号的分析结果可参考文献[25-26]。利用 HSRL 系统反演气溶胶参数的方法可参考文献[27]。其中,大气(包括空气分子和气溶胶)总的 DR 系数( $A_{DR}$ )是垂直通道信号  $B_{\perp}$  与平行通道信号  $B_{\parallel}$  的比值,它主要与被测物的非球形状态有关:

$$A_{DR} = \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} \quad (1)$$

气溶胶 LR( $A_{LR}$ )的表达式为

$$A_{LR} = \frac{A_{AEC,532}}{A_{ABC,532}} \quad (2)$$

式中: $A_{AEC,532}$  为  $532\text{ nm}$  波长处的 AEC; $A_{ABC,532}$  为  $532\text{ nm}$  波长处的 ABC。

利用 Fernald 算法计算得到  $1064\text{ nm}$  波长处的 ABC 为  $A_{ABC,1064}$ ,选取相应的 LR 值为  $40\text{ sr}^{[28]}$ ,再结合 HSRL 反演计算得到的  $532\text{ nm}$  波长处的 ABC,则可求得  $CR(A_{CR})$ ,其表达式为

$$A_{CR} = \frac{A_{ABC,532}}{A_{ABC,1064}} \quad (3)$$

## 3 实验结果

### 3.1 不同日期下的 AOD 相关性分析及分布

为了验证机载 HSRL 系统反演 AOD 值的可靠

性,选取不同日期下 HSRL 系统反演得到的 AOD 值与卫星遥感测得的 AOD 值进行对比,如图 3 所示,AOD 主要是低层气溶胶的贡献,因此选取 AEC 的积分高度的范围为 0~3 km。图 3(a1)~(a6)为不同日期下 HSRL 系统反演得到的 AOD 值和卫星遥感测得的 AOD 值的相关性结果,其中  $N$  为数据点数,可以看出,3 月 4 日、11 日、14 日、16 日两者的相关系数( $R$ )都在 0.93 以上,18 和 19

日两者的  $R$  较小,分别为 0.85703 和 0.90478。图 3(b1)~(b6)是不同日期下 HSRL 系统反演得到的 AOD 值与卫星遥感测得的 AOD 值的相对偏差,相对偏差的范围为  $-20\% \sim 20\%$ ,18 日和 19 日的相对偏差偏向于负值,其原因是这两天的飞行高度为 3 km 左右,且大气污染较严重,对应气溶胶层分布较高,因此 HSRL 系统反演得到的 AOD 值较小。

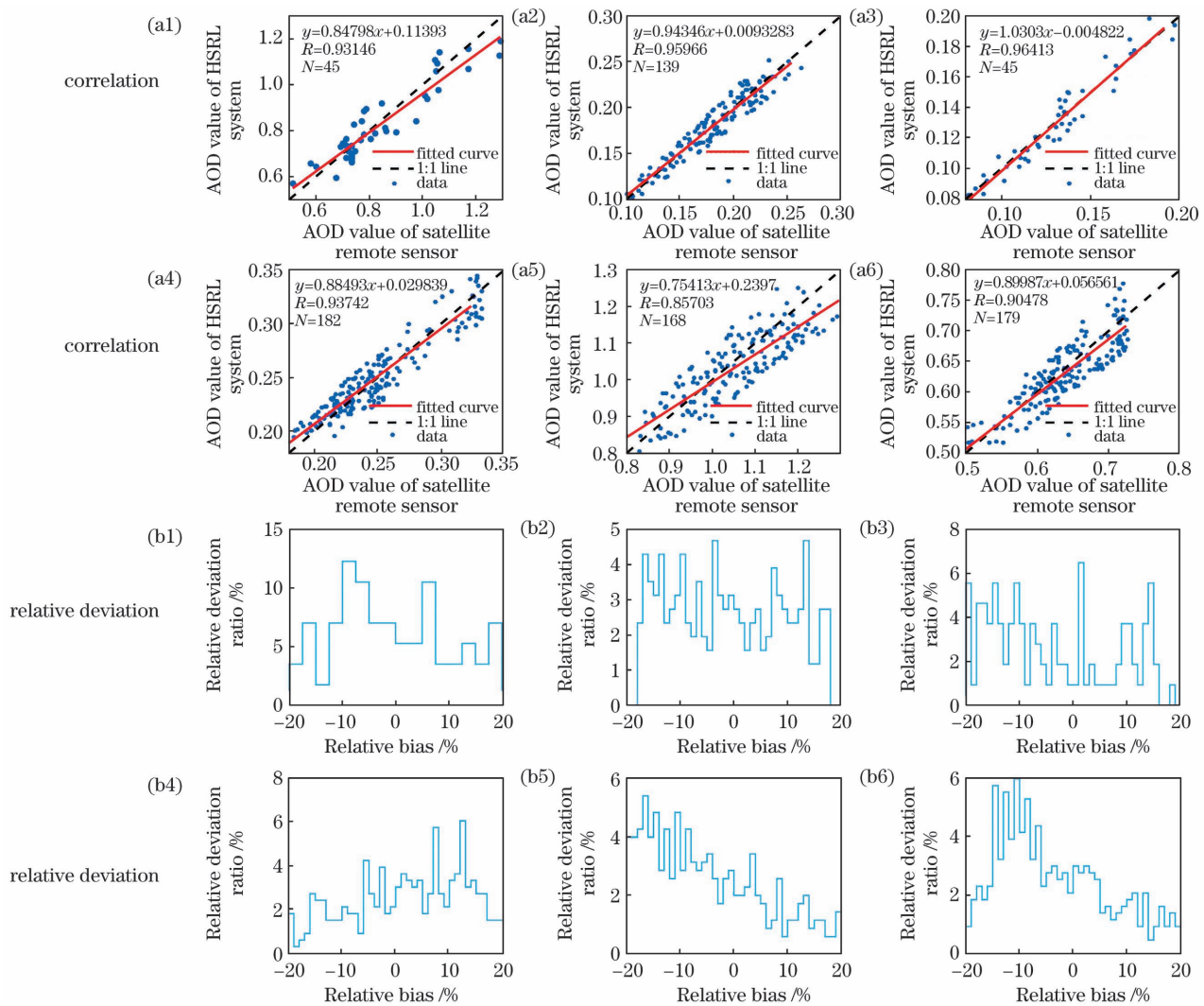


图 3 不同日期下 HSRL 系统反演得到的 AOD 值与卫星遥感测得的 AOD 值的对比。(a1)(b1) 2019-03-04; (a2)(b2) 2019-03-11;(a3)(b3) 2019-03-14;(a4)(b4) 2019-03-16;(a5)(b5) 2019-03-18;(a6)(b6) 2019-03-19

Fig. 3 Comparison between AOD values retrieved by HSRL system and those measured by satellite remote sensor on different dates. (a1)(b1) 2019-03-04; (a2)(b2) 2019-03-11; (a3)(b3) 2019-03-14; (a4)(b4) 2019-03-16; (a5)(b5) 2019-03-18; (a6)(b6) 2019-03-19

在图 3 中所选的 6 天时间内,HSRL 系统反演得到的 AOD 值与 CE318 和卫星遥感测得的 AOD 值的相关性与绝对偏差如图 4 所示。HSRL 系统反演得到的 AOD 值与太阳光度计 CE318 测得的 AOD 值的相关性如图 4(a)所示。可以发现,两

者相关系数超过 0.99,相关性良好。HSRL 系统反演得到的 AOD 值与卫星遥感测得的 AOD 值的相关性如图 4(b)所示。可以发现,两者相关系数超过 0.99。在图 4(c)中,纵坐标为 HSRL 系统反演得到的 AOD 值与太阳光度计 CE318 测得的 AOD

值的绝对偏差,横坐标为两者 AOD 值的平均值。可以发现,两者 AOD 值的绝对偏差随着两者 AOD 平均值的变化,分布相对均匀,主要分布的范围为  $-0.02 \sim 0.02$ ,这表明两者的偏差较为稳定且较小。在图 4(d)中,纵坐标为 HSRL 系统反演得到的

AOD 值与卫星遥感器测得的 AOD 值的绝对偏差,横坐标为两者 AOD 值的平均值。可以发现,随着两者 AOD 平均值的增大,绝对偏差增大。出现该现象的原因是,当 AOD 值较高时,存在卫星对 AOD 值高估的现象。

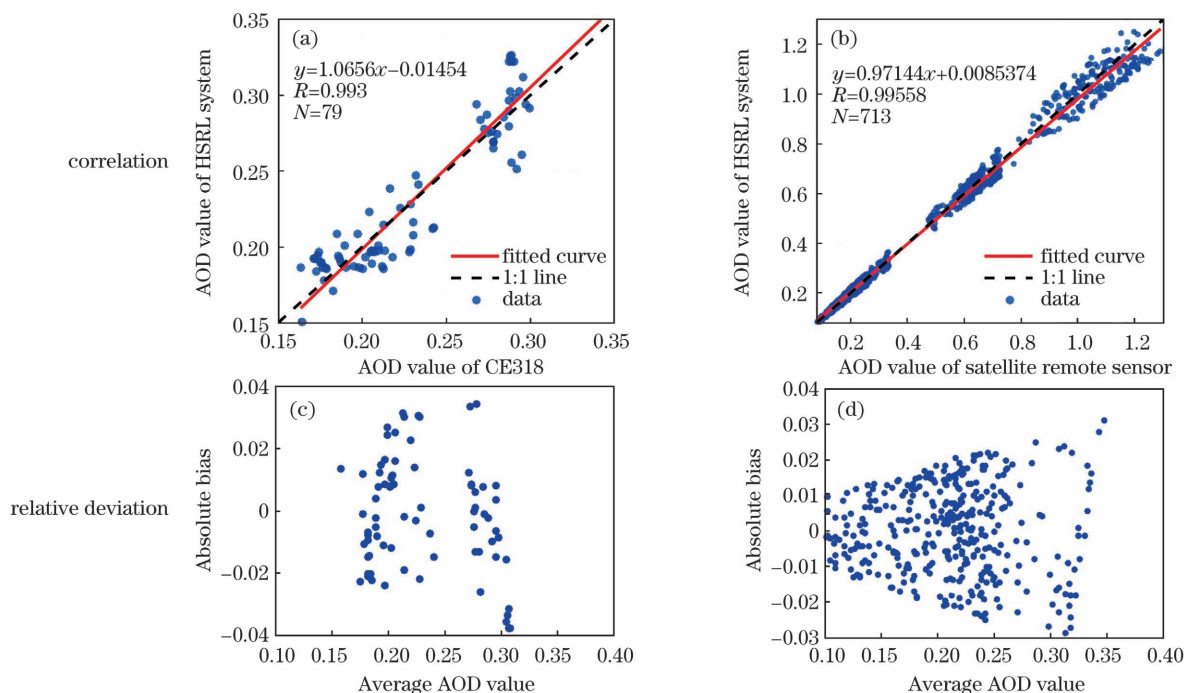


图 4 HSRL 系统反演得到的 AOD 值与 CE318 和卫星遥感器测得的 AOD 值的相关性与绝对偏差。(a)(c)HSRL 系统与 CE318;(b)(d)HSRL 系统与卫星遥感器

Fig. 4 Correlations and absolute biases between AOD values retrieved by HSRL system and those measured by CE318 and satellite remote sensor. (a)(c) HSRL system and CE318; (b)(d) HSRL system and satellite remote sensor

接着,对不同日期下飞行路径上 HSRL 反演得到的 AOD 值分布进行了研究,这有利于进一步分析污染物的分布情况和成因。3 月 4 日,AOD 高值区主要是近海地区和东部地区,此处 AOD 值的范围为  $0.80 \sim 0.95$ 。3 月 11 日,AOD 高值区主要是西部地区,城镇以及近海地区的 AOD 值较大,AOD 值在 0.3 左右。3 月 14 日和 16 日,天气条件良好,气溶胶浓度相对较小。海洋和山地地区的 AOD 值差别不大;沿海城镇地区的 AOD 值略大。3 月 18 日沿海城镇地区的 AOD 值较大,AOD 值的范围为  $1.2 \sim 1.3$ 。东部城镇地区的 AOD 值比西部大;北部及西部山地地区的 AOD 值较小,AOD 值约为 0.8。3 月 19 日,东部沿海地区和山地地区的 AOD 值较小,西部山地地区和沿海城镇地区的 AOD 值较接近,AOD 值约为 0.7。

### 3.2 不同日期下 AOD 值的变化及污染源分析

图 5 是不同日期下 HSRL 系统反演的 AOD 值的变化图。清洁天 3 月 11 日、14 日、16 日的

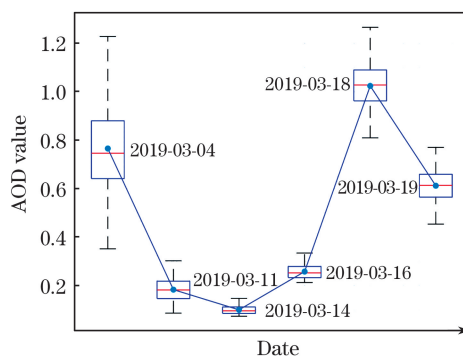


图 5 在不同日期下,HSRL 系统反演的 AOD 值  
Fig. 5 AOD values retrieved by HSRL system at different dates

AOD 值较小,其范围为  $0.1 \sim 0.3$ ;污染天 3 月 4 日、18 日、19 日的 AOD 值的范围为  $0.6 \sim 1.1$ 。3 月 4 日是污染较重的一天,AOD 值的平均值约为 0.8。结合表 3 所示的不同日期下秦皇岛的天气状况可知,4 日的空气质量指数(AQI)为 174,西南风为 3~4 级。3 月 11 日、14 日、16 日大气较干

净,西北风驱散了秦皇岛当地的污染物,AOD 值降低。3 月 18 日和 19 日,AOD 值的平均值分别为 1.0 和 0.6,风向转为西南风,风向的转变会导致京津冀、山东半岛、华北等地区排放的污染物传输

至秦皇岛地区,导致地区性污染。可以看出,秦皇岛地区的污染情况与风向的变化紧密相关,气象条件在污染防治和传输过程扮演着重要的角色。

表 3 不同日期下秦皇岛的天气状况

Table 3 Weather conditions in Qinhuangdao at different dates

Date	AQI	Weather	Temperature	Wind direction	Wind scale
2019-03-04	174	Cloudy	0°C~11°C	Sourthwest	2-3
2019-03-11	80	Sunny	-2°C~14°C	Northwest	3-4
2019-03-14	60	Sunny	-1°C~11°C	Northwest	2-3
2019-03-16	57	Cloudy to sunny	-2°C~14°C	Northwest	2-3
2019-03-18	120	Cloudy to sunny	4°C~18°C	Sourthwest	3-4
2019-03-19	139	Cloudy	7°C~17°C	Sourthwest	3-4

### 3.3 污染天和清洁天的气溶胶参数分布特性分析

#### 3.3.1 气溶胶污染个例分析

图 6 为 2019 年 3 月 4 日的气溶胶分布图。如图 6(a) 所示,在近海海岸大气低层高度  $h \leq 1$  km 处,气溶胶粒子的 ABC 值较大,存在明显的气溶胶层。由表 3 可知,3 月 4 日秦皇岛地区以西南风为主,风将中部工业地区排放的烟尘和污染型颗粒物吹向秦皇岛海岸。由于海洋上空水汽含量较多,因

此污染物粒子间会发生碰并增长作用,这容易造成污染物在海面上累积,形成稳定的气溶胶悬浮层<sup>[29-30]</sup>。在图 6(b) 中,当近海地区  $h \leq 0.3$  km 时,DR 值较小,其范围为 0.08~0.10;  $h = 1$  km 处的气溶胶粒子对应的 DR 值的范围为 0.10~0.15,该区为烟雾等粗粒子的混合区。图 6 很好地反映出污染天秦皇岛地区的气溶胶层分布、粒子特性和污染物特征。

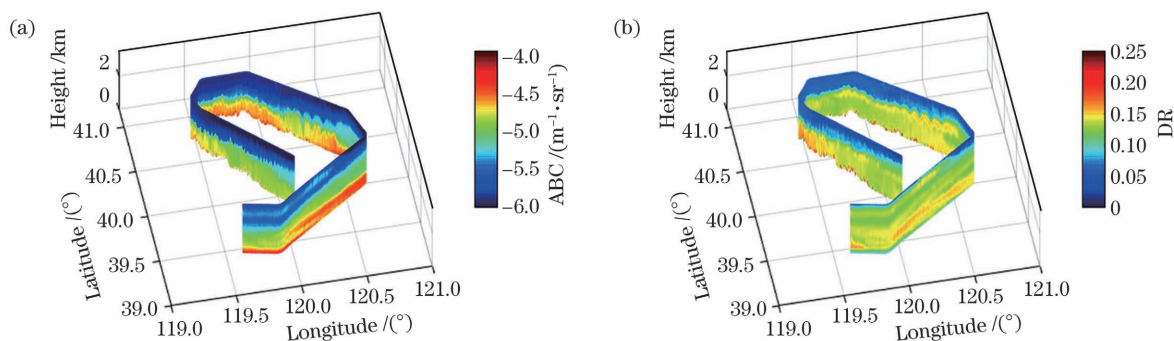


图 6 2019 年 3 月 4 日的气溶胶分布。(a) ABC 分布;(b) DR 分布

Fig. 6 Aerosol distribution on March 4, 2019. (a) ABC distribution; (b) DR distribution

图 7 是 2019 年 3 月 4 日 10:30~14:00 时间段内气溶胶参数的分布图,包括 532 nm 波长处的 ABC、AEC、DR、LR、CR 和 1064 nm 波长处的 ABC。ABC 以及 AEC 的分布结果可以用来表征不同地区的气溶胶浓度。LR、DR 和 CR 数据可以用来分辨粒子的大小和形状以及气溶胶类型。沙尘粒子对应的 DR 值比较大,城镇以及工业地区粒子的 DR 值较小<sup>[31-32]</sup>;LR 值和 CR 值也会随着气溶胶粒子的大小、形状和成分的变化而变化。对于粗模式颗粒,对流层气溶胶在 532 nm 波长处的 LR 值通常为 20~50 sr,而对于细模式或高吸收型模式,气溶胶颗粒则具有较高的 LR 值<sup>[33]</sup>。如图 7 所示,在

10:30~11:00、12:30~13:00 飞行时段内,对应观测区域的气溶胶浓度较大,几百米高度处的 DR 值在 0.1 左右;LR 值和 CR 值较大,LR 值的范围为 40~60 sr,CR 值的范围为 2.1~2.5,这与城镇及工业污染型气溶胶类型特征一致。在 10:30~11:30 飞行时段内, $h = 1$  km 处,存在 LR 低值区,LR 值的范围为 20~30 sr,相应时间段内的 DR 值约为 0.15,该高度层中的粒子尺寸较大。在 11:00~11:30 飞行时段内,山地地区  $1.0 \text{ km} < h \leq 2.0 \text{ km}$  处的 LR 值较小,其范围为 16~30 sr;DR 值较大,其值约为 0.18,该高度层中主要存在的是沙尘等混合型粗粒子。在其他飞行时段内,近地面几百米高

度内 CR 值的范围为 2.1~2.5, 细粒子占比较大<sup>[34-36]</sup>。由以上分析可知, 2019 年 3 月 4 日污染天秦皇岛地区近地面几百米高度的污染主要由细粒子

引起; 在  $1.0 \text{ km} < h \leq 1.5 \text{ km}$  处, 细粒子减少, 该高度区域主要为沙尘与工业排放污染物的混合污染区。

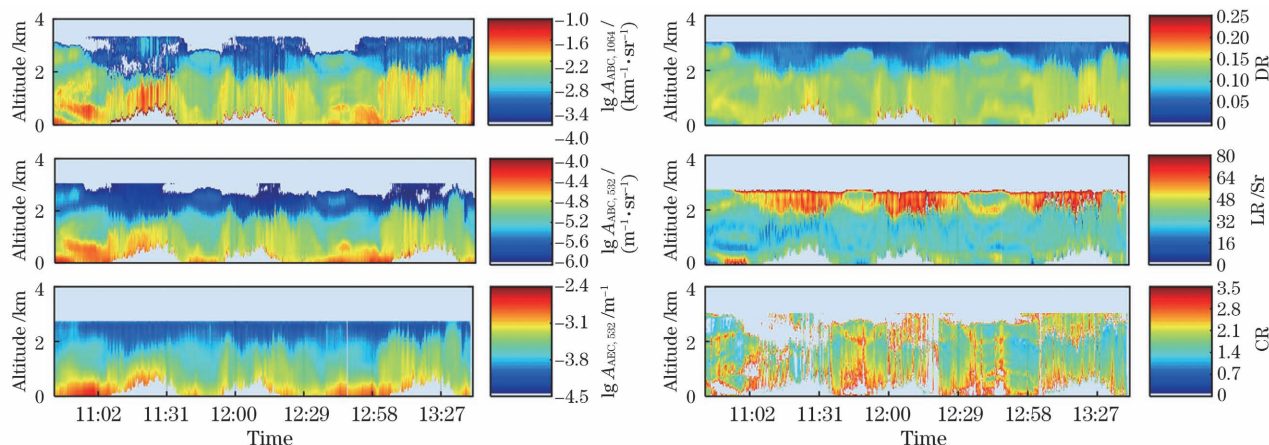


图 7 2019 年 3 月 4 日的气溶胶参数分布。(a) 1064 nm 波长处的 ABC; (b) 532 nm 波长处的 ABC; (c) 532 nm 波长处的 AEC; (d) 532 nm 波长处的 DR; (e) 532 nm 波长处的 LR; (f) 532 nm 波长处的 CR

Fig. 7 Distributions of aerosol parameters on March 4, 2019. (a) ABC at wavelength of 1064 nm; (b) ABC at wavelength of 532 nm; (c) AEC at wavelength of 532 nm; (d) DR at wavelength of 532 nm; (e) LR at wavelength of 532 nm; (f) CR at wavelength of 532 nm

### 3.3.2 不同日期不同下垫面类型下的气溶胶光学参数的垂直分布特征

对 2019 年 3 月 4 日、18 日、19 日污染天和 11 日清洁天城镇、山地、海洋地区不同高度对应的气溶胶分布以及参数变化特征进行分析。图 8 为 532 nm 波长处的气溶胶参数(ABC、AEC、DR、LR 和 CR)的垂直廓线; 阴影区代表各个高度上的标准差, 用来衡量不同高度上气溶胶参数的变化。3 月 4 日, 城镇和海洋地区大气边界层高度约为 0.5 km, 大气低层处的气溶胶浓度较大, 海洋大气低层处的 AEC 值为  $0.7 \text{ km}^{-1}$ , LR 值的范围为 30~35 sr, CR 值较大, 该区域主要存在的是污染型海洋气溶胶; 城镇大气低层处的 AEC 的最大值为  $1.75 \text{ km}^{-1}$ , 在城镇地区  $h = 0.3 \text{ km}$  处, DR 值较小, 但 LR 值和 CR 值较大, 该区域中主要存在的是工业和生物质燃烧的混合污染型气溶胶。山地大气低层处的 ABC 值和 AEC 值比城镇地区大气低层处的小, 比海洋地区大气低层处的大。在山地地区  $0.3 \text{ km} \leq h \leq 0.5 \text{ km}$  处, DR 值比城镇和海洋相应范围内的 DR 值大, 其值约为 0.15, LR 值约为 40 sr, CR 值较小, 该区域中主要存在的是沙尘和城镇污染物粒子的混合类型气溶胶。3 月 11 日, 在大气边界层高度约为 0.5 km 处, 城镇、山地、海洋地区的 ABC 值和 AEC 值均较小且数值接近, 大气低层中存在少量气溶胶粒子。山地地区大气低层中的

DR 值明显比城镇和海洋地区大气低层中的大, 但 LR 值和 CR 值小, 这表明山地地区大气低层中主要存在的是沙尘等混合型粗粒子。海洋地区大气低层中的 DR 值小于 0.1, 且 LR 值较小, 其范围为 15~25 sr, 该区域主要存在的是海洋气溶胶。城镇地区大气低层中 LR 值的范围为 25~30 sr, 风向由西南风转变为西北风, 将少量的沙尘粒子传输至城镇地区, 沙尘和生物质燃烧产生的细颗粒混合, 因此 LR 值比 3 月 4 日小。3 月 18 日, 地区间的污染物传输过程导致污染物增多, 秦皇岛地区大气低层中的 AOD 值增大, 并且垂直分布上出现两个明显的气溶胶层, 即在  $h = 0.5 \text{ km}$  处存在一个稳定的气溶胶层, 在  $0.5 \text{ km} < h \leq 1 \text{ km}$  处存在浓度较小的气溶胶层。在  $h = 0.5 \text{ km}$  处, 城镇地区的 DR 值范围为 0.05~0.10, 且 LR 值存在一个从大到小的变化过程, 这表明城镇地区近地面主要存在的是工业和生物质燃烧的混合污染型气溶胶。在  $0.5 \text{ km} < h \leq 1.0 \text{ km}$  处, DR 值随高度逐渐减小, LR 值约为 30 sr, 该气溶胶层可能是海洋型气溶胶与城镇气溶胶的混合类型。山地地区  $h \leq 1.5 \text{ km}$  处的 CR 值明显比城镇和海洋地区小, DR 值的范围为 0.10~0.15, 这表明该地区主要存在的是以沙尘为主的污染型气溶胶。3 月 19 日, 在大气边界层高度为 0.5 km 处, 低层气溶胶浓度较大。城镇和海洋地区大气低层处的 DR 值的范围为 0.05~0.10, LR 值

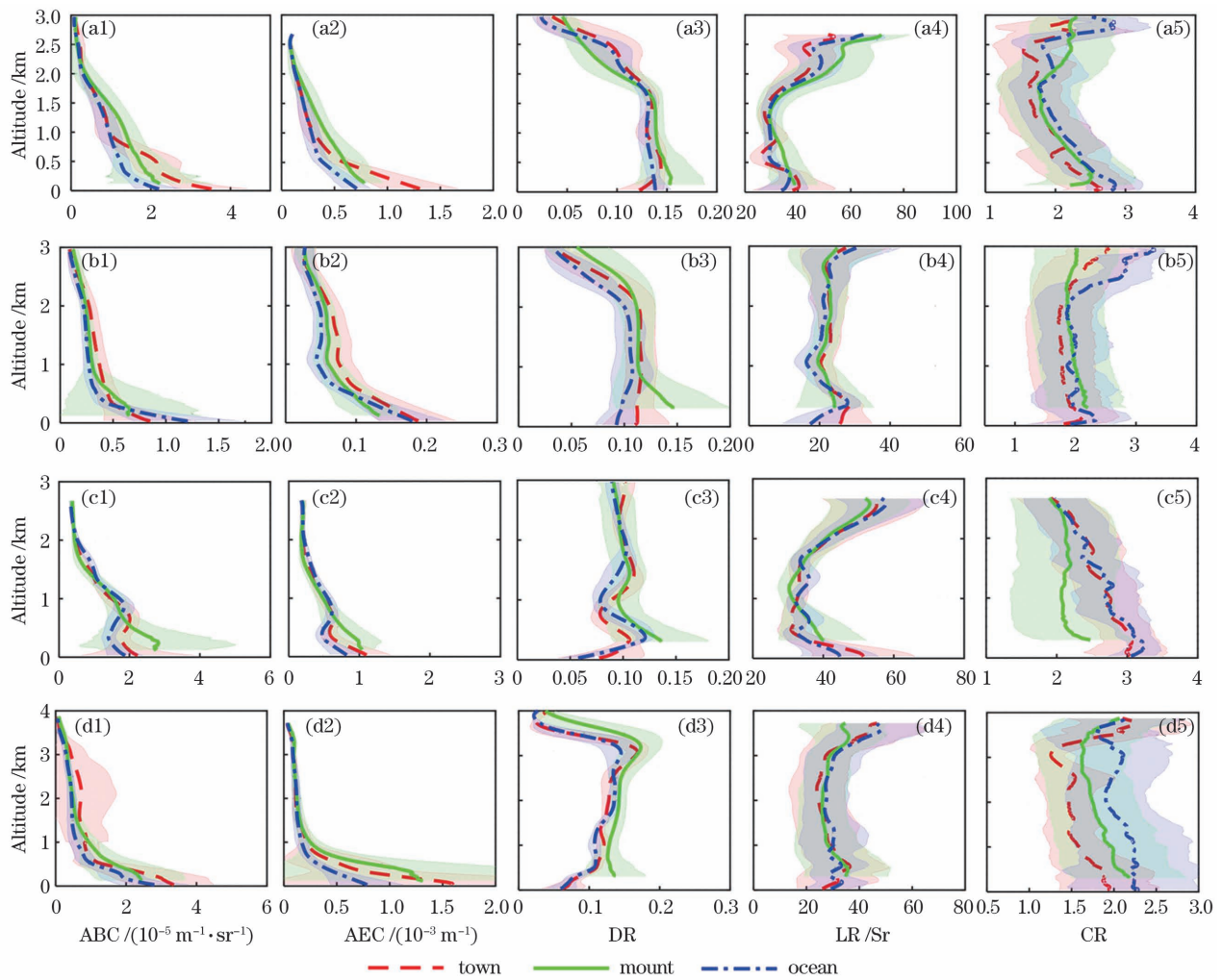


图 8 532 nm 波长处气溶胶参数的垂直廓线,阴影是各个高度上的标准差。(a1)~(a5) 2019-03-04;  
(b1)~(b5) 2019-03-11;(c1)~(c5) 2019-03-18;(d1)~(d5) 2019-03-19

Fig. 8 Vertical profiles of aerosol parameters at wavelength of 532 nm, in which shadow is standard deviation at each height. (a1)~(a5) 2019-03-04; (b1)~(b5) 2019-03-11; (c1)~(c5) 2019-03-18; (d1)~(d5) 2019-03-19

约为 30 sr,这表明城镇及海洋地区大气低层中主要存在的是混合型气溶胶。山地地区大气低层中主要存在的是沙尘粒子占主导的混合型气溶胶。

可以发现,污染天秦皇岛城镇地区近地面层中主要存在的是工业排放的污染物以及生物质燃烧产生的细颗粒,大气低层中的 ABC 值和 AEC 值随着高度的升高而急剧减小,DR 值在 0.1 以下,LR 值的范围为 35~45 sr,CR 值的范围为 2.1~2.5;海洋地区大气低层中主要以污染型海洋气溶胶为主;山地区域大气低层中主要存在的是沙尘等粗粒子,部分地区大气低层中存在的是污染型沙尘气溶胶,DR 值的范围为 0.10~0.18。该污染主要由重工业地区排放的工业污染物和本地生物质燃烧产生的气溶胶粒子造成的。

为了进一步分析不同日期不同高度区域内的气

溶胶粒子分布特征,对 4 个高度层( $0 < h \leq 0.6$  km,  $0.6$  km  $< h \leq 1.5$  km,  $1.5$  km  $< h \leq 2.4$  km,  $2.4$  km  $< h \leq 3$  km)内的 DR 值、LR 值、CR 值进行分析,其结果如图 9 所示。3 月 4 日,在  $h \leq 2.4$  km 处,DR 平均值范围变化不大,其范围为 0.13~0.14,此时粒子分布较为均匀。LR 值和 CR 值随着高度的增加先减小后增大,在较大 LR 值和较大 CR 值处,大气低层中主要存在的是细颗粒气溶胶。在  $2.4$  km  $< h \leq 3$  km 处,随着高度的增加 DR 值减小较快,LR 值和 CR 值增大,相应的气溶胶粒子形状的不规则性逐渐减小,气溶胶粒子浓度减小,无明显的气溶胶层。3 月 11 日,在  $h \leq 2.4$  km 处,DR 值变化范围较小;在  $0 < h \leq 0.6$  km 处,LR 值和 CR 值较大,在  $h > 0.6$  km 处,LR 值和 CR 值的变化不明显。这表明清洁天不同地区的大气低层中气溶胶



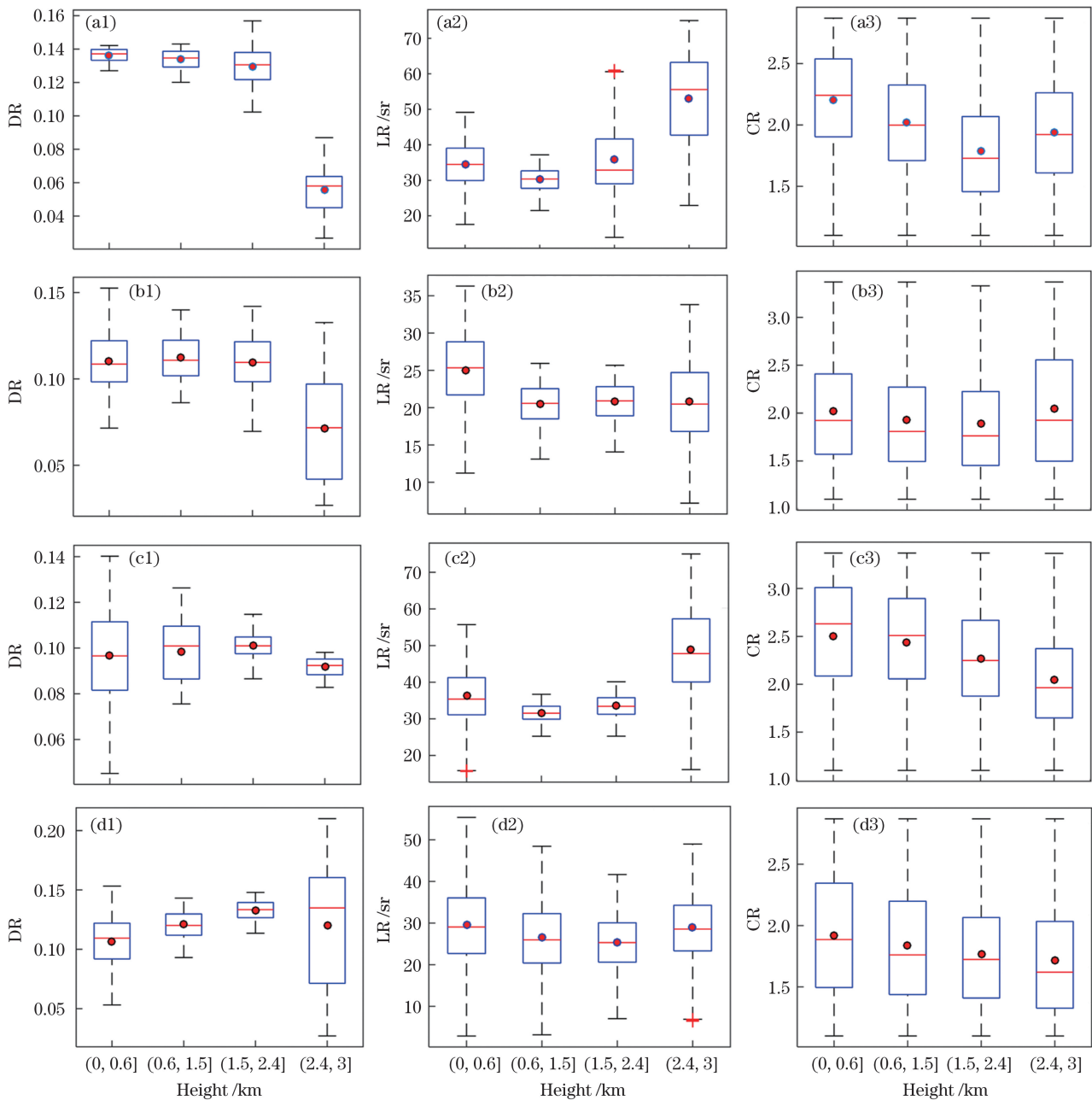


图 9 不同日期下的 DR 值、LR 值、CR 值。(a1)~(a3) 2019-03-04; (b1)~(b3) 2019-03-11; (c1)~(c3) 2019-03-18; (d1)~(d3) 2019-03-19

Fig. 9 DR, LR, and CR values on different dates. (a1)~(a3) 2019-03-04; (b1)~(b3) 2019-03-11; (c1)~(c3) 2019-03-18; (d1)~(d3) 2019-03-19

粒子类型差别大,对应的不同高度上的气溶胶分布较为一致。3月18日和19日,DR值在不同高度区间内随着高度的增加先增大后减小,表明气溶胶粒子在整个高度区间内存在明显的分层现象,大气低层中主要是城镇工业污染和生物质燃烧产生的气溶胶;随着高度的增加LR值先减小后增大,在 $0.6\text{ km} < h \leq 2.4\text{ km}$ 处18日LR值的减小比19日多,该区域中主要是沙尘为主的污染型气溶胶粒子;3月18日、19日大气低层中CR值都较大,且随高

度增加逐渐减小,表明大气低层的散射较强,这与大气边界层内气溶胶粒子浓度较大的特征一致。由以上结果可知,气溶胶粒子的光学特性变化可表征不同气溶胶层的分布特征,且两者的变化紧密相关。

## 4 结 论

利用机载 HSRL 系统反演得到的气溶胶数据对秦皇岛地区的大气气溶胶的垂直分布和污染特征进行分析。对不同日期下秦皇岛东西部地区的

AOD 值分布进行探测,将机载 HSRL 系统反演得到的 AOD 结果与地基太阳光度计和卫星遥感器测得的结果进行对比,发现三者相关性优于 0.95。利用气象数据和机载气溶胶观测数据对不同日期下不同地表类型下的边界层变化和气溶胶光学参数的垂直分布进行分析。通过分析可知,城镇地区大气低层中的气溶胶类型为混合型气溶胶,海洋地区大气低层中的气溶胶类型为污染型海洋气溶胶。虽然不同地表类型下的气溶胶类型不同,但是污染主要是由大气低层中的工业和生物质燃烧产生的混合型气溶胶造成的。随后,结合不同日期不同高度层内的三个表征气溶胶粒子类型的参数(DR、LR、CR)对气溶胶层的垂直分布特征进行了详细分析。分析结果展现了 HSRL 系统探测气溶胶垂直分布和气溶胶粒子类型的优势。研究结果在促进 HSRL 系统发展和应用的同时,也为以后利用 HSRL 系统开展区域气溶胶污染研究提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] Kaufman Y J, Tanré D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 215-223.
- [2] Tie X X, Cao J J. Aerosol pollution in China: present and future impact on environment[J]. *Particuology*, 2009, 7(6): 426-431.
- [3] Verma S, Bhanja S N, Pani S K, et al. Aerosol optical and physical properties during winter monsoon pollution transport in an urban environment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(7): 4977-4994.
- [4] Zhao H J, Che H Z, Wang Y Q, et al. Aerosol vertical distribution and typical air pollution episodes over northeastern China during 2016 analyzed by ground-based lidar [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18(4): 918-937.
- [5] Huang Z W, Huang J P, Bi J R, et al. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-U.S. joint dust field experiment [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115: D00K15.
- [6] Ma X M, Zhang H, Shan H H, et al. Statistical distribution of aerosol backscattering coefficient profiles in near-ground at west suburb of Hefei in 2014[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0705001.  
麻晓敏,张辉,单会会,等.合肥西郊2014年近地面气溶胶后向散射系数廓线统计分布[J].*中国激光*, 2016, 43(7): 0705001.
- [7] Gong W, Zhang J Y, Mao F Y, et al. Measurements for profiles of aerosol extinction coefficient, backscatter coefficient, and lidar ratio over Wuhan in China with Raman/Mie lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(6): 533-536.
- [8] Liu J J, Zheng Y F, Li Z Q, et al. Transport, vertical structure and radiative properties of dust events in southeast China determined from ground and space sensors [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(35): 6469-6480.
- [9] Liu B M, Ma Y Y, Gong W, et al. Observations of aerosol color ratio and depolarization ratio over Wuhan[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(6): 1113-1122.
- [10] Mao J D, Hua D X, He T Y, et al. Lidar observations of atmospheric aerosol optical properties over Yinchuan area [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(7): 2006-2010.  
毛建东,华灯鑫,何廷尧,等.银川上空大气气溶胶光学特性激光雷达探测研究[J].*光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 2006-2010.
- [11] Rao Z M, He T Y, Hua D X, et al. Remote sensing of particle mass concentration using multi-wavelength lidar[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(4): 1025-1030.  
饶志敏,何廷尧,华灯鑫,等.多波段激光雷达颗粒物质量浓度探测方法[J].*光谱学与光谱分析*, 2018, 38(4): 1025-1030.
- [12] Jin L, Wu S H, Chen Y B, et al. Doppler lidar observation of aerosols over Beijing during spring 2011 [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 46-51.  
靳磊,吴松华,陈玉宝,等.基于多普勒激光雷达的2011年春季北京地区气溶胶探测实验分析[J].*量子电子学报*, 2013, 30(1): 46-51.
- [13] Shimizu H, Lee S A, She C Y. High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(9): 1373-1381.
- [14] Eloranta E W, Razenkov I A, Hedrick J, et al. The design and construction of an airborne high spectral resolution lidar [C]//2008 IEEE Aerospace Conference, March 1-8, 2008, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [15] Liu J T, Chen W B, Liu Z S. A simulation of simultaneously measuring wind and aerosol optical properties using high spectral resolution lidar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(1): 115-122.  
刘金涛,陈卫标,刘智深.高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究[J].

- 气科学, 2003, 27(1): 115-122.
- [16] Song X Q, Guo J J, Yan Z A, et al. Atmospheric aerosol optical parameters detection research with high spectral resolution lidar[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(9): 1009-1015.  
宋小全, 郭金家, 闫召爱, 等. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(9): 1009-1015.
- [17] McGill M J, Hlavka D L, Hart W D, et al. Airborne lidar measurements of aerosol optical properties during SAFARI-2000 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D13): 8493-8522.
- [18] Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, et al. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36): 6734-6752.
- [19] Rogers R R, Hostetler C A, Hair J W, et al. Assessment of the CALIPSO Lidar 532 nm attenuated backscatter calibration using the NASA LaRC airborne high spectral resolution lidar [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(3): 1295-1311.
- [20] Rogers R R, Hair J W, Hostetler C A, et al. NASA LaRC airborne high spectral resolution lidar aerosol measurements during MILAGRO: observations and validation[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 4811-4826.
- [21] Burton S P, Vaughan M A, Ferrare R A, et al. Separating mixtures of aerosol types in airborne high spectral resolution lidar data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(2): 419-436.
- [22] Müller D, Hostetler C A, Ferrare R A, et al. Airborne multiwavelength high spectral resolution lidar (HSRL-2) observations during TCAP 2012: vertical profiles of optical and microphysical properties of a smoke/urban haze plume over the northeastern coast of the US [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(10): 3487-3496.
- [23] Hair J, Hostetler C, Hu Y X, et al. Combined atmospheric and ocean profiling from an airborne high spectral resolution lidar [J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 22001.
- [24] Reid J S, Kuehn R E, Holz R E, et al. Ground-based high spectral resolution lidar observation of aerosol vertical distribution in the summertime Southeast United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(5): 2970-3004.
- [25] Mao M J, Zhang Y C, Fang H T, et al. Detection of aerosol distribution by atmospheric environment airborne lidar over Qingdao and adjacent sea area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(2): 370-376.  
毛敏娟, 张寅超, 方海涛, 等. 机载激光雷达对青岛及周边海域的气溶胶探测[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 370-376.
- [26] Esselborn M, Wirth M, Fix A, et al. Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(3): 346-358.
- [27] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0710003.  
徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0710003.
- [28] Chi R L, Wu D C, Liu B, et al. Dual-wavelength Mie lidar observations of tropospheric aerosols [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1468-1472.  
迟如利, 吴德成, 刘博, 等. 双波长米散射激光雷达探测对流层气溶胶消光特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(6): 1468-1472.
- [29] Zhang L Y, Niu S J, Wang T S, et al. The comparison of diurnal variation of nanoparticle spectra in sunny and fog-haze days during winter in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 2699-2709.  
张璐瑶, 牛生杰, 王天舒, 等. 南京冬季晴天及雾-霾天气纳米气溶胶粒子谱日变化比较[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 2699-2709.
- [30] Yao Q, Cai Z Y, Han S Q, et al. Effects of relative humidity on the aerosol size distribution and visibility in the winter in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(3): 596-603.  
姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津冬季相对湿度对气溶胶浓度谱分布和大气能见度的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(3): 596-603.
- [31] Omar A H, Winker D M, Vaughan M A, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(10): 1994-2014.
- [32] Tesche M, Ansmann A, Müller D, et al. Vertical profiling of Saharan dust with Raman lidars and airborne HSRL in southern Morocco during SAMUM [J]. *Tellus B*, 2009, 61(1): 144-164.
- [33] Catrall C. Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios of key aerosol types derived from selected aerosol robotic network locations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D10): D10S11.
- [34] Liu C, Su L, Zhang C Y, et al. Comparative analysis

- of vertical distribution of aerosols by using spaceborne lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0413001.
- 刘聪, 苏林, 张朝阳, 等. 星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0413001.
- [35] Liu Z Y, Vaughan M A, Winker D M. Use of probability distribution functions for discriminating between cloud and aerosol in lidar backscatter data [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D15): D15202.
- [36] Burton S P, Ferrare R A, Hostetler C A, et al. Aerosol classification using airborne high spectral resolution lidar measurements-methodology and examples [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(1): 73-98.

## Study on Airborne High Spectral Resolution Lidar Detecting Optical properties and Pollution of Atmospheric Aerosol

Zhu Shouzheng<sup>1,2</sup>, Bu Lingbing<sup>1\*</sup>, Liu Jiqiao<sup>2</sup>, Wang Qin<sup>1</sup>, Yang Juxin<sup>2</sup>, Zhang Yang<sup>3</sup>,  
Zhu Xiaopeng<sup>2</sup>, Chen Weibiao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,  
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology,  
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup> Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

### Abstract

**Objective** Aerosol plays an important role in assessing radiation, climate, cloud formation, and environmental pollution. In addition, the optical and physical properties of aerosols impact the formation and transmission of air pollutants. Therefore, the temporal and spatial distribution characteristics of tropospheric aerosols are important for studying the uncertainty of the aerosol environment and climate change. It is important to study the optical properties and vertical distribution changes of aerosols through effective observation methods. As a widely used active detection instrument of aerosols, lidar plays an irreplaceable role in the detection of vertical distribution of aerosol and changes in pollutant transmission. Related scholars have researched the distribution characteristics of aerosol extinction coefficient (AEC) and aerosol backscatter coefficient (ABC) profiles, as well as the regional pollution and climate impact by different types of aerosol distribution characteristics, which promotes the development of research methods and lidar detection. High spectral resolution lidar (HSRL) can detect aerosol optical parameters, such as AEC and ABC, enhancing the inversion accuracy of aerosol optical parameters. It provides an efficient method for accurate analysis of climate effects and long-term evolution characteristics of aerosols, as well as the evolution of regional and long-term pollution research.

**Methods** In this study, the HSRL system based on an iodine molecular filter is used to conduct an aerosol observation experiment in Qinhuangdao in March, 2019. Firstly, the correlation and absolute deviation between the aerosol optical depth (AOD) results retrieved by HSRL system and the data detected by the sunphotometer on the ground site and satellite remote sensor are discussed and analyzed. Combined with the AOD results of HSRL system and ground meteorological data, the optical characteristics and pollution changes of aerosols during the pollution process in the Qinhuangdao area are studied. The distribution of aerosols on a polluted day and the characteristics of stable aerosol layers in cities and ocean areas are studied, and the vertical distribution and particle characteristics of aerosols corresponding to different underlying surfaces are analyzed. ABC, AEC, depolarization ratio (DR), lidar ratio (LR), and color ratio (CR) data are used to analyze the aerosol-concentration distribution and types of aerosol particles at different heights during the pollution process. The study analyzes the changes in aerosol optical parameters and pollutant characteristics during the pollution process.

**Results and Discussions** According to the comparison results of AOD value, the correlation between the HSRL system and ground-based sunphotometer as well as that between the HSRL system and the satellite remote sensor are

more than 0.99 (Fig. 3 and Fig. 4). We use airborne HSRL system to observe the aerosol distribution in Qinhuangdao, and analyze the distribution characteristics of high AOD areas and the changes in AOD at different dates. Combined with the meteorological data and airborne aerosol data, the pollution process in the Qinhuangdao area is analyzed. The pollution process is affected by the southwest wind (Table 3). The airborne observation data are used to analyze the vertical distributions and changes of aerosol parameters corresponding to different underlying surfaces at polluted days. AEC and ABC values on March 4, March 18, and March 19, 2019 are relatively large. The surface layer of the urban area of Qinhuangdao is dominated by industrial pollutants and fine particles produced during biomass combustion. The ABC and AEC values of the low layer decrease with the increase of height. The DR value is below 0.1, the LR value is between 35 sr and 45 sr, and the CR value is between 2.1 and 2.5 (Fig. 7 and Fig. 8); the interaction between aerosol particles in the ocean area leads to the existence of a mixed aerosol layer, including polluted marine aerosols; aerosols in mountain areas are coarse sand and dust. Polluted dust aerosols dominate in some areas, with DR value between 0.1 and 0.18 (Fig. 9).

**Conclusions** Based on the aerosol data from the HSRL observation experiment, the study analyzes the vertical distribution and pollution characteristics of atmospheric aerosols in Qinhuangdao. We detect the AOD distributions in the east and west regions of Qinhuangdao at different dates, and the AOD observation results are correlated with ground-based and satellite observation data. In addition, we use meteorological data and airborne observation-aerosol data to analyze the boundary-layer changes and vertical distribution of aerosol optical parameters at different dates, and surface types. We observe that the aerosols in the low atmospheric layers of urban areas are mixed aerosols, whereas marine areas are dominated by polluted marine aerosols. The pollutant is a combination of various mixed aerosols. In addition, the types and changes of aerosols under different surface types are different. The pollution is caused by mixed aerosol produced by low-level industries and biomass combustion. The vertical distribution characteristics of three parameters (DR, LR, and CR) that characterized the types of aerosol particles at different dates and altitudes are given. The analysis results of this study reflect the advantages of HSRL system in detecting the vertical distribution of aerosols and regional pollution. Moreover, this study provides reference value for the development and application of HSRL system, and supplies a favorable tool for the future development of regional aerosol pollution research.

**Key words** remote sensing; airborne high spectral resolution lidar; aerosol vertical distribution; aerosol optical parameters; pollution analysis

**OCIS codes** 280.1100; 280.1310; 280.3640