

合肥西郊 2014 年近地面气溶胶后向散射系数廓线统计分布

麻晓敏¹ 张 辉¹ 单会会¹ 赵素贵¹ 江海燕² 陶宗明^{1,3*} 刘 东³ 谢晨波³ 王英俭^{3,4}

¹解放军陆军军官学院基础部, 安徽 合肥 230031

²合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009

³中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

⁴中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230031

摘要 为了给环保部门防控大气污染提供科学依据, 联合侧向和后向散射激光雷达系统对近地面气溶胶后向散射系数廓线进行高分辨率探测。分析发现, 近地面气溶胶后向散射系数廓线随高度变化不尽相同, 大致分为 4 种情况: 多层结构、随高度升高而增加、随高度升高而减小以及不随高度变化。分析了连续两个夜晚的气溶胶后向散射系数廓线随时空的变化情况, 并对 2014 年 3 月至 2015 年 2 月合肥西郊 82 个夜晚数据进行了统计分析, 得出近地面气溶胶后向散射系数廓线按季节的分布规律。

关键词 大气光学; 后向散射系数; 侧向散射激光雷达; 大气气溶胶

中图分类号 P407.5; TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0705001

Statistical Distribution of Aerosol Backscattering Coefficient Profiles in Near-Ground at West Suburb of Hefei in 2014

Ma Xiaomin¹ Zhang Hui¹ Shan Huihui¹ Zhao Sugui¹ Jiang Haiyan²
Tao Zongming^{1,3} Liu Dong³ Xie Chenbo³ Wang Yingjian^{3,4}

¹Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

²School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

³Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

⁴School of Environmental Science and Photoelectric Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In order to provide scientific basis for preventing and controlling atmospheric pollution to environmental departments, the profile of aerosol backscattering coefficient is detected with high resolution by using the side scatter and backscatter lidar system. From the cases study, the profiles of near-ground aerosol backscattering coefficient with altitude are different, which can be classified into four categories, multilayer structure, increasing versus altitude, decreasing versus altitude and invariant versus altitude. Two continuous nights profiles of aerosol backscattering coefficient with altitude and time are analyzed. The average profiles of seasonal near ground aerosol backscattering coefficient at the western suburb of Hefei are calculated by averaging 82 nights data measured from March 2014 to February 2015 by season.

Key words atmospheric optics; backscattering coefficient; sidescatter lidar; atmospheric aerosol

收稿日期: 2016-02-03; **收到修改稿日期:** 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(41175021, 41475025)

作者简介: 麻晓敏(1980—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。

E-mail: maxiaomin308515@163.com

* 通信联系人。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

1 引 言

中国社会科学院、中国气象局联合发布的《气候变化绿皮书：应对气候变化报告(2013)》指出，近 50 年来中国灰霾天气总体呈增加趋势，且持续性霾过程增加显著。灰霾的本质是细粒子气溶胶污染，属于大气气溶胶的范畴，科学界的气溶胶定义为气体介质中加入固态或液态粒子而形成的分散体系称为气溶胶。目前关于灰霾定义与判别标准还存在争议，主要是对气溶胶粒子的吸湿增长、混合状态和核化特性知之甚少。吴兑等^[1]给出了日常观测和预报时具体识别灰霾的概念模型，排除降水、沙尘暴、扬尘、浮尘、烟幕、吹雪和雪暴等天气现象造成的视程障碍，相对湿度在 95%~100%之间且能见度小于 1 km 为雾，能见度在 1~10 km 为轻雾；相对湿度在 80%~95%且能见度小于 10 km 为湿霾；相对湿度在 50%~80%之间且能见度小于 10 km 为干霾。灰霾中携带了大量的有毒、有害化学成分，对人体健康造成极大的危害。此外，灰霾导致能见度下降，故而影响正常的生产和交通运输^[2-3]。

大气中的气溶胶主要分布在边界层以内，统计表明，气溶胶的浓度随高度的升高而降低，但具体情况比较复杂，探测气溶胶随高度的分布规律可以更精确地估算气溶胶的辐射强度，可以研究污染物的扩散规律。现有的探测气溶胶的遥感手段有被动卫星观测(如 Terra)^[4]、星载激光雷达(如 CALIPSO)^[5]、机载激光雷达^[6]和地基激光雷达等。其中，被动卫星数据给出整层气溶胶的光学厚度，其不但与消光系数的垂直分布有关，还与边界层高度有关，边界层高度受气象、地形等因素的变化而波动较大，所以由整层气溶胶的光学厚度反演气溶胶消光系数的垂直分布本身存在误差。同时，同一点的卫星数据具有周期性，不能做到时间上的连续探测来分析气溶胶消光系数随时间的变化规律；星载激光雷达探测目标较远，所以其信噪比相对地基激光雷达较低；机载激光雷达机动性好，能够对危险区域的气溶胶进行高精度、高分辨率探测，但价格昂贵，且作业速度快，无法得到同一地点气溶胶的时间演化图；地基激光雷达在探测气溶胶光学参数垂直分布方面不受边界层高度的影响，具有独特的优势，已被广泛应用^[7-9]。但由于几何因子的存在，近距离段信号不能被普通的后向散射激光雷达完全探测^[10-11]，而近地面段正是气溶胶的富集区，也是环保部门重点关注的区域。

因此，本文搭建了基于 CCD 无探测盲区的侧向散射激光雷达系统，其优点是近距离段空间分辨率和探测精度都很高，但远距离段空间分辨率较低。借助后向散射激光雷达获得参考点的后向散射系数，然后利用侧向散射激光雷达系统，探测近地面气溶胶的后向散射系数廓线，得到 2014 年合肥市四季气溶胶后向散射系数廓线的时空分布规律。

2 探测系统与反演方法

2.1 探测系统

图 1 为搭建的侧向散射激光雷达系统和已成熟的后向散射激光雷达系统。系统硬件参数详见文献^[12]，其主要原理为：激光器向大气中垂直发射一束激光，由于激光与大气的相互作用，侧向散射光和后向

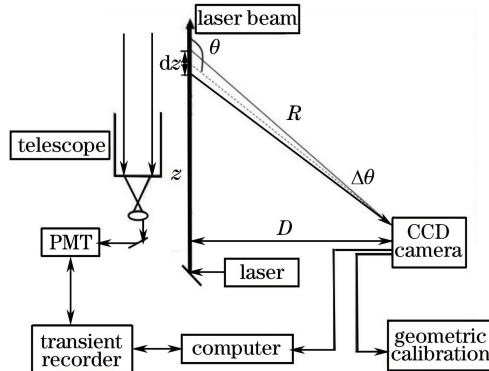


图 1 系统硬件示意图

Fig. 1 Diagram of the detection system

散射光中都包含了同一束激光中气溶胶的散射信息,后向散射激光雷达中的望远镜和光电倍增管(PMT)接收激光束上不同高度的后向散射信号,侧向散射激光雷达的 CCD 相机中的各像元接收光束上各处的侧向散射信号。联合后向和侧向散射激光雷达方程,可以获得从地面开始的气溶胶后向散射系数廓线。

2.2 反演方法

后向散射激光雷达系统可利用 1984 年 Fernald^[13] 提出的递推方法反演气溶胶后向散射系数。方程中涉及气溶胶后向散射系数和消光系数 2 个变量以及激光雷达常数等。设气溶胶的消光-后向散射系数比为常数,即可消除一个变量,再选择对流层顶附近的清洁点为参考点,并假设参考点的后向散射系数为已知值,就消除了激光雷达常数项,因此可反演出几何因子影响区以上气溶胶的后向散射系数廓线。

侧向散射激光雷达系统反演气溶胶后向散射系数的方法利用本项目组提出的方法^[12,14-16],其中,侧向散射激光雷达方程可表示为

$$N(z, \theta) = \frac{N_0 K A}{D} \left[\frac{\beta_1(z, \pi)}{f_1(\pi)} f_1(\theta) + \frac{\beta_2(z, \pi)}{f_2(\pi)} f_2(\theta) \right] \cdot \exp[-\tau - \tau / \cos(\pi - \theta)] \Delta\theta, \quad (1)$$

式中 $N(z, \theta)$ 为侧向散射激光雷达单个像元接收到的高度为 z , 散射角为 θ , 角宽度为 $\Delta\theta$ 的气溶胶侧向散射信号, D 为 CCD 相机到激光束的水平距离, N_0 、 K 、 A 分别为激光器的单脉冲能量、系统常数和光学接收面积, $f(\theta)$ 为相函数, $\beta(z, \pi)$ 为后向散射系数, τ 为光学厚度, 是消光系数 $\alpha(z)$ 的函数, 即 $\tau = \int_0^z [\alpha_1(z') + \alpha_2(z')] dz'$, 下标 1, 2 分别表示气溶胶和大气分子。

大气分子的后向散射系数、消光-后向散射系数比与相函数, 均由大气模式和理论计算得到。利用后向和侧向散射激光雷达反演气溶胶后向散射系数廓线的步骤为:

- 1) 由后向散射激光雷达反演得出气溶胶后向散射系数廓线, 侧向和后向散射激光雷达有效信号存在一个重叠的高度范围(约为 0.6~1.5 km), 在重叠区选择侧向散射激光雷达反演的参考点, 则参考点的后向散射系数值由后向散射激光雷达的数据传递;
- 2) 利用太阳辐射计或让侧向散射激光雷达工作在水平方向上探测气溶胶的相函数;
- 3) 根据经验假设气溶胶消光-后向散射系数比或利用拉曼散射激光雷达获取气溶胶的激光雷达比;
- 4) 把上述已知参数代入(1)式中, 应用递推法反演出近地面气溶胶后向散射系数廓线;
- 5) 后向散射系数拼接: 利用侧向和后向散射激光雷达各自的优缺点, 在近距离段, 采用侧向散射激光雷达反演的气溶胶后向散射系数数据; 在远距离段, 采用后向散射激光雷达反演的气溶胶后向散射系数数据; 在重叠区域, 采用两激光雷达反演出气溶胶后向散射系数的平均值。

上述方法的正确性已得到验证^[12,15-16]。

3 结果与分析

实验探测系统选定在合肥西郊的董铺水库, 其三面环水, 距离市中心约 15 km。在 2014 年 3 月至 2015 年 2 月利用侧向和后向散射激光雷达共进行了 82 个夜晚的探测实验。

3.1 个例分析

为了说明侧向散射激光雷达在近地面大气探测中的优势, 首先进行个例分析。图 2 为 2014 年 10 月 3 日 3 时 20 分近地面气溶胶后向散射系数随高度的变化廓线, 实验中 $D=24.05$ m, 可见, 从 0.8~1.15 km 侧向和后向散射激光雷达反演结果吻合得很好, 1.15 km 以上侧向和后向散射激光雷达变化趋势一致, 侧向散射激光雷达波动较大是由于其远距离段分辨率较低、信噪比较低造成的; 在 0.8 km 以下后向散射激光雷达系统由于存在探测盲区和过渡区, 信号接收不全, 故探测误差较大, 而侧向散射激光雷达系统探测到 0.8 km 以下气溶胶后向散射系数的分布在 0.175 km 和 0.253 km 有 2 个峰值, 这是后向散射激光雷达系统因几何因子的影响而探测不到的。

气溶胶后向散射系数随高度分布的统计规律是指数衰减的, 但在实验探测中发现气溶胶后向散射系数随高度的廓线不完全遵从这一规律, 图 3 给出了实验探测中发现的 4 类典型的气溶胶后向散射系数高度廓线形状。图 3 (a) 为 2015 年 2 月 13 日 20 时 45 分的气溶胶后向散射系数反演廓线, 可见, 从地面到 3 km 之

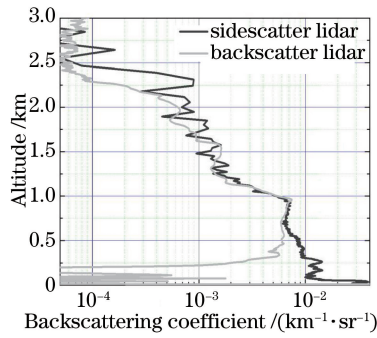


图 2 2014 年 10 月 03 日 03:20 地面气溶胶后向散射系数廓线

Fig. 2 Profile of ground aerosol backscattering coefficient at 03:20, October 3th, 2014

间气溶胶后向散射系数宏观上是随高度而减少的,但呈多层结构分布;近地面气溶胶后向散射系数较大,约为 $0.02475 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,但是在 3 km 时后向散射系数已衰减至 $0.00034 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$;分别在 0.36 km、1.26 km 和 2.7 km 处出现峰值。图 3 (b) 为 2014 年 7 月 20 日 21 时的气溶胶后向散射系数反演廓线,可见,在 0.135~1.26 km 之间随高度升高,后向散射系数由 $0.00772 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 增大至 $0.01802 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,然后气溶胶后向散射系数迅速减小,但在 2.37 km 时气溶胶后向散射系数又出现一个小峰值 $0.00122 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。图 3(c) 为 2014 年 10 月 14 日 18 时 30 分的气溶胶后向散射系数反演廓线,可见,在 1.0 km 以下气溶胶后向散射系数基本为常数,约为 $0.0145 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,然后迅速减小,在 1.5~3 km 之间气溶胶后向散射系数随高度变化波动较大,最小值出现在 2.33 km 处。图 3(d) 为 2014 年 12 月 23 日 20 时的气溶胶后向散射系数反演廓线,可见,近地面气溶胶后向散射系数约为 $0.00944 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,随高度的升高气溶胶后向散射系数呈减小趋势,到 3 km 时已经衰减至 $0.00019 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。图 3(d) 的探测结果与气溶胶的统计规律是一致的,而图 3(a)~(c) 的探测结果均与气溶胶的统计规律不一致,这些特殊个例的存在也是客观的,且这也可以为分析短期局地天气的变化提供数据支撑。

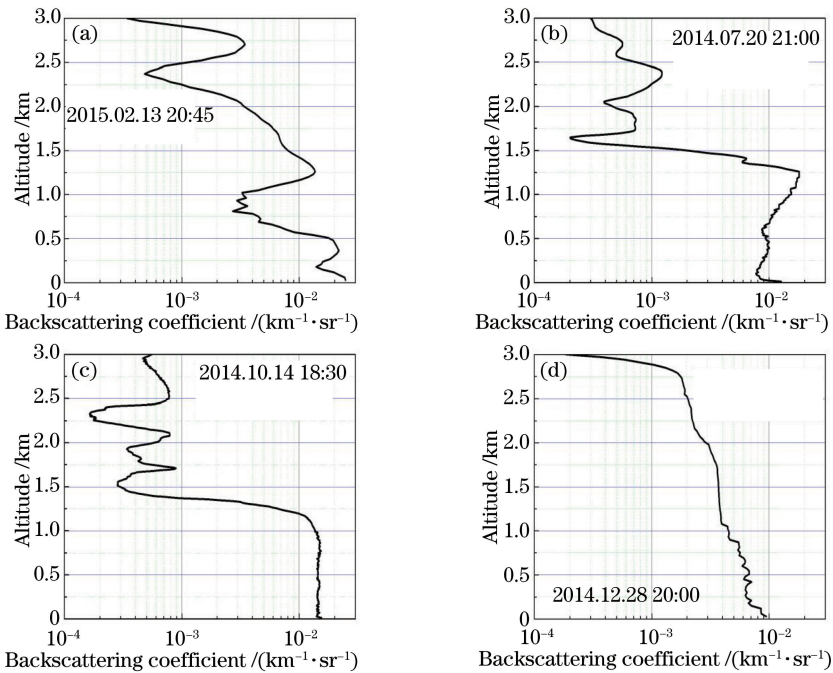


图 3 不同类型的气溶胶后向散射系数廓线。(a) 2015 年 02 月 13 日 20:45;

(b) 2014 年 07 月 20 日 21:00; (c) 2014 年 10 月 14 日 18:30; (d) 2014 年 12 月 28 日 20:00

Fig. 3 Different types of aerosol backscattering coefficient profile. (a) At 20:45, February 13th, 2015;

(b) at 21:00, July 20th, 2014; (c) at 18:30, October 14th, 2014; (d) at 20:00, December 28th, 2014

图 4 为 2014 年 12 月 28、29 日和 29、30 日连续 2 个夜晚的气溶胶后向散射系数反演结果。为了更详尽地了解与人类生产活动密切的高度内气溶胶的变化情况,只显示 0.6 km 以下的细节,可见,2 个夜晚的气溶胶后向散射系数都很大。从图 4 (a)中可见,2014 年 12 月 28、29 日随时间推移近地面气溶胶后向散射系数逐渐增大,后向散射系数大的气溶胶层逐渐升高,在 29 日 05:45~06:00 地面气溶胶后向散射系数达到最大。从高度上看,随着高度升高,气溶胶后向散射系数逐渐减小;从图 4(b)中可见,2014 年 12 月 29~30 日近地面气溶胶后向散射系数平均水平大于 2014 年 12 月 28~29 日,气溶胶后向散射系数大的气溶胶层主要分布在 0.15 km 以下。随着时间的推移气溶胶浓度逐渐增大,在 30 日 05:15~06:00 之间达到最大,这与图 4(a)的规律相似。从合肥气象局在董铺水库设的 PM 2.5(直径小于 2.5 μm 的颗粒物)质量浓度探测仪采集的数据可知,2014 年 12 月 28 日 20:00~29 日 06:00 近地面 PM 2.5 质量浓度平均值为 92.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,2014 年 12 月 29 日 19:00~30 日 06:00 近地面 PM 2.5 质量浓度平均值为 113.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,这与气溶胶后向散射系数在图 4(b)中比图 4(a)中大的结论相符。

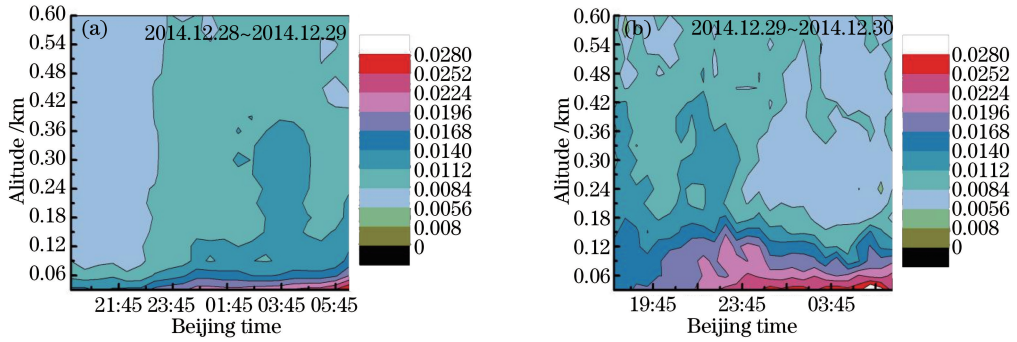


图 4 近地面气溶胶后向散射系数廓线随时间变化。(a) 2014 年 12 月 28 日至 29 日; (b) 2014 年 12 月 29 日至 30 日
Fig. 4 Profile of aerosol backscattering coefficient with time varying. (a) On December 28th, 29th, 2014;
(b) on December 29th, 30th, 2014

3.2 近地面气溶胶后向散射系数统计分布

将 2014 年 3 月至 2015 年 2 月共 82 个晚上的探测数据根据本文方法进行反演,并对反演结果进行季节平均(2014 年 3~5 月为春季,2014 年 6~8 月为夏季,2014 年 9~11 月为秋季,2014 年 12 月~2015 年 2 月为冬季),图 5 给出了 2014 年合肥地区 0.6 km 以下气溶胶后向散射系数的季节平均结果,表 1 为实验时间分布。在春季和夏季由于探测系统还未实现自动采集,故每次夜间探测时间较短。从图 5 (a)可以看出,20:00~22:00 之间合肥地区春季气溶胶后向散射系数基本不随时间变化,后向散射系数大的气溶胶层较薄,主要分布在 0.03 km 以下区域。从图 5(b)中可以看出,21:00~23:00 之间近地面气溶胶后向散射系数变化不大,在 0.06 km 以上夏季气溶胶后向散射系数平均比春季大,在高度上气溶胶后向散射系数随高度升高而减小。图 5(c)中秋季地面气溶胶后向散射系数随时间逐渐增大,且后向散射系数大的气溶胶层逐渐增厚,在 22:30 以后地面气溶胶后向散射系数超过 0.02 $\text{km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$,05:00 后向散射系数超过 0.02 $\text{km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ 的气溶胶层达到 0.08 km。图 5(d)中冬季气溶胶后向散射系数在 0.06 km 以上平均要比其他季节大,近地面气溶胶后向散射系数同秋季类似,也是随时间逐渐增大的,在 02:00 后向散射系数大于 0.012 $\text{km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ 的气溶胶层达到 0.14 km。

由于 2014 年探测时间有限,所以图 5 仅反映探测时间段的平均值,只能一定程度上反映合肥地区 2014 年四季气溶胶后向散射系数随时间和高度的分布情况。

表 1 实验时间分布一览表
Table 1 List of experiment time distribution

Spring	Number of nights	Summer	Number of nights	Autumn	Number of nights	Winter	Number of nights
2014.03	5	2014.06	4	2014.09	3	2014.12	12
2014.04	9	2014.07	9	2014.10	9	2015.01	5
2014.05	7	2014.08	5	2014.11	7	2015.02	7

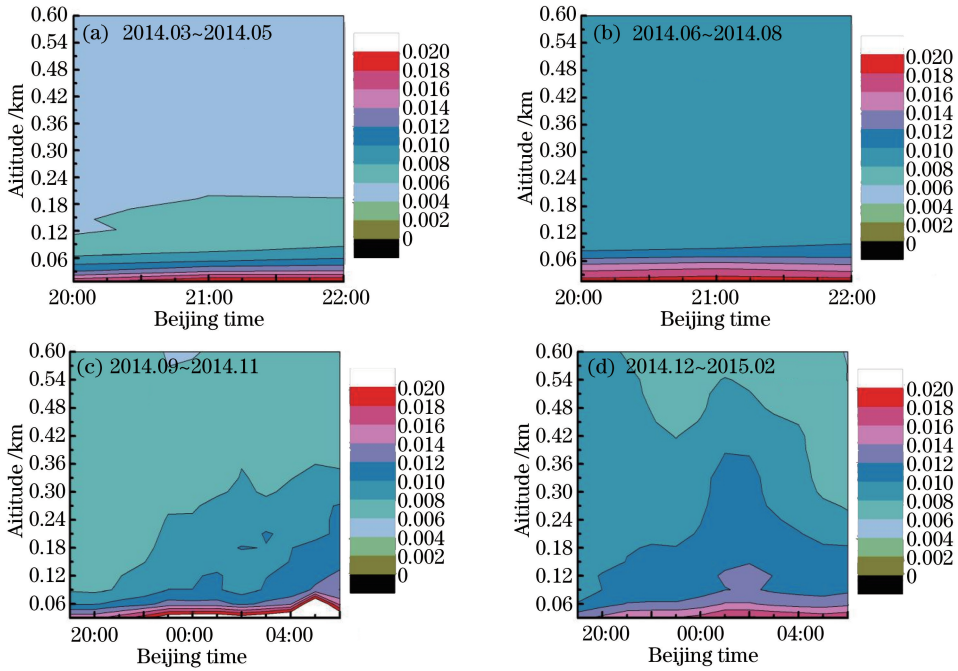


图 5 近地面后向散射系数的季节平均。(a) 春季(2014.03-2014.05);

(b) 夏季(2014.06-2014.08); (c) 秋季(2014.09-2014.11); (d) 冬季(2014.12-2015.02)

Fig. 5 Average profile of aerosol backscattering coefficient with season. (a) Spring (2014.03~2014.05);

(b) summer (2014.06~2014.08); (c) autumn (2014.09~2014.11); (d) winter (2014.12~2015.02)

4 结 论

在已搭建的侧向散射激光雷达系统和提出的侧向散射激光雷达反演方法的基础上,按个例分析了近地面气溶胶后向散射系数随高度的变化廓线,发现侧向散射激光雷达在近地面的探测中具有后向散射激光雷达不可比拟的高精度和高分辨率的优势,且近地面气溶胶后向散射系数廓线变化情况不尽相同。对 2014 年 3 月至 2015 年 2 月期间共 82 个晚上探测的数据进行了反演和统计。总体上,四季气溶胶后向散射系数随高度的升高而减小,冬季气溶胶随高度的升高减小得比其他季节缓慢。经过长期的探测积累和统计分析,可以为环保部门了解近地面气溶胶随时空的分布规律提供数据支撑,为进一步防控近地面空气污染提供科学依据。

参 考 文 献

- 1 Wu Dui. Formation and evolution of haze weather[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(3): 157-161.
吴 兑. 灰霾天气的形成与演化[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 157-161.
- 2 Wang Liping, Dai Chunlei, Zhang Chengjiang. The study progress in the research for the particular in city and its effect on human health[J]. Environmental Monitoring in China, 2005, 21(1): 83-87.
王利平, 戴春雷, 张成江. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应[J]. 中国环境监测, 2005, 21(1): 83-87.
- 3 Sun Danping, Huang Guoqin. Cause, hazard and control measures of hazy weather in China [J]. Advances in Environmental Protection, 2014, 4(4): 101-111.
孙丹平, 黄国勤. 中国雾霾天气的成因、危害及其防治措施[J]. 环境保护前沿, 2014, 4(4): 101-111.
- 4 He Xiu, Deng Zhaoze, Li Chengcai, et al.. Application of MODIS AOD in surface PM₁₀ evaluation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(2): 26-32.
何 秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM₁₀ 检测方面的应用研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 26-32.
- 5 Ma Yingying, Gong Wei, Zhu Zhongmin. Aerosol optical characteristics in south east China determined using spaceborne lidar[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4): 159-166.

- 马盈盈, 龚 威, 朱忠敏. 中国东南部地区气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 159-166.
- 6 Wang Z, Wechsler P, Kuestner W, *et al.*. Wyoming cloud lidar: Instrument description and application[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13576-13587.
- 7 Huang Z, Huang J, Bi J, *et al.*. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-US joint dust field experiment[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: D00K15.
- 8 Liu J, Zheng Y, Li Z, *et al.*. Seasonal variations of aerosol optical properties, vertical distribution and associated radiative effects in the Yangtze Delta region of China[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D00K38.
- 9 Tao Zongming, Shan Huihui, Ma Xiaomin, *et al.*. Retrieval method of PM 2.5 mass concentration profile in near-ground and case study[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110102.
陶宗明, 单会会, 麻晓敏, 等. 近地面 PM 2.5 质量浓度廓线反演方法及个例研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110102.
- 10 Dho S, Park Y, Kong H. Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere[J]. Applied Optics, 1997, 36(24): 6009-6010.
- 11 Hu S, Wang X, Wu Y, *et al.*. Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals[J]. Optics Letters, 2005, 30(14): 1879-1881.
- 12 Tao Z, Liu D, Wang Z, *et al.*. Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1127-1133.
- 13 Fernald F. Analysis of atmospheric lidar observation: Some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- 14 Tao Z, Liu D, Xie C, *et al.*. A numerical inversion method for CCD side-scatter lidar[J]. International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2013: 250-252.
- 15 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0201001.
麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0201001.
- 16 Shi Bo, Tao Zongming, Ma Xiaomin, *et al.*. Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501006.
史 博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501006.