

基于高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法研究

刘秉义¹, 庄全风¹, 秦胜光^{1,2}, 吴松华¹, 刘金涛³

(1. 中国海洋大学 海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100;

2. 北京华航无线电测量研究所, 北京 100013; 3. 中国海洋大学 电子工程系, 山东 青岛 266100)

摘要: 气溶胶是影响气候变化和空气质量的重要因素, 对气溶胶作用的量化分析依赖于气溶胶光学性质及其垂直剖面的精细探测。高光谱分辨率激光雷达利用窄带光学滤波器, 可在光谱上实现对分子散射和气溶胶散射的分离, 从而在不需假设气溶胶激光雷达比的情况下, 独立获取气溶胶消光系数和后向散射系数。文中基于高光谱分辨率激光雷达技术, 开展气溶胶分类方法研究。根据已有的气溶胶分类研究结果, 给出基于气溶胶光学参数的分类方法, 并建立气溶胶分类查找表。利用高光谱分辨率激光雷达于 2015 年春季在青岛地区测量的气溶胶消光系数、后向散射系数和退偏振比, 参照建立的气溶胶分类查找表, 实现了对气溶胶的分类识别, 并用 HYSPLIT 轨迹模式、NAAPS 气溶胶模式进行了印证。个例研究结果表明该方法能够实现对气溶胶类型的正确识别。

关键词: 高光谱分辨率激光雷达; 气溶胶分类; 消光系数; 激光雷达比; 退偏振比

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0411001

Aerosol classification method based on high spectral resolution lidar

Liu Bingyi¹, Zhuang Quanfeng¹, Qin Shengguang^{1,2}, Wu Songhua¹, Liu Jintao³

(1. Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Beijing Huahang Radio Measurement Institute, Beijing 100013, China;

3. Department of Electronic Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aerosols play a key role in climate change and air quality. The quantitative analysis of aerosol's contribution relies on accurate measurements of aerosol optical properties and their vertical profiles. The High Spectral Resolution Lidar(HSRL) has the capability of spectrally discriminating molecular backscatter from aerosol backscatter by a narrow-band optical filter. Therefore aerosol extinction coefficient and aerosol backscatter coefficient can be retrieved independently without assumption of the aerosol lidar ratio. The research on aerosol classification method was conducted based on HSRL technique in this paper. According to published results of aerosol classification, a classification method based on aerosol optical properties was given and an aerosol classification look-up table was provided accordingly. Aerosol

收稿日期: 2016-08-02; 修订日期: 2016-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(40905005, 41375016)

作者简介: 刘秉义(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事大气和海洋激光探测方面的研究。Email: liubingyi@ouc.edu.cn

extinction coefficient, aerosol backscatter coefficient and depolarization ratio measured by HSRL in Qingdao during the spring of 2015 were used to classify aerosol types referring to the established aerosol classification look-up table. The results are consistent with the trajectory model HYSPLIT and aerosol analysis system NAAPS. Results of case studies demonstrate the method in this paper is capable to identify different aerosol types properly.

Key words: HSRL; aerosol classification; extinction coefficient; lidar ratio; depolarization ratio

0 引言

气溶胶是由分散并悬浮在大气中的固态、液态和固液混合态微粒所形成的胶体分散体系,其粒子直径在 $0.001\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间,作为大气的重要组成部分,气溶胶含量很低却扮演着重要角色,对大气变化、气候变化、人类健康等产生重要影响^[1]。在气候变化的驱动因素中,气溶胶和云对气候变化的影响是最不确定性因素^[2],气溶胶既可以通过吸收和散射太阳辐射以及地球的长波辐射来直接扰动地-气系统的辐射能量收支,产生直接气候效应,又可以作为云、雾的凝结核影响云、雾的光学特性,对云的形成、降水过程造成影响,产生间接气候效应。气溶胶也会影响能见度、人类的出行和经济的发展,同时也会影响空气质量,对人类的健康造成影响,特别是肺部和心脏疾病,因此,气溶胶又是大气污染监测的主要内容之一^[3]。气溶胶粒子的大小、结构、形状和在大气中的高度随着空间和时间而改变,其生命周期、光学和微物理特性与气溶胶类型有直接关系,要减少这些不确定因素的影响,需要对气溶胶进行高时间、空间分辨率的持续观测。

激光雷达是一种主动遥感探测技术和工具^[4],高时空分辨率、高灵敏度、连续监测和优越的方向性、相干性、以及实时快速的数据获取处理等特性使激光雷达具有独到的优势,被广泛应用于气溶胶、云、温度和风场等的观测和研究^[5-8]。

用于探测气溶胶的激光雷达主要有 Mie 散射激光雷达、Raman 激光雷达、高光谱分辨率激光雷达等。传统的 Mie 散射激光雷达在反演气溶胶消光系数时,需要假设气溶胶激光雷达比的数值,无法做到精确测量。高光谱分辨率激光雷达 (High Spectral Resolution Lidar, HSRL) 技术是目前气溶胶光学及物理特性参数精细激光探测的热门研究课题,是在

Mie 散射激光雷达的基础上发展而来的一种高精度气溶胶探测技术,也是目前公认的与 Raman 激光雷达并列的两种可不需要条件假定、直接探测气溶胶消光系数的技术之一^[9-10]。Raman 激光雷达虽然可以测量气溶胶消光剖面,但由于 Raman 散射强度太弱,需要的积累时间过长。而 HSRL 利用分子 Rayleigh 散射光谱与气溶胶 Mie 散射光谱展宽分布不同的特性,运用窄带光学滤波器使之分离(即可以滤除气溶胶散射信号或滤除分子散射信号),在不需要假设气溶胶消光系数与后向散射系数之比的情况下,能够获取大气的衰减和散射信息,独立反演气溶胶消光系数和后向散射系数,消除假设引入的误差,达到精确测量气溶胶光学性质的目的。

目前,利用激光雷达观测气溶胶并用以对气溶胶进行分类研究的,较为成熟与领先的主要有以下工作。2002年,Liu 等人对亚洲沙尘暴沙尘气溶胶的退偏振比和激光雷达比进行了统计分析^[11]。2006年,Sugimoto 与 Lee 利用双波长偏振雷达分析了不同波长下沙尘气溶胶的退偏振比、激光雷达比^[12]。2008年,Xie 等人利用 Raman 激光雷达总结了北京地区轻度污染、重度污染、沙尘暴天气下的气溶胶退偏振比和激光雷达比数值变化^[13]。2011年,Groß 等人利用 SUMUM-2 实验期间同步观测的三台激光雷达结果,分析了三种特殊气溶胶类型(撒哈拉沙尘、海洋性气溶胶、生物质燃烧气溶胶)的退偏振比与激光雷达比^[14]。2012年,Burton 等人利用 HSRL 已有的大量数据反演得到的气溶胶光学参数(如气溶胶激光雷达比、退偏振比、色比等),基于已知的气溶胶类型提出一种气溶胶分类模型建立理论,根据光学参数阈值建立了分类模型,定性进行了八类气溶胶的识别^[15]。2013年,Groß 等人利用机载 HSRL 系统搭载 DLR 的 Falcon 航机分别于 1998 年 LACE、2006 年 SUMUM-1、2008 年 SUMUM-2 和 EUCAARI 实地实验的数据,并结合 CPC、DMA 同步观测的气溶胶

浓度、粒径等微观物理特性进行了六类气溶胶的分类,并提出了混合气溶胶类型的识别方法,该方法能够区分混合气溶胶类型及各成分所占比重^[16]。

文中开展了基于 HSRL 的气溶胶分类方法研究,在第一部分主要介绍了基于碘分子吸收滤波器的 HSRL 系统原理与气溶胶光学参数反演方法;第二部分研究了基于 HSRL 的气溶胶分类方法,建立了基于气溶胶光学参数的气溶胶分类查找表;第三部分中,利用激光雷达实测数据,对气溶胶进行分类识别,介绍了气溶胶分类个例结果,并运用 HYSPLIT 轨迹模式、NAAPS 气溶胶模式进行印证。

1 气溶胶光学参数反演

1.1 HSRL 技术原理

HSRL 利用单频激光作为探测光源,接收到的大气散射光谱由气溶胶 Mie 散射和分子 Rayleigh 散射组成。气溶胶 Mie 散射的光谱宽度可以忽略不计,而分子 Rayleigh 散射的光谱较宽,例如采用 532 nm 单频激光探测时,Mie 散射光谱宽度与发射激光的线宽相当(<100 MHz),而 Rayleigh 散射的半高全宽约为 2.5 GHz。基于这两种散射特性存在的差异,HSRL 能够利用窄带光学滤波器将两者分离,在此基础上可以分别测量分子散射和气溶胶散射,从而直接反演得到气溶胶后向散射系数和消光系数。目前用于 HSRL 的窄带光学滤波器主要有 Fabry-Perot 干涉仪^[17-19]、原子/分子吸收滤波器^[20-24]、Michelson 干涉仪^[25-27]以及 Mach-Zehnder 干涉仪^[28-30]等。尤其是碘分子吸收滤波器对气溶胶散射有强烈的吸收作用,而且对光学校准要求较低,稳定性高,广泛应用于 HSRL 系统。

基于碘分子吸收滤波器的 HSRL 系统利用高光谱分辨率碘分子吸收滤波器(可选择碘分子 1109 吸收线,其峰值波长 532.26 nm)作为窄带光学滤波器,采用种子注入的 Nd:YAG 激光器作为发射光源产生单纵模的脉冲激光,在测量气溶胶光学参数时将激光频率调节到碘分子吸收线的中心,从而实现 HSRL 功能。利用气溶胶 Mie 散射与分子 Rayleigh 散射光谱展宽存在的差异,碘分子吸收滤波器可将气溶胶散射滤除,实现分子与气溶胶光谱的分离,其原理示意如图 1 所示。图 1 中,细实线为碘吸收线即透过率曲线,虚线表示气溶胶与分子散射光谱的叠加,粗实

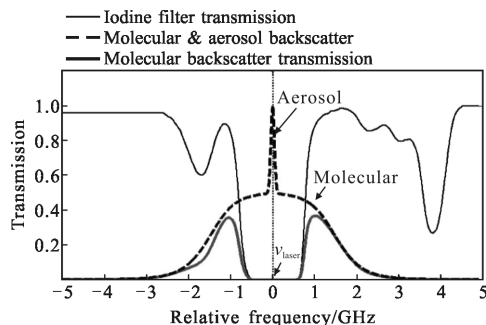


图 1 碘分子吸收滤波器吸收原理示意图(细实线为碘吸收线即透过率曲线;虚线表示气溶胶、分子散射叠加光谱;粗实线表示透过碘分子吸收滤波器的光谱)

Fig.1 Diagram of the iodine vapor filter absorption principle (Measured iodine absorption line is shown as solid thin line. Molecular backscattered signal spectra with aerosol scattering included is shown as dashed line. The filtered transmitted backscattered spectrum is shown as solid thick line)

线表示透过碘分子吸收滤波器后的光谱,气溶胶散射被滤除,而分子散射部分通过。用 f_a 、 f_m 分别表示碘分子吸收滤波器对气溶胶散射和分子散射的透射率,其中 f_m 可以通过计算得到,如公式(1)表示为:

$$f_m(r) = \frac{\int \tau(\nu) \int R(\nu', T, p) l(\nu - \nu') d\nu' d\nu}{\int R(\nu', T, p) l(\nu - \nu') d\nu'} \quad (1)$$

式中: $\tau(\nu)$ 为碘分子吸收线的透过率函数,通过激光扫频测得; $R(\nu', T, p)$ 为由大气温度和压强决定的分子散射光谱,需要通过大气温度、气压数据由 Tenti 的 S6 分子散射模型^[31-32]得出; $l(\nu - \nu')$ 为发射激光的光谱分布。理想情况下,认为气溶胶 Mie 散射吸收彻底,将 f_a 取值为 0。但是在实际中,如果碘分子吸收滤波器吸收达不到理想效果时,即气溶胶 Mie 散射信号没有完全被滤除时,不能忽略 f_a 引起的误差,合理实现对 f_a 的校正对于提高系统反演准确性具有重要的意义,实际观测时可根据系统测量特性,确定合适的 f_a 的值。

利用 HSRL 独立求解气溶胶光学参数的优势,进一步结合粒子偏振特性可实现气溶胶的分类,因此为了同时获得粒子的退偏振特性,HSRL 系统需要设计偏振通道,典型的 HSRL 接收系统构造原理示意如图 2 所示。接收系统设置三个通道,根据偏振

方向的不同经过偏振分光镜分光后分为两路，一路是垂直偏振分量 P_{tot}^{\perp} ，由 PMT1 接收；另一路是平行偏振分量，被分光镜再次分束，一束平行偏振分量 $P_{\text{tot}}^{\parallel}$ 被 PMT2 接收，同时包含气溶胶散射与分子散射；而另一束平行偏振分量 P_m^{\parallel} 经过碘分子吸收滤波器滤除气溶胶散射后，由 PMT3 接收，此通道信号只包含分子散射信号。三个通道的回波信号可由激光雷达方程分别表示，如公式(2)~(4)所示：

$$P_{\text{tot}}^{\perp}(r) = \eta_{\text{tot}}^{\perp} E_0^{\parallel} \frac{c}{2} \frac{A}{r^2} [\beta_m^{\perp}(r) + \beta_a^{\perp}(r)] T^2(r) \quad (2)$$

$$P_{\text{tot}}^{\parallel}(r) = \eta_{\text{tot}}^{\parallel} E_0^{\parallel} \frac{c}{2} \frac{A}{r^2} [\beta_m^{\parallel}(r) + \beta_a^{\parallel}(r)] T^2(r) \quad (3)$$

$$P_m^{\parallel}(r) = \eta_m^{\parallel} E_0^{\parallel} \frac{c}{2} \frac{A}{r^2} [f_m(r) \beta_m^{\parallel}(r) + f_a \beta_a^{\parallel}(r)] T^2(r) \quad (4)$$

式中： η 为光学效率； E_0^{\parallel} 为系统发射能量； c 表示光速； A 为望远镜接收面积； β 为后向散射系数； r 表示探测距离； f_a, f_m 分别为碘分子吸收滤波器对气溶胶散射和分子散射的透射率，下标 a, m, tot 分别代表气溶胶、分子、气溶胶与分子的和；上标 \perp, \parallel 分别表示垂直和平行偏振方向； T^2 为双程大气透过率，可表示为：

$$T^2(r) = T_m^2(r) T_a^2(r) = \exp[-2 \int_0^r (\alpha_m(r') + \alpha_a(r')) dr'] \quad (5)$$

式中： α 为消光系数。

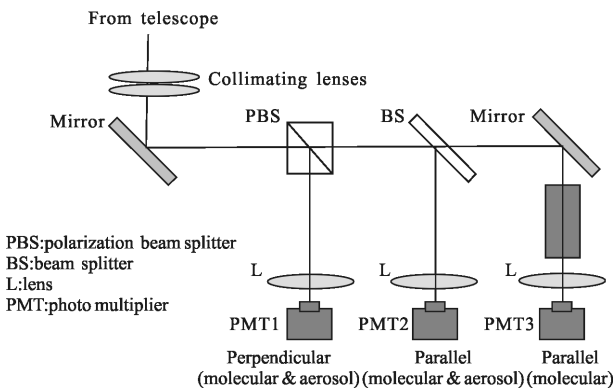


图 2 基于碘分子吸收滤波器的 HSRL 接收系统原理示意图

Fig.2 Schematic of the receiver optics of the HSRL based on iodine vapor filter

分子后向散射系数 β_m 和分子消光系数 α_m 可以根据 Rayleigh 散射理论计算得到^[33]，利用以上各式可以实现气溶胶后向散射系数 $\beta_a(\beta_a^{\parallel} + \beta_a^{\perp})$ 、消光系

数 α_a 、退偏振比 δ_a 的独立求解。

1.2 气溶胶光学参数反演

为了获得垂直和平行偏振方向散射信号的和，令 P^T 为：

$$P^T(r) = P_{\text{tot}}^{\parallel}(r) + \frac{\eta_{\text{tot}}^{\perp}}{\eta_{\text{tot}}} P_{\text{tot}}^{\perp}(r) \quad (6)$$

另外，定义后向散射比 R_b 为：

$$R_b = [1 + \beta_a(r) / \beta_m(r)] \quad (7)$$

公式(3)、(4)、(6)分别可表示成：

$$R_{b,\text{tot}}^{\parallel}(r) = \frac{P_{\text{tot}}^{\parallel}(r)}{C_{\text{tot}}^{\parallel} T_m^2(r) \beta_m^{\parallel}(r)} = T_a^2(r) \left[1 + \frac{\beta_a^{\parallel}(r)}{\beta_m^{\parallel}(r)} \right] \quad (8)$$

$$R_{b,m}^{\parallel}(r) = \frac{P_m^{\parallel}(r)}{C_m^{\parallel} T_m^2(r) \beta_m^{\parallel}(r)} = T_a^2(r) \left[f_m(r) + f_a \frac{\beta_a^{\parallel}(r)}{\beta_m^{\parallel}(r)} \right] \quad (9)$$

$$R_b^T(r) = \frac{P^T(r)}{C^T T_m^2(r) \beta_m(r)} = T_a^2(r) \left[1 + \frac{\beta_a(r)}{\beta_m(r)} \right] \quad (10)$$

其中， $C = \eta E_0(c/2)A$ ，分别包含各系统常数，公式(8)~(10)中各 C 值的确定可通过选取大气清洁高度 r_0 ，认为该处气溶胶含量可忽略不计，即 $\beta_a(r_0) \approx 0$ ，则在参考高度 r_0 处 $R_{b,\text{tot}}^{\parallel}(r_0)$ 、 $R_b^T(r_0)$ 的数值约为 1， $R_{b,m}^{\parallel}(r_0)$ 的数值约为 $f_m(r_0)$ 。

从而，可以推导出气溶胶消光系数 $\alpha_a(r)$ 、退偏振比 $\delta_a(r)$ 、后向散射系数 $\beta_a(r)$ 、激光雷达比 $S_a(r)$ 依次可表示为：

$$\alpha_a(r) = \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{2} \ln \left[\frac{R_m^{\parallel}(r) - f_a R_{\text{tot}}^{\parallel}(r)}{f_m(r) - f_a} \right] \quad (11)$$

$$\delta_a(r) = \frac{\beta_a^{\perp}(r)}{\beta_a^{\parallel}(r)} = \frac{[1 + \delta_m] \delta_v(r) R_b^T(r) / T_a^2(r) - [1 + \delta_v(r)] \delta_m}{[1 + \delta_m] R^T(r) / T_a^2(r) - [1 + \delta_v(r)]} \quad (12)$$

$$\beta_a(r) = \left[\frac{R_{b,\text{tot}}^{\parallel}(r)}{T_a^2(r)} - 1 \right] \beta_m^{\parallel}(r) (1 + \delta_a(r)) \quad (13)$$

$$S_a(r) = \frac{\alpha_a(r)}{\beta_a(r)} \quad (14)$$

公式(12)中的分子退偏振比 $\delta_m(r)$ 和总退偏振比 $\delta_v(r)$ 分别可以通过理论计算和实际测量得到^[24]。

2 气溶胶分类方法

2.1 气溶胶分类基本原理

气溶胶分类是基于不同类型气溶胶的光学参数的差异反映其不同特性，气溶胶激光雷达比 S_a 用以表征粒子的吸收特性，气溶胶退偏振比 δ_a 反映粒子

形状特征,双波长色比值(532 nm/1 064 nm)对应粒子尺寸大小,这些特性是进行气溶胶分类的理论基础。一般地, S_a 随气溶胶颗粒尺寸、形状和成分而不同,对于吸收性强的粒子其值更高; δ_a 与粒子的形状规则程度有关,球形粒子的 δ_a 数值最小,形状越不规则其值越大, δ_a 被公认为是鉴别沙尘气溶胶的重要参数,532 nm 波长的气溶胶退偏振比达到 30%~35% 时几乎表明是纯沙尘^[12,34],较高的退偏振比还可表明是冰晶粒子,例如卷云^[35],而当湿度较高时,粒子由于吸湿膨胀接近球形,会削弱退偏振效应,因此退偏振大小会受相对湿度的影响而变化;另外,色比值对应粒子尺寸的大小,一般色比值越大粒子越小^[36]。根

据这些特征,可以很好地实现气溶胶颗粒物的分类。

2.2 基于 HSRL 的气溶胶分类方法

事实上,要实现气溶胶的分类需要基于大量的实验观测,并在存在特殊类型气溶胶(如撒哈拉沙漠沙尘气溶胶、加拿大森林火灾引起的烟尘气溶胶等)的地域进行实地探测用以标定特殊气溶胶类型,在大量数据分析、定标的基础上并结合地域因素,才能实现气溶胶的合理分类。文中在总结已有工作的基础上,对文献中 S_a 与 δ_a 对不同气溶胶类型的阈值判定范围进行了总结,尝试利用 S_a 与 δ_a , 基于气溶胶的分类阈值标准建立气溶胶分类查找表,如表 1 所示,用来对实验期间特殊天气条件下的气溶胶进行

表 1 气溶胶分类标准查找表

Tab.1 Aerosol classification look-up table

Aerosol type	S_a /sr	δ_a	Source
Pure dust	42-55		Liu et al.(2002) ^[11]
	50	-35%	Sugimoto and Lee(2006) ^[12]
	40-58	-33%	Burton et al.(2012) ^[15]
	43-53	29%-33%	Groß et al.(2013) ^[16]
	42-58	29%-35%	Summary
Mixed dust	28-48	17%-23%	Xie et al.(2008) ^[13]
		19%-28%	Groß et al.(2011) ^[14]
	30-50	20%-35%	Burton et al.(2012) ^[15]
	46-54	25%-29%	Groß et al.(2013) ^[16]
	28-54	17%-35%	Summary
Smoke	30-60	2%-5%	Burton et al.(2012) ^[15]
	52-86	5%-9%	Groß et al.(2013) ^[16]
	30-86	2%-9%	Summary
Polluted urban	47-75	5%-9%	Xie et al.(2008, moderate pollution) ^[13]
	36-52	5%-9%	Xie et al.(2008, heavy pollution) ^[13]
	50-70	<10%	Burton et al.(2012) ^[15]
	50-62	5%-7%	Groß et al.(2013) ^[16]
	36-75	5%-10%	Summary
Marine aerosol	16-20	1%-3%	Groß et al.(2011) ^[14]
	15-25	<10%	Burton et al.(2012) ^[15]
	13-23	2%-4%	Groß et al.(2013) ^[16]
	13-25	1%-10%	Summary
Ice particle		50%-70%	Mishchenko and Sassen(1998) ^[35]
		30%-45%	Sassen and Hsueh(1998) ^[37]
	<30		Sakai et al.(2003) ^[38]
	-20	50%-60%	Burton et al.(2012) ^[15]
	20-30	30%-70%	Summary
Water particle		<3%	Sassen(1974) ^[39]

粗略分类。

基于对 S_a 与 δ_a 进行气溶胶分类的总结,可实现不同气溶胶的分类查找,如图 3 中不同线形的框内

数值范围代表可能出现的不同气溶胶类型。对于分类区域出现重叠的情况,可利用其他气溶胶光学参数,如色比、Ångström 指数等进行进一步的区分^[15]。

当不同类型气溶胶混合存在时,其光学参数的分布可能落在图 3 中的空白区域内。利用 S_a 与 δ_a 结果,可按照建立的分类模型对气溶胶进行分类;另外文中结合后向散射比 R_b , 从 R_b 的数值大小定性地反映气溶胶浓度及厚度范围来区别气溶胶或云层的存在。

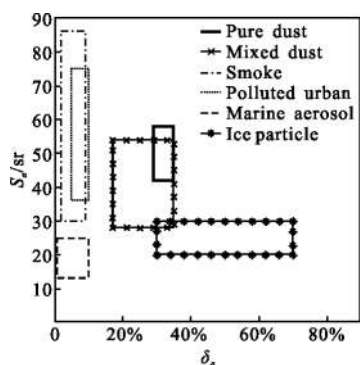


图 3 基于 S_a 与 δ_a 的气溶胶分类模型图示

Fig.3 Aerosol classification model by the S_a and δ_a

3 气溶胶分类结果及个例分析

3.1 气溶胶光学参数观测

文中涉及的 HSRL 系统是实验室已经建立的基于碘分子吸收滤波器的 HSRL 系统, 主要基于 Doppler 原理进行大气风场测量^[40-41], 在测量气溶胶光学参数时, 对种子激光器施加扫描电压调节内部工作温度, 扫描 1109 碘吸收线, 将激光频率调节到碘分子吸收线的中心, 从而实现高光谱分辨率激光雷达探测气溶胶光学性质的功能^[42-44], 系统外观及内部布局如图 4 所示。望远镜子系统接收的大气后向散射信号进入光学鉴频子系统, 由分束镜进行分

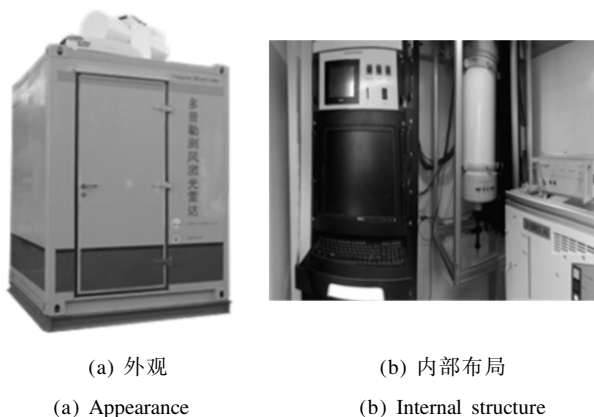


图 4 HSRL 系统图

Fig.4 Picture of HSRL

光,接收的回波信号被分成两个通道,参考通道直接进行能量探测,同时包含大气中分子和气溶胶的后向散射信号;测量通道安装碘分子吸收滤波器,气溶胶散射信号被滤除,只测量大气中的分子后向散射信号。通过利用两个通道的信号反演得到气溶胶消光系数 α_a 、后向散射系数 β_a , 可获得气溶胶激光雷达比 S_a 。

水汽-云-气溶胶激光雷达系统 (Water vapor-Cloud-Aerosol Lidar, WACAL) 是一部可用于大气水汽和云及相关大气参数探测与研究的激光雷达系统^[45], 可对对流层的水汽(0.2~5 km 高度内)和云、气溶胶(0.2~15 km 高度内)的垂直廓线进行连续探测, 其系统外观及内部布局如图 5 所示。由于上述 HSRL 系统主要用于大气风场测量,并没有设置偏振通道,所以文中结合具有偏振激光雷达功能的 WACAL 系统进行同步观测,利用其偏振数据(532 nm)获得气溶胶退偏振比 δ_a 结果^[46]。

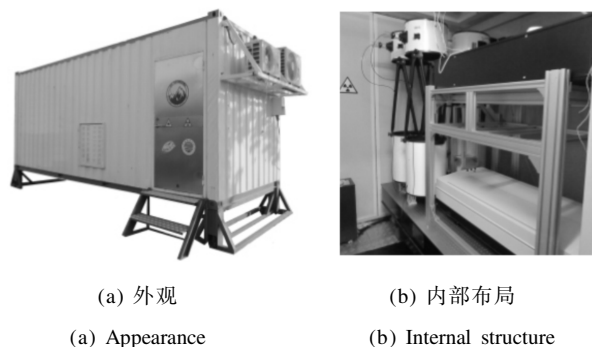


图 5 WACAL 系统图

Fig.5 Picture of WACAL

在 2015 年春季激光雷达联合观测青岛大气实验中,4月8日至5月15日期间利用 HSRL 系统与 WACAL 系统在中国海洋大学崂山校区(36°17'N, 120°50'E)开展了同步观测实验, 为了避免白天较强的太阳背景光影响,实验开机时间主要选在晚间进行,图 6 为两系统进行同步观测的场景。

由于上述 HSRL 系统设计采用收发一体光学系统, 在最大限度提高光学性能上也引入了出射光散射的干扰,为了减少对 PMT 造成光电性能的快速老化甚至直接损坏, 在接收光纤及鉴频系统之间增加斩波器, 约 500 m 远处信号开始进行接收探测。另外, 由斩波器控制光路打开的过程会产生回波信号随高度先逐渐增大后再衰减, 由于气溶胶消光系数

α_0 的求解如公式(11)涉及求导过程,必然导致负数值的出现,因此气溶胶参数反演结果的有效高度一般从 900 m 附近开始,为了匹配两个激光雷达系统的观测范围,在下文数据处理中数据结果均选择 900 m 作为起始高度。文中选取实验期间具有代表性的 2015 年 4 月 9 日 19:52~20:40 与 5 月 5 日 20:02~20:51 期间的数据结果,在下文中进行了重点分析。



图 6 HSRL(左)与 WACAL(右)同步观测场景

Fig.6 Picture of observation experiment by HSRL (left) and WACAL (right)

3.2 HYSPLIT 轨迹模式与 NAAPS 气溶胶模式

HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) 即混合单粒子拉格朗日综合轨迹模型,是由美国国家海洋和大气管理局空气资源实验室 (NOAA/ARL) 联合澳大利亚气象局 (ABM),在过去 20 年间共同研发的一种用于气团传输轨迹追踪,计算分析大气污染物输送、扩散和沉降过程轨迹的专业模型。文中使用的是网页版 HYSPLIT^[47],选取 GDAS 全球数据作为模式的输入场,其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,每 6 h 定位一个地点。文中根据激光雷达观测结果,选取拟模拟气团的时间和高度,以此来获得气团的后向或前向轨迹追踪,用来分析大气输送情况,为气溶胶类型的判断提供参考依据。

NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System)即美国海军气溶胶分析与气象预测系统^[48],利用美国海军全球大气预测系统的全球气象场,可实现模拟分析和预测气溶胶(硫酸盐气溶胶、沙尘气溶胶、烟尘气溶胶三类)在全球的浓度分布,模拟时间间隔为 6 h。在下文对沙尘气溶胶的研究中,将利用该 NAAPS 气溶胶模式对沙尘气溶胶浓度分布进行追踪分析。

3.3 海洋性气溶胶观测个例

青岛位于山东半岛南部沿海,地处北温带季风气候区,具有温带季风气候,由于受到来自海洋的东南季风影响,又具有典型的海洋性气候特点,低空区域受来自海面气团的影响常有海洋性气溶胶的存在。以 2015 年 4 月 9 日晚间的结果为例,该天低空出现明显的海洋性气溶胶层,并伴随 3 km 高度云层的出现。

图 7 为 2015 年 4 月 9 日 19:52~20:40 期间的 HSRL 系统的距离平方校正后的大气回波信号 THI 分布,图 8 为同一时段内 WACAL 系统的气溶胶退偏振比 δ_a 反演结果 THI 分布,从图 7 及图 8 中可以清楚看出,在 2 km 附近出现了明显的大气分层,低空气溶胶层均匀分布,实验开始时 3 km 附近存在明显的云层,之后逐渐消失。为了方便分析不同时刻对应的大气状况,取实验期间特征明显的几个时刻

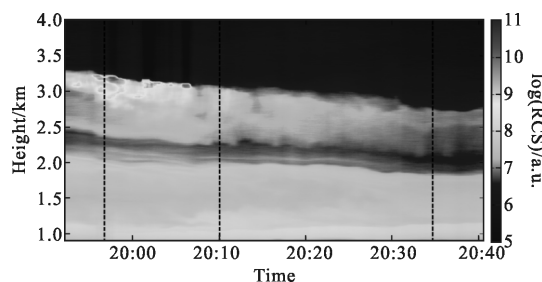


图 7 HSRL 系统距离平方校正信号强度分布,2015 年 4 月 9 日 19:52~20:40

Fig.7 Intensity distribution of range-square corrected backscattering signal by HSRL during 19:52~20:40 on 9 April 2015

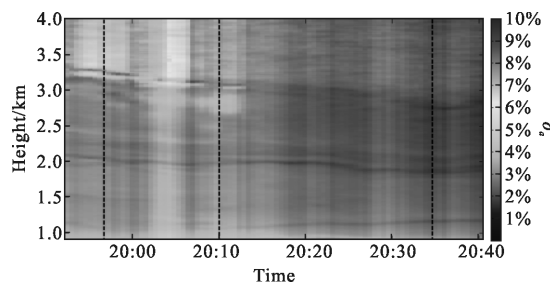


图 8 WACAL 气溶胶退偏振比分布,2015 年 4 月 9 日 19:52~20:40

Fig.8 Aerosol depolarization ratio distribution by WACAL during 19:52~20:40 on 9 April 2015

19:55、20:10、20:35(如图 7、图 8 黑色虚线对应时刻),分别利用累积 5 min 的脉冲信号反演气溶胶光学性质参数廓线分时结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,

在低空 2 km 以下气溶胶层 S_a 数值集中分布在 10~25 sr, 且 δ_a 数值在 5% 以下, 符合海洋性气溶胶的特点; 另外, 3 km 高度在实验开始阶段 R_b 达到了 15, 判断有云层出现, δ_a 较低空有所增大, 仍在 5% 左右,

可以推测其为水云, 且随着云的消失伴随了水汽气溶胶浓度变弱的过程, 这在 R_b 、 δ_a 廓线均有很好的体现。

为了印证 HRSL 系统测量结果的合理性, 结合 HYSPLIT 模式对实验地点上空 1 000、1 500、3 000 m

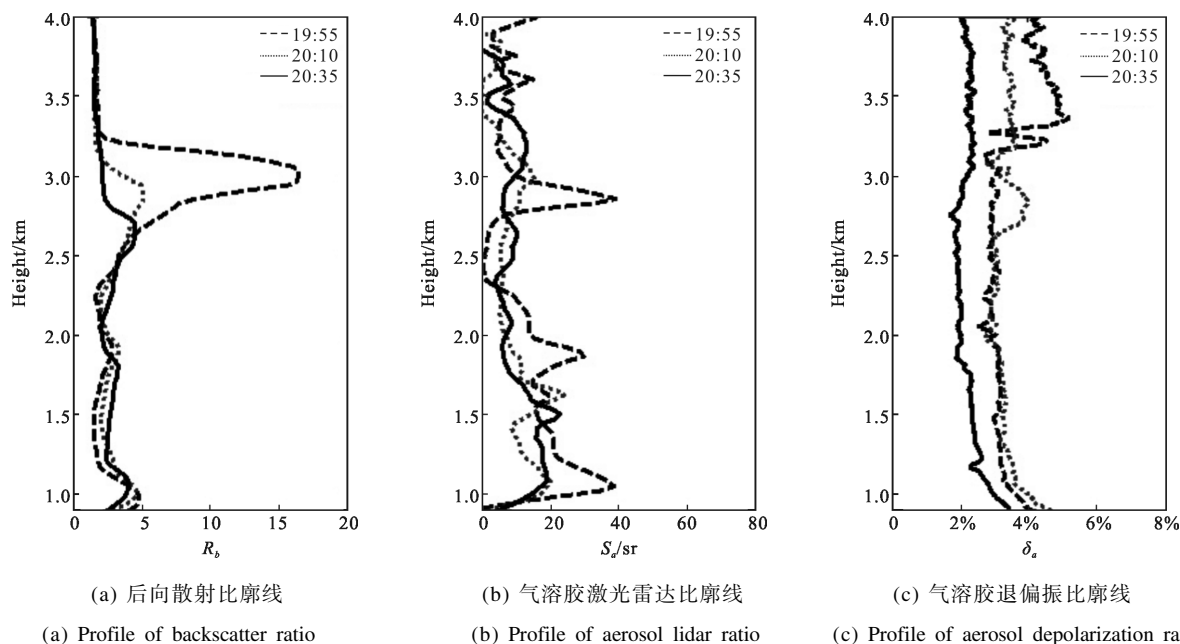


图 9 气溶胶光学参数分时廓线结果(分别累积 5 min 的脉冲信号反演结果), 2015 年 4 月 9 日 19:55~20:10~20:35

(图 7、图 8 中黑色虚线对应的时刻)

Fig.9 Profiles of aerosol optical parameters retrieved from five minutes' pulse accumulation signal at 19:55, 20:10 and 20:35 on 9 April 2015(as the moments shown by the black dashed lines in Fig.7 and Fig.8)

高度大气层的 30 h 气流后向轨迹进行追踪, 结果如图 10 所示, 从图中可以看出, 低空气流来自海洋区

域, 1 000 m 高度气团由黄海近海海域沿黄海近岸顺时针发展并进入陆地, 并再次经过胶州湾海域到达观测地点上空; 1 500 m 高度气团由黄海近岸海域进入陆地, 并顺时针发展再次经过胶州湾海域到达观测地点上空, 其中, 1 500 m 高度气团在到达观测地点 12 h 前几乎与 1 000 m 高度气团重合, 之后出现高度的抬升到达 1 500 m。根据以上分析, 与当天激光雷达观测结果判断低空气溶胶以海洋性气溶胶为主吻合。而 3 km 高度气团来自内陆地区, 且高度有下降, 到达青岛地区成为水云是合理的。

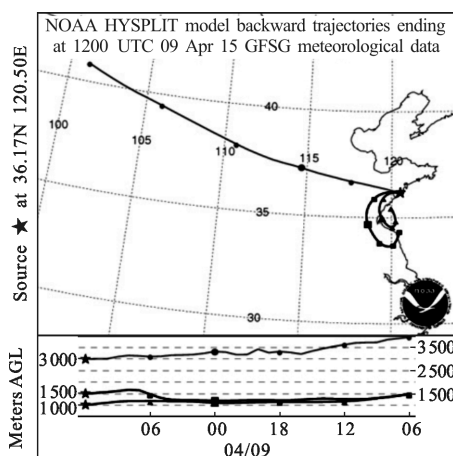


图 10 HYSPLIT 模拟的观测地点上空后向追踪轨迹(2015 年 4 月 9 日 20:00 追溯至 2015 年 4 月 8 日 14:00)

Fig.10 Backward trajectories calculated by the HYSPLIT model ending at the observation experiment site from 20:00 on 9 April back to 14:00 on 8 April 2015

3.4 混合型沙尘气溶胶观测个例

国内北方地区和西北地区植被比较稀少, 沙质土壤较多, 大风频繁, 春末夏初很容易出现沙尘暴天气。2015 年 5 月 5 日晚 20:02~20:51 实验观测期间, 激光雷达观测到了青岛地区高空沙尘层的存在。

图 11 为 2015 年 5 月 5 日 20:02~20:51 期间 HSRL 系统的距离平方校正后的大气回波信号分布, 图 12 为同一时段内 WACAL 系统的气溶胶退偏

振比 δ_a 反演结果分布,从图 11 及图 12 可分别看到,在 4 km 附近、4.5~5 km、6.5~7 km 均出现了厚约 500 m 的层结构,同时 5.5 km 高度有一厚度约 100 m 的薄层。该天信号强度在时间上稳定并没有大的波动,对实验期间的信号平均后反演得到气溶胶光学性质参数廓线如图 13 所示,可以看出对应以上四个高度处 R_b 数值小于 5,可推测是气溶胶层的存在、排除云的可能, S_a 基本在 20~40 sr 之间(6.5 km 处达到 60 sr 可能是由于信号波动大导致的偏大值), δ_a 达到 16% 且大于 10%,基本符合混合型沙尘气溶胶类型。

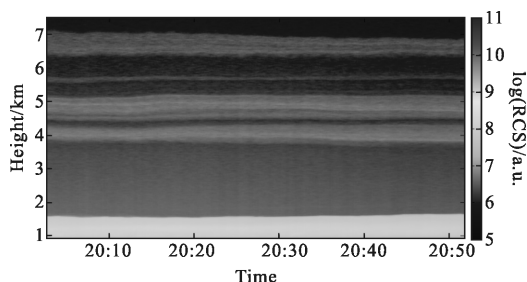


图 11 HSRL 系统距离平方校正信号强度分布,2015 年 5 月 5 日 20:02~20:51

Fig.11 Intensity distribution rang-square corrected backscatter signal by HSRL during 20:02~20:51 on 5 May 2015

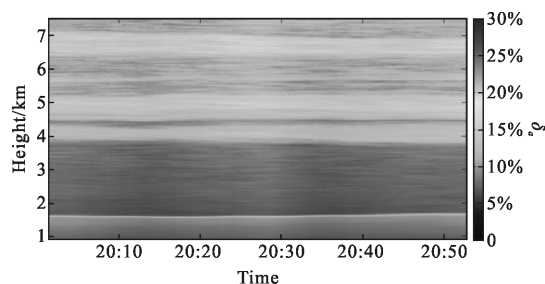
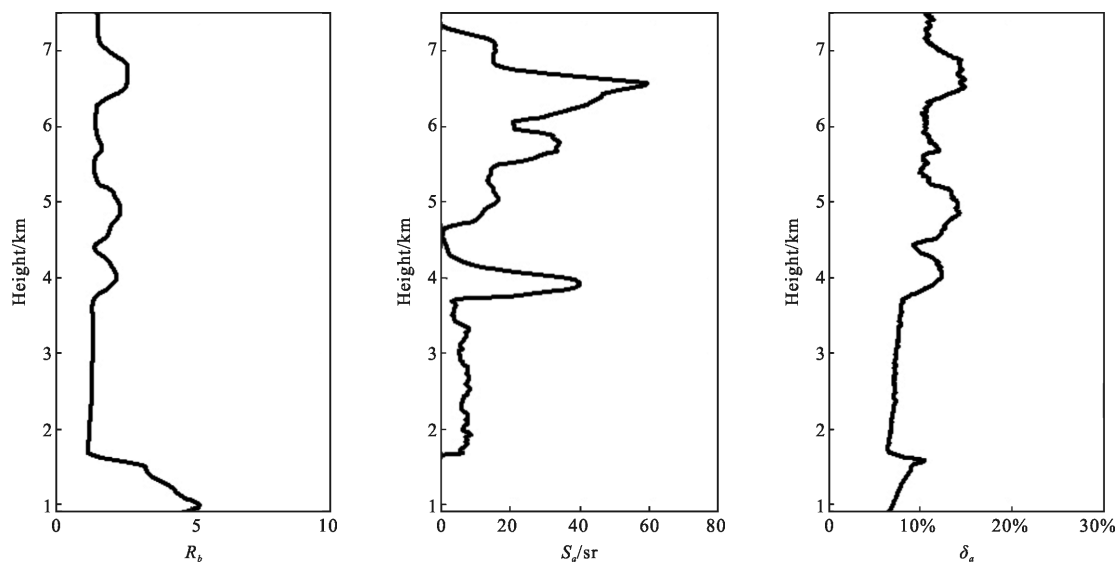


图 12 WACAL 气溶胶退偏振比分布,2015 年 5 月 5 日 20:02~20:51

Fig.12 Aerosol depolarization ratio by WACAL during 20:02~20:51 on 5 May 2015

为了印证结果的可靠性,结合 HYSPLIT 模式进行后向轨迹追踪,并对沙尘源区进行前向轨迹追踪,如图 14 所示;同时利用 NAAPS 模式获得沙尘气溶胶浓度分布如图 15 所示。从图 14(a)对应的 30 h 后向轨迹追踪可看出,观测地点上空 4 000、5 000 m 气层来自内蒙古中西部,而 6 500 m 高度来自西北内陆,并有强烈的上升趋势(从 2 500 m 升至 6 500 m),这会形成上升气流导致底层沙尘的抬升。进一步结合图 15 的沙尘气溶胶浓度分布,可以看到本次沙尘



(a) 后向散射比廓线 (b) 气溶胶激光雷达比廓线 (c) 气溶胶退偏振比廓线
(a) Profile of backscatter ratio (b) Profile of aerosol lidar ratio (c) Profile of aerosol depolarization ratio

图 13 不同时刻的气溶胶光学参数廓线结果(实验期间平均反演结果),2015 年 5 月 5 日 20:02~20:51

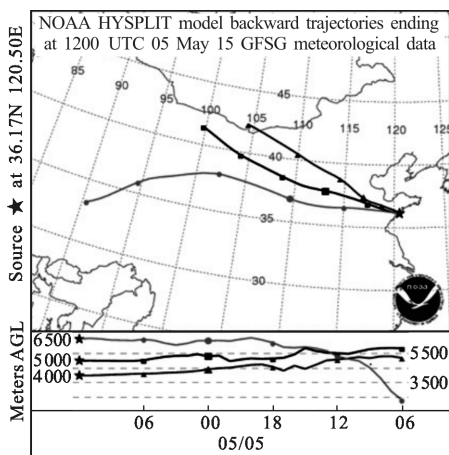
Fig.13 Profiles of aerosol optical parameters retrieved from pulse accumulation during 20:02~20:51 on 5 May 2015

源来自蒙古国南部及国内内蒙古中西部,影响到国内北方多省。而从源区的前向轨迹追踪图 14(b)可以

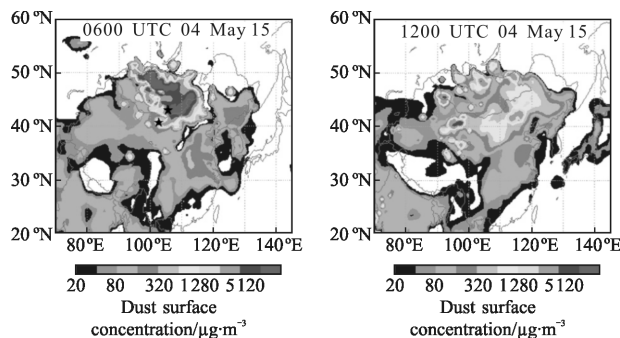
发现本次沙尘源一路输送至国内东北继续向东传播,另一路向东南方向输送影响到国内西北、华北、

华东地区,且传输过程都有气层抬升。以上分析与激光雷达的观测结果吻合。

分类研究。但结合该天低空1 000、1 500、2 000 m 高度大气层的 30 h 气流后向轨迹追踪如图 16 所示,可以看出,低空高度气团主要来自观测地点上空西南方向的华中、华东区域,不同于高空沙尘层来自西北内陆的情况。

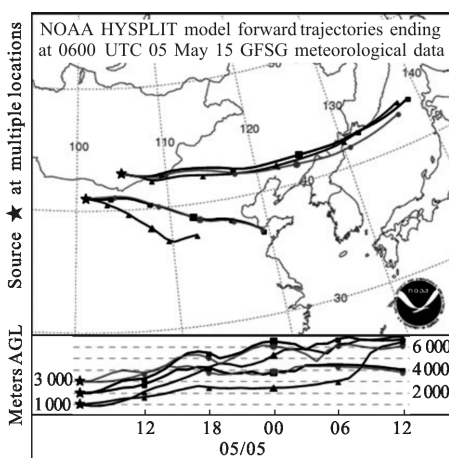


(a) 观测地点上空的 backward trajectories ending at the observation experiment site from 20:00 on 5 May back to 14:00 on 4 May 2015



(a) 2015 年 5 月 4 日 14:00 (b) 2015 年 5 月 5 日 20:00
(a) At 14:00 on 4 May 2015 (b) At 20:00 on 5 May 2015

图 15 NAAPS 气溶胶模式模拟的沙尘气溶胶浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)分布
Fig.15 Spatial distribution of dust concentration (Unit: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$) simulated by the NAAPS model



(b) 沙尘源区的前向追踪轨迹(2015 年 5 月 4 日 14:00 至 2015 年 5 月 5 日 20:00)

(b) Forward trajectories starting from sandstorm areas from 14:00 on 4 May 2015 to 20:00 on 5 May 2015

图 14 HYSPLIT 模拟的追踪轨迹

Fig.14 Trajectories calculated by the HYSPLIT model

另外,从图 11 及图 12 可以分别看到在低空区域气溶胶浓度较大,1.6km 高度之后明显降低,在图 13 中的 R_b 、 δ_a 廓线也有很好的体现,并且可看出气溶胶浓度的衰减剧烈,这导致气溶胶消光系数 α_a 的反演出现无效值, S_a 亦无效,无法对该天低空气溶胶进行

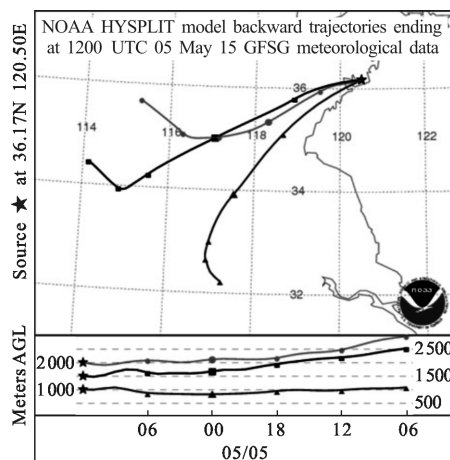


图 16 HYSPLIT 模拟的观测地点上空后向追踪轨迹 (2015 年 5 月 5 日 20:00 追溯至 2015 年 5 月 4 日 14:00)

Fig.16 Backward trajectories calculated by the HYSPLIT model ending at the observation experiment site from 20:00 on 5 May back to 14:00 on 4 May 2015

综上所述,此次观测期间的高空沙尘气溶胶层主要受来自内陆沙尘源的影响,经过远距离传输及气层的抬升,到达青岛地区沙尘强度已经变弱且上升至高空区域,激光雷达的观测结果与沙尘气溶胶的判定是可靠的。

4 结束语

文中主要开展了基于高光谱分辨率激光雷达的气溶胶分类方法的研究,通过分析不同类型气溶胶的激光雷达比和退偏振比的分布特征,建立了气溶胶分类模型。利用2015年春季激光雷达实测的后向散射比、气溶胶激光雷达比和气溶胶退偏振比,参照气溶胶分类查找表,实现了对气溶胶的分类识别,并利用HYSPLIT轨迹模式、NAAPS气溶胶模式进行了印证,通过对观测期间的海洋性气溶胶、沙尘气溶胶的正确识别验证了该方法的适用性,在气溶胶分类方法方面取得了阶段性的成果。精细探测气溶胶光学性质,实现气溶胶的分类对大气污染监测具有重要意义,准确的气溶胶分类还可用于提高卫星数据反演算法的精度,例如CALIPSO在反演气溶胶消光系数时需要预先假设激光雷达比的数值^[49],以及为未来卫星激光雷达全球观测计划如ADM-Aeolus的ALADIN^[6]、Earth-CARE的ATLID^[50]等提供气溶胶数据产品的校验。

为了实现准确的气溶胶分类识别,需要积累大量的激光雷达遥感观测数据,以及不同类型气溶胶的现场测量数据,根据印证分析和区域环境特点建立合理的分类模型。在未来的工作中,将继续改进气溶胶光学参数的反演方法,提高测量结果的准确性,并通过观测数据的积累,逐步形成区域性的气溶胶分类统计及其对区域环境影响的分析。

参考文献:

- [1] Pöschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2005, 44(46): 7520–7540.
- [2] Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Tie X, Cao J. Aerosol pollution in China: Present and future impact on environment[J]. *Particuology*, 2009, 7(6): 426–431.
- [4] R Raymond M. Measures. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications[M]. Florida: Wiley, 1992.
- [5] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310–2323.
- [6] Ansmann A, Wandinger U, Le Rille O, et al. Particle backscatter and extinction profiling with the spaceborne high-spectral-resolution Doppler lidar ALADIN: methodology and simulations[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(26): 6606–6622.
- [7] Sy O O, Tanelli S, Takahashi N, et al. Simulation of Earth CARE spaceborne Doppler radar products using ground-based and airborne data: effects of aliasing and nonuniform beam-filling [J]. *Geoscience and Remote Sensing IEEE Transactions on*, 2014, 52(2): 1463–1479.
- [8] Mace G G, Starr D O, Marchand R, et al. Contemplating synergistic algorithms for the NASA ACE mission[C]//SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8890: 88900I.
- [9] Liu Dong, Yang Yongying, Zhou Yudi, et al. High spectral resolution lidar for atmosphere remote sensing: a review [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2535–2546. (in Chinese)
刘东, 杨甬英, 周雨迪, 等. 大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2535–2546.
- [10] Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 21–27. (in Chinese)
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(S): 21–27.
- [11] Liu Z, Sugimoto N, Murayama T. Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 2002, 41 (15): 2760–2767.
- [12] Sugimoto N, Lee C H. Characteristics of dust aerosols inferred from lidar depolarization measurements at two wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(28): 7468–7474.
- [13] Xie C, Nishizawa T, Sugimoto N, et al. Characteristics of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing, China [J]. *Applied Optics*, 2008, 47 (27): 4945–4951.
- [14] Groß S, Tesche M, Freudenthaler V, et al. Characterization of Saharan dust, marine aerosols and mixtures of biomass-burning aerosols and dust by means of multi-wavelength depolarization and Raman lidar measurements during SAMUM 2[J]. *Tellus B*, 2011, 63(4): 706–724.
- [15] 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.

- [16] Groß S, Esselborn M, Weinzierl B, et al. Aerosol classification by airborne high spectral resolution lidar observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(5): 2487–2505.
- [17] Shipley S T, Tracy D H, Eloranta E W, et al. High resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: Theory and instrumentation [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(23): 3716–3724.
- [18] Hua D, Uchida M, Kobayashi T. Ultraviolet high-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar with a dual-pass Fabry-Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1063–1065.
- [19] Imaki M, Kobayashi T. Ultraviolet high-spectral-resolution Doppler lidar for measuring wind field and aerosol optical properties[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(28): 6023–6030.
- [20] She C Y, Alvarez II R J, Caldwell L M, et al. High-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar measurements of aerosol and atmospheric profiles [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(7): 541–543.
- [21] Piironen P, Eloranta E W. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(3): 234–236.
- [22] Hair J W. A high spectral resolution lidar at 532 nm for simultaneous measurement of atmospheric state and aerosol profiles using iodine vapor filters [D]. Colorado: Colorado State University, 1998.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Schwiesow R L, Lading L. Temperature profiling by Rayleigh-scattering lidar [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(11): 1972–1979.
- [26] Shepherd G G. Application of Doppler Michelson imaging to upper atmospheric wind measurement: WINDII and beyond [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(16): 2764–2773.
- [27] Liu D, Hostetler C, Miller I, et al. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar [J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1406–1420.
- [28] Liu Z, Kobayashi T. Differential discrimination technique for incoherent Doppler lidar to measure atmospheric wind and backscatter ratio[J]. *Optical Review*, 1996, 3(1): 47–52.
- [29] Bruneau D, Pelon J. Simultaneous measurements of particle backscattering and extinction coefficients and wind velocity by lidar with a Mach-Zehnder interferometer: principle of operation and performance assessment [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(6): 1101–1114.
- [30] Bruneau D, Pelon J, Blouzon F, et al. 355-nm high spectral resolution airborne lidar LNG: system description and first results[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8776–8785.
- [31] Tenti G, Boley C D, Desai R C. On the kinetic model description of Rayleigh-Brillouin scattering from molecular gases[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1974, 52(4): 285–290.
- [32] Liu B Y, Esselborn M, Wirth M, et al. Influence of molecular scattering models on aerosol optical properties measured by high spectral resolution lidar[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(27): 5143–5154.
- [33] Miles R B, Lempert W R, Forkey J N. Laser rayleigh scattering [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(5): R33.
- [34] Freudenthaler V, Esselborn M, Wiegner M, et al. Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006 [J]. *Tellus*, 2009, 61(1): 165–179.
- [35] Mishchenko M I, Sassen K. Depolarization of lidar returns by small ice crystals: An application to contrails [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(3): 309–312.
- [36] Sugimoto N, Matsui I, Shimizu A, et al. Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the northwest Pacific with a two - wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19). Doi: 10.1029/2002GL015112.
- [37] Sassen K, Hsueh C. Contrail properties derived from high-resolution polarization lidar studies during SUCCESS [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(8): 1165–1168.
- [38] Sakai T, Nagai T, Nakazato M, et al. Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(36): 7103–7116.
- [39] Sassen K. Depolarization of laser light backscattered by artificial clouds [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1974, 13(8): 923–933.
- [40] Liu Z S, Liu B Y, Li Z G, et al. Wind measurements with incoherent Doppler lidar based on iodine filters at night and day[J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(2): 327–335.

- [41] Liu Z S, Liu B Y, Wu S H, et al. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1485–1487.
- [42] Li Z G, Liu Z S, Yan Z A, et al. Research on characters of the marine atmospheric boundary layer structure and aerosol profiles by high spectral resolution lidar [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(8): 086001–086001–6.
- [43] Song Xiaoquan, Guo Jinjia, Yan Zhao'ai, et al. Atmospheric aerosol optical parameters detection research with High Spectral Resolution Lidar [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(9): 1009–1015. (in Chinese)
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.
- [44] Liu Z S, Bi D C, Song X, et al. Iodine-filter-based high spectral resolution lidar for atmospheric temperature measurements[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(18): 2712–2714.
- [45] Wu S, Song X, Liu B, et al. Mobile multi-wavelength polarization Raman lidar for water vapor, cloud and aerosol measurement[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33870–33892.
- [46] Zhang Wei. Design and calibration of polarization channel in Water vapor-Cloud-Aerosol Lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
张薇. 水汽-云-气溶胶激光雷达偏振通道的设计与校正研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [47] Draxler R R, Rolph G D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model, obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration's Air Resources Laboratory [EB/OL]. [2016-03-10]. http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php.
- [48] Christensen J H. NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System) model, obtained from The Naval Research Laboratory [EB/OL]. [2016-03-10]. http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol_web/.
- [49] 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.
- [50] Illingworth A J, Barker H W, Beljaars A, et al. The EarthCARE satellite: the next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(8): 1311–1332.