

从气溶胶微物理属性分析冬季重庆地区霾的垂直分布特征^{*1}

刘海晨¹ 丁明月¹ 江文华² 陈勇航^{1*} 张华³ 杜豪杰¹ 李嘉栋¹ 邱靖涵¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620;

2. 重庆气象台, 重庆 401147;

3. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

【摘要】采用2007~2011年冬季(12月~次年2月)CALIPSO星载激光雷达L1监测数据,通过分析532 nm总后向散射系数、体积退偏比和色比,对重庆地区冬季霾期间气溶胶光学和微物理特性的垂直分布进行了研究。结果表明:重庆地区冬季霾期间,大气散射能力随高度减弱,在0~1 km高度最强;各高度层气溶胶粒子规则性与粒径大小的分布情况与全年总体分布情况基本相同,但变化趋势单调性更强,0~1 km高度层规则的、大颗粒气溶胶所占比例最大,3~4 km高度不规则的、小颗粒气溶胶所占比例最大;年际变化上,气溶胶散射强度逐年增强,其中2008~2010年变化较小,2011年明显增强;各年均以规则的、小颗粒气溶胶为主,2011年不规则气溶胶所占比例最大,而大颗粒气溶胶所占比例逐年增大。

【关键词】CALIPSO; 气溶胶; 霾; 垂直分布

【中图分类号】P401 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1004-8227(2017)04-064-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201704018

2009年起重庆成为全国灰霾与臭氧试点监测城市,同时也是成渝地区大气污染联防联控的重要区域,对于重庆地区霾的形成及影响等研究工作是对全国气溶胶的理化性质与城市群霾的形成机制研究的一个重要补充。重庆位于青藏高原东侧的四川盆地内,特殊的地理条件使大气污染物不易扩散,加之人口密集,工业和交通发达,大气污染尤为严重,霾天气频发,威胁生态环境和人体健康。国内外对于霾的研究主要集中在霾的源解析^[1, 2]、影响因素^[3]以及气溶胶化学^[4~6]、物理^[7, 8]和光学属性^[9~11]等方面。与其他地区相比,重庆地区霾的研究相对较少^[12]。李礼等^[13]对一次典型灰霾天气条件下连续的气溶胶激光雷达探测结果

¹ 收稿日期: 2016-02-19; 修回日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(91644211, 41575002, 41375021); [National Natural Science Foundation (91644211, 41575002, 41375021)]; 重庆市气象局开放式研究基金项目(kfjj-201203); [Open Research Fund of Chongqing Meteorological Bureau]

作者简介: 刘海晨(1991~),男,主要研究方向为大气环境. E-mail: liuhaichen117@163.com

*通讯作者 E-mail: yonghangchen@dhu.edu.cn

进行分析,发现重庆冬季典型霾天气下大气边界层(PBL)平均高度约为600 m,大气气溶胶光学厚度(AOD)在4以上;黄伟等^[14]通过对霾与非霾日典型天气渐变条件下特征因子的讨论,发现颗粒物(尤其是细粒子)对大气能见度影响显著,而黑碳对细粒子贡献显著,导致灰霾发生率增大。过去对重庆地区气溶胶垂直分布特征的研究很少,而气溶胶的垂直分布特征是评估气溶胶辐射与气候效应的关键因素之一^[15]。

本研究应用“云-气溶胶激光雷达红外开拓者卫星观测”(Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO)的反演资料分析重庆地区冬季霾的垂直分布特征,以期为霾污染的预报预警、污染控制以及数值模拟等研究工作提供参考。

1 资料与方法

CALIPSO由美国的NASA、Ball公司和法国国家空间研究中心(CNES)等联合研制,于2006年4月28日成功发射升空。CALIOP是CALIPSO卫星的主要有效载荷之一,具备识别气溶胶、沙尘、烟尘以及卷云的能力。CALIPSO采用了偏振检测技术,探测范围广,具有较高垂直分辨率和测量精度,能在包括海洋和陆地上空等全球范围内快速、连续、实时和长期地进行大气气溶胶光学属性和形态特征的探测^[16]。

CALIOP望远镜接受的回波信号分为3个通道,一个测量1 064 nm的后向散射强度,另外两个通道测量532 nm后向散射信号的正交极化部分。在进行反演算法时,将两通道分别获取的后向散射强度叠加作为532 nm激光总的后向散射强度。CALIOP可以获得轨道白天和晚上的两个波长(532 nm和1 064 nm)的后向散射系数,计算公式如下:

$$\beta'_{532,\text{Total}}(z) = [\beta_{//}(z) + \beta_{\perp}(z)] \cdot T_{532}^2(z) \quad (1)$$

$$\beta'_{532,\perp}(z) = \beta_{\perp}(z) \cdot T_{532}^2(z) \quad (2)$$

$$\beta'_{1064}(z) = \beta_{1064}(z) \cdot T_{1064}^2(z) \quad (3)$$

式中, $\beta(z)$ 表示不同高度范围的后向散射系数,激光脉冲输出波长为532 nm和1 064 nm。下标 \perp 和 $//$ 分别表示偏振光532 nm平行光和532 nm垂直光, $T^2(z)$ 表示双向大气透过率:

$$T^2(z) = \exp \left\{ -2 \int_z^{z_{\text{sat}}} [\delta_m(z') + \delta_a(z') + \delta_{O_3}(z')] dz' \right\} \quad (4)$$

δ_m 、 δ_a 和 δ_{O_3} 分别表示气体分子、气溶胶和臭氧的消光系数, z_{sat} 代表卫星的高度。

体积退偏比是532 nm垂直后向散射系数与532 nm平行后向散射系数之比,反映被测颗粒物的不规则程度,值越大,颗粒物越不规则,公式如下:

$$VDR(z) = \frac{\beta'_{532,\perp}(z)}{\beta'_{532,\parallel}(z)} \quad (5)$$

本文定义退偏比值在 0%~5% 区间内的气溶胶为规则性气溶胶，大于 5% 为不规则性气溶胶。通过退偏比可初步区分气溶胶粒子的形状，而气溶胶的形状与其组成成分有着密切的联系。“规则性”与“不规则性”具体是指气溶胶粒子的外形是球形还是非球形，例如沙尘为不规则性气溶胶，而人类活动产生的多为规则性气溶胶，灰霾正是由这两类气溶胶造成的低能见度现象。体积退偏比数值的大小可以作为区分“规则性”与“不规则性”气溶胶粒子的参量，本文试图通过体积退偏比数值的大小分析气溶胶的规则性，从而认识这两类气溶胶对霾的影响。

色比是 1 064 nm 与 532 nm 总后向散射系数之比，反映被测颗粒物的粒径大小，值越大，粒径越大，公式如下：

$$ACR(z) = \frac{\beta'_{1064}(z)}{\beta'_{532,\text{Total}}(z)} \quad (6)$$

本文定义色比值在 0~0.5 区间内为小粒径粒子，大于 0.5 为大粒径粒子。经分析发现，色比在 0~2.0 范围均有值出现，但绝大多数在 1.1 以下。

2010 年 6 月出台的气象行业标准《霾的观测和预报等级》^[17]规定，能见度小于 10 km，排除降水、沙尘暴、扬尘、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象造成的视程障碍，相对湿度小于 80%，判别为霾，相对湿度 80%~95% 时，按照地面气象观测规范规定的描述或大气成分标进一步判识。考虑到重庆的气候特点和卫星资料情况，在此统计 14 时能见度低于 10 km、相对湿度低于 95%、排除白天降水、吹雪、扬沙、浮尘、烟幕等其他能导致低能见度事件的情况为霾。

研究中所用的气象资料由重庆市气象信息与技术保障中心资料室提供，为重庆市 34 个气象站观测资料；卫星资料选取的范围为北纬 28°~32°，东经 105°~110°。当至少 2 个站点在同一研究时段出现霾时，排除 CALIPSO 卫星 L1 产品中探测点过少以及云层过厚而使激光无法穿过云层探测低层大气的资料，筛选出重庆 2008~2011 年冬季（本文定义 1、2 月及 12 月为冬季）21 个 CALIPSO 过境时的霾个例，分析其气溶胶的光学和微物理属性的总体分布特征和年际分布特征，并结合个例初步讨论气溶胶可能来源。

2 结果与分析

2.1 冬季总体分布特征

2.1.1 散射系数的垂直分布

由表 1 可知，海拔高度在 0~4 km 范围内，532 nm 总后向散射系数的频率分布随散射系数的增大而减少。而不同高度的散射系数分布情况也不同（如图 1 所示），在 532 nm 总后向散射系数为 0~0.0025 km⁻¹·sr⁻¹ 的区间内，3~4 km 高度的累积频率最大，为 88.643%，依次向下 3 个高度层散射系数累计频率分别为 70.417%、33.143% 和 31.665%，可知在该区间内，532 nm 总后向散射系数累积频率随着高度的升高而增加。在散射系数为 0.0025~0.0085 km⁻¹·sr⁻¹ 区间内，观察得出在该区间 532 nm 总后向散射系数累积频率随着高度的升高减少，高度层从高到低的散射系数累计频率分别为 10.931%、29.279%、65.651% 和 68.097%。在 0.0085~0.001 km⁻¹·sr⁻¹ 的范围内，1~2 km 高度的散射系数累积频率最大为 1.206%，0~1 km、2~3 km、

3~4 km 的散射系数累积频率比较接近, 分别为 0.265%、0.303%、0.426%。由此可见, 大气散射能力随着高度的升高而减弱, 0~2 km 的低空散射能力较强。相关研究表明, 大气的散射系数与 PM2.5 相关性高达 0.9, 通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验^[18, 19], 气溶胶细粒子浓度对气溶胶散射系数变化影响较大^[20]。所以可能是低空排放烟尘中含有大量细粒子气溶胶和大气扩散等原因造成低空空气溶胶层较厚, 使得低空的大气散射能力加强。同时, 大气能见度与大气粒子的散射、吸收能力和气体的散射、吸收能力有关, 尤其是与气溶胶粒子的散射能力关系密切^[21~23]。重庆在全国属高湿区, 逐渐增多的气溶胶颗粒物在适宜的湿度条件下吸湿增长, 进一步增强气溶胶粒子的消光作用, 使能见度持续处于较低水平, 导致严重霾出现并持续。与吕梦瑶^[24]在不同季节的数据统计中发现的冬季 PM10 的浓度普遍较大, 且出现灰霾时, 风速较小, 颗粒物浓度较高, 散射系数大, 能见度低这一结论相似。

表 1 高度0~4 km的532 nm总后向散射系数频率分布

Tab.1 Distribution of 532 nm Total Attenuated Backscattering Coefficient in the Height Range of 0~4 km

散射系数	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100
频率/%	37.180	32.510	13.520	8.177	4.273	1.984	1.072	0.646	0.390	0.255

注: 散射系数单位为 $10^4 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

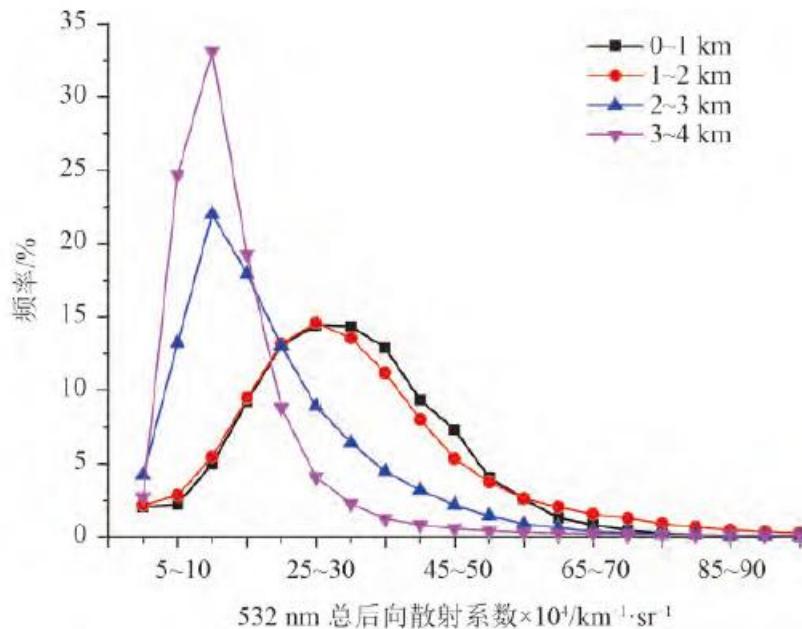


图 1 不同高度532 nm总后向散射系数频率分布

Fig.1 Comparison of the Distributions of 532 nm Total Attenuated Backscattering Coefficient in Different Heights

2.1.2 体积退偏比的垂直分布

由表 2 可知, 0~4 km 海拔高度范围体积退偏比的频率分布随着体积退偏比的增大而减少。图 2 是不同高度的体积退偏比频率分布图。在体积退偏比为 0%~20% 范围内, 1~2 km 高度的体积退偏比累积频率最大, 为 86.259%, 0~1 km、2~3 km 和 3~4 km 的体积退偏比累积频率分别为 85.327%、79.935% 和 74.158%。3~4 km 高度的体积退偏比累积频率在 20%~100% 的范围内最大, 为 25.842%, 其次为 2~3 km 高度层的体积退偏比累积频率, 为 20.065%, 0~1 km 和 1~2 km 高度在该区间的体积退偏比累积频率较接近, 分别为 14.673% 和 13.741%。可知, 2~4 km 高度的气溶胶颗粒不规则程度较大, 而 1~2 km 高度层规则气溶胶颗

粒所占比例最大。根据 Dong 等^[25]和 Liu 等^[26]的研究表明陆地型气溶胶和海洋型气溶胶的表面接近球型, 较为平滑, 其退偏振比为 0~3%; 而沙尘气溶胶是非球型气溶胶, 其体积退偏比明显高于其他类型气溶胶, 主要集中在 17% 左右。当海洋型气溶胶和陆地型气溶胶中混有沙尘等颗粒物时, 大气体积退偏比将增大^[27]。所以在 1~4 km 高度范围内, 重庆冬季气溶胶随高度升高由海洋型气溶胶和陆地型气溶胶逐渐转为沙尘型气溶胶。

表 2 高度 0~4 km 体积退偏比频率分布
Tab.2 Distribution of Volume Depolarization Ratio in the Height Range of 0~4 km

体积退偏比(%)	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100
频率(%)	67.000	14.820	7.233 0	4.081	2.587	1.795	1.260	0.935	0.725	0.564

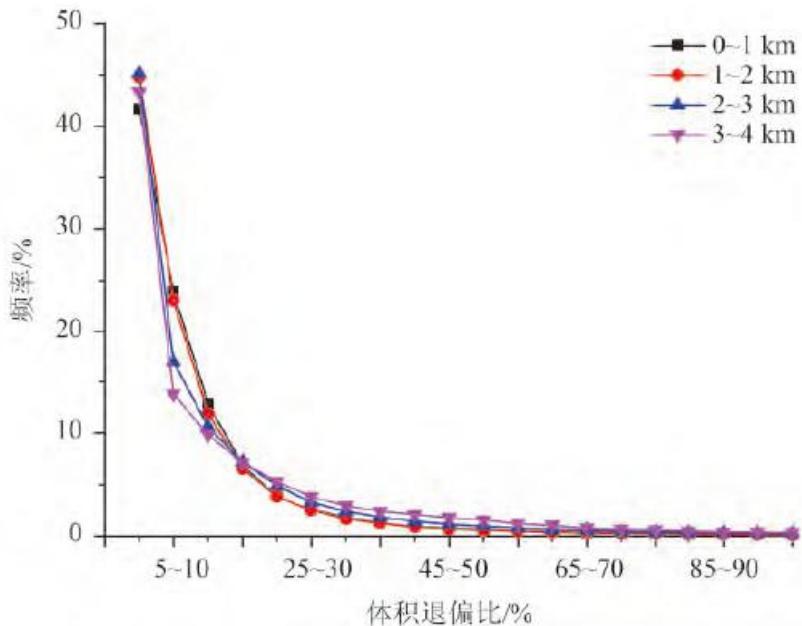


图 2 不同高度体积退偏比频率分布
Fig.2 Comparison of the Distributions of Volume Depolarization Ratio in Different Heights

2.1.3 色比的垂直分布

由于 Liu 等^[26]的研究表明一般气溶胶具有较小的色比值, 主要集中在 0~0.5; 海洋型气溶胶粒子的色比峰值集中在 0~0.75; 烟尘的色比值较大, 范围为 0~1.5; 沙尘粒子的色比范围为 0.25~1.25。大城市区域由于人类活动形成的霾天气本质主要是细粒子气溶胶污染^[21]。由表 3 可知, 海拔 4 km 以下色比频率随着色比的增大先增大后减小, 在色比为 0.2~0.4 区间内达到最大值 19.21%。不同高度的色比频率分布图如图 3 所示。可知, 在色比值为 0~0.3 范围内, 3~4 km 高度的色比累积频率最大, 为 30.373%, 2~3 km、1~2 km、3~4 km 高度色比频率依次为 25.865%、9.276% 和 2.972%。2~3 km 高度的色比频率在色比值为 0.3~0.6 范围内达到最大, 其该区域内累积频率为 35.861%, 3~4 km 和 1~2 km 在该范围内色比累积频率较接近, 分别为 31.505% 和 29.787%, 最小为 0~1 km 高度层色比累积频率, 为 12.413%。在色比值为 0.6~0.9 范围内, 各高度层由高到低累积频率分别为 20.728%、22.452%、33.490% 和 30.697%。在色比值为 0.9~2.0 的区域内, 0~1 km 的色比累积频率最大, 为 53.918%, 其余高度由低到高累积频率为 27.447%、15.823% 和 17.394%。由此可知, 0~1 km 的低空范围主要以大颗

粒气溶胶为主，随高度升高，大颗粒气溶胶所占比例减少。低层大气受到地面扬尘作用以及各层气溶胶吸湿后粒径和重量增大下沉到底层空间，导致粒径随高度增加而减少。

表3 高度0~4 km色比频率分布

Tab.3 Distribution of Color Ratio in the Height Range of 0~4 km

色比	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.2	1.2~1.4	1.4~1.6	1.6~1.8	1.8~2.0
频率(%)	16.740	19.210	19.460	16.210	11.170	7.000	4.314	2.794	1.836	1.259

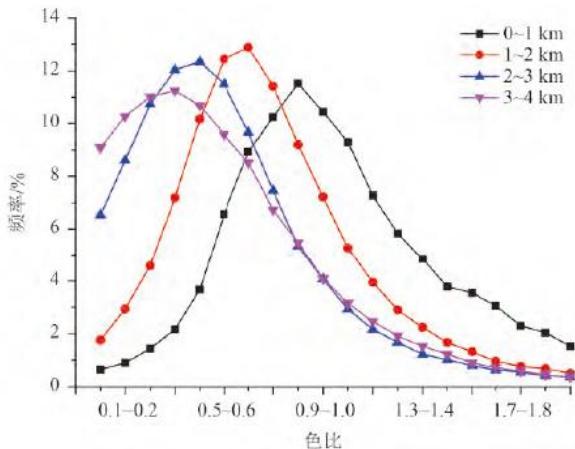


图3 不同高度色比频率分布

Fig.3 Comparison of the Distributions of Color Ratio in Different Heights

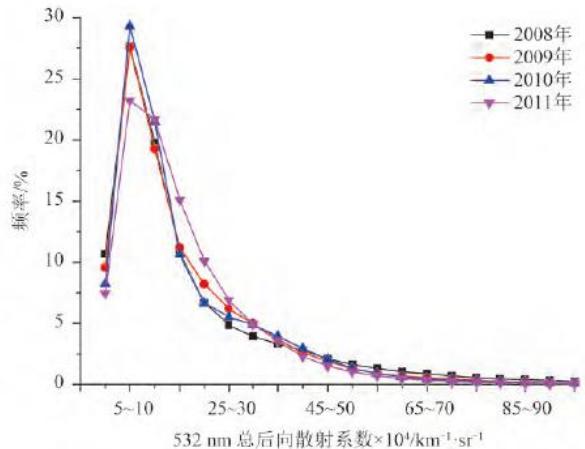


图4 2008~2011年0~4 km高度532 nm总后向散射系数频率分布的对比

Fig.4 Comparison of the Distributions of 532 nm Total Attenuated Backscattering Coefficient in each Year from 2008 to 2011

2.2 四年各参量频率分布的对比

由图4知，532 nm 总后向散射系数为 $0 \sim 0.0015 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 时，2010年在该区间的散射系数累积频率最大，为 58.979%，其次是 2008 年，散射系数累积频率为 58.045%，散射系数累积频率在该区间最小的是 2010 年，为 52.340%。2011 年在 532 nm 总后向散射系数为 $0.0015 \sim 0.0045 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 时散射系数累积频率最大，为 42.846%，2008 年在该区间的散射系数累积频率最小，是 32.393%，该区段 2009 年、2010 年的散射系数累积频率分别为 36.856% 和 34.531%。在 532 nm 总后向散射系数为 $0.0045 \sim 0.001 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 范围内，其中 2008 年的散射系数累积频率最大，为 9.562%，2009、2010、2011 年的散射系数累积频率依次为 6.724%、6.490% 和 4.814%。

比较 2008 ~ 2011 年体积退偏比的频率分布(图5)可知，体积退偏比为 0%~10% 时，2010 年的体积退偏比累积频率最大，为 67.556%，其次是 2009 年，体积退偏比累积频率为 64.344%，2008 年和 2011 年在该范围的体积退偏比累积频率分别为 60.592% 和 61.534%。在体积退偏比为 10%~30% 的范围内，体积退偏比累积频率最大的是 2011 年，为 21.512%，2008、2009、2010 年在该区段的体积退偏比累积频率比较接近，分别为 20.780%、22.663% 和 20.476%。当体积退偏比为 30% ~ 100% 时，2008 年的体积退偏比累积频率最大，为 21.577%，2009、2010、2011 年在该区段的体积退偏比累积频率则较为接近，分别为 14.940%、13.837% 和 15.029%。

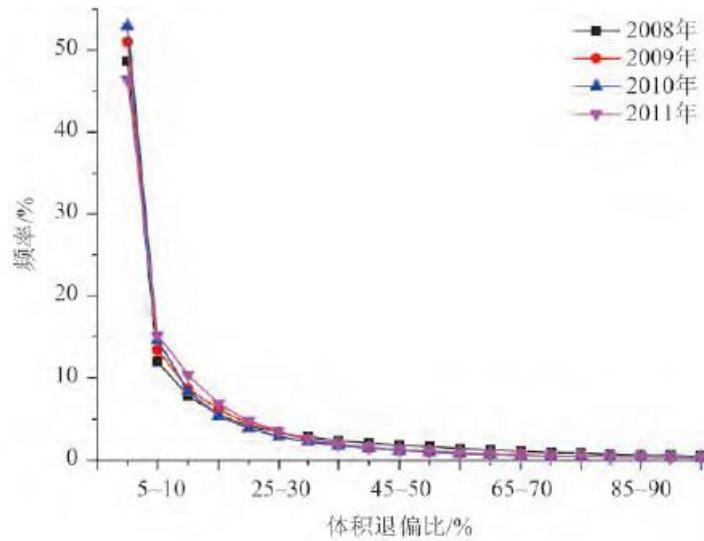


图 5 4年0~4 km高度体积退偏比频率分布的对比

Fig.5 Comparison of the Distributions of Volume Depolarization Ratio in each Year from 2008 to 2011

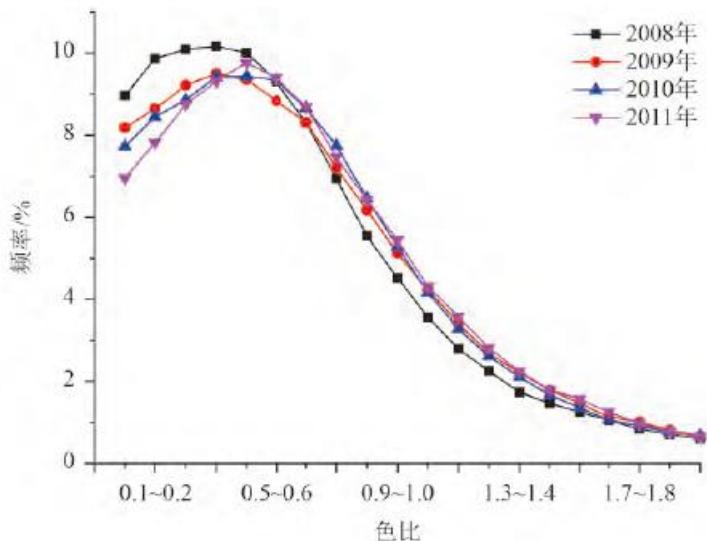


图 6 2008~2011年0~4 km高度色比频率分布的对比

Fig.6 Comparison of the Distributions of Color Ratio in each Year from 2008 to 2011

图 6 是 2008~2011 年色比的频率分布图。由图可知, 色比值为 0~0.6 范围内, 2008 年的色比累积频率最大, 为 58.385%, 最小是 2011 年, 其色比累积频率为 51.990%, 2009、2010 年在该范围内的色比累积频率较接近, 分别是 53.730% 和 53.219%。2011 年的色比累积频率在色比值为 0.6~1.7 的区段内占最大, 为 45.610%, 而 2008 年在该区段的色比累积频率最小, 为 39.449%。在色比值为 1.7~2.0 的范围内, 色比累积频率最大的是 2009 年, 为 2.509%, 最小是 2008 年, 其色比累积频率为 2.167%。

2.3 个例分析

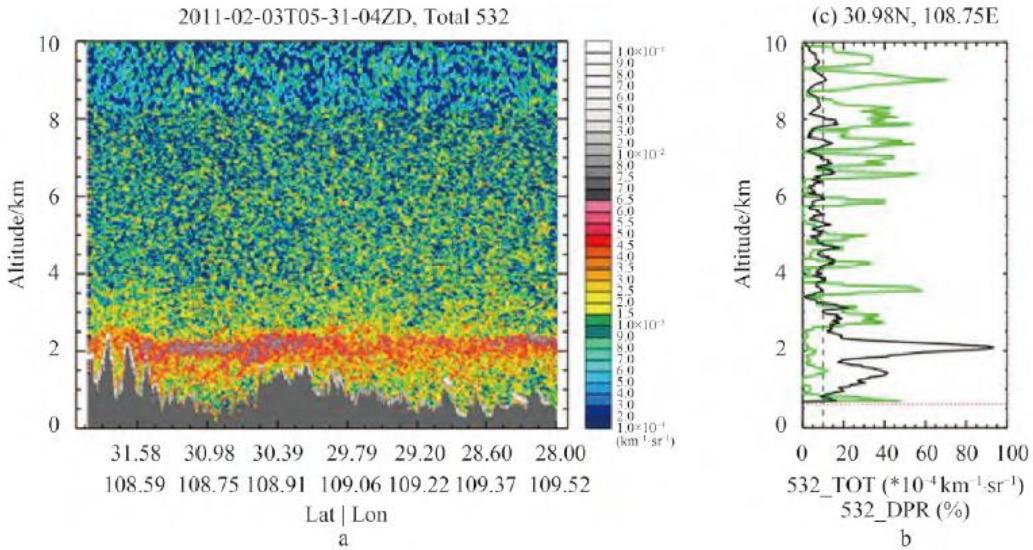


图 7 2011年2月3日13:31:04(北京时间)532 nm总后向散射系数垂直剖面图和30.98°N, 108.75°E体积退偏比(绿线)与532 nm总后向散射系数垂直(黑线)廓线图

Fig.7 Altitude-orbit Cross Section of 532 nm Total Attenuated Backscattering Coefficient, at 13:31 February 3rd 2011 (Beijing Time); and the Vertical Profiles of Volume Depolarization Ratio (Green Curve) and 532 nm Total Attenuated Backscattering Coefficient (Black Curve), at 30.98°N, 108.75°E

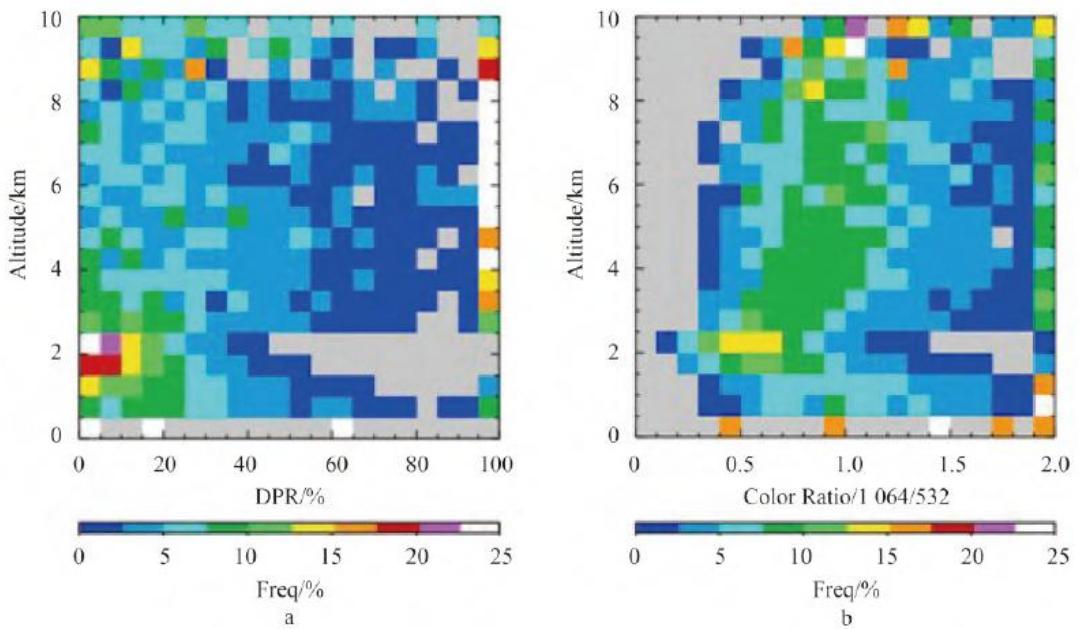


图 8 2011年2月3日13:31:04(北京时间)退偏比和色比随高度的频率分布

Fig.8 Distributions of Volume Depolarization Ratio (DPR) and Color Ratio at Different Altitudes, at 13:31 February 3rd 2011 (Beijing Time)

依据 CALIPSO 卫星 532 nm 激光总后向散射系数的剖面图(图 7(a)), 在 108.5°E , $31.5^{\circ}\text{N} \sim 109.5^{\circ}\text{E}$, 28.0°N 的轨迹

范围存在大量的气溶胶粒子，分布在海拔 $1.3\sim2.9\text{ km}$ 的范围内，这说明 2011 年 2 月 3 日 CALIPSO 卫星轨道经过这一区域时，此处有明显的霾天气。选取其中一个点(108.75° E , 30.98° N)，绘制其上空 2011 年 2 月 3 日 CALIPSO 观测到的 532 nm 激光总后向散射系数和体积退偏比廓线图(图 7(b))。海拔 2 km 以下的总后向散射系数在 $0\sim0.0035\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ 范围内，体积退偏比波动较大，最大达到 54%。 $2\sim3\text{ km}$ 高度范围， 532 nm 总后向散射系数较大，最大达到 $0.0100\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ ，大气散射能力强。体积退偏比也超过 60%，说明该海拔下气溶胶粒子不规则程度相当大。在 $3\sim10\text{ km}$ 高度范围，后向散射系数在 $0\sim0.003\text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ ，退偏比波动较大，最大达到 75%，气溶胶粒子不规则程度大。图 8(a)是该日退偏比随高度的频率分布，可知各高度范围内规则气溶胶和不规则气溶胶同时存在。 $0\sim1\text{ km}$ 范围退偏比在 5%~10%、40%~55%、95%~100% 的出现频率大，以规则气溶胶粒子为主， $1\sim2\text{ km}$ 的退偏比在 0%~20%、95%~100% 范围的出现频率较大，说明该高度以规则气溶胶为主， $3\sim4\text{ km}$ 高度的退偏比出现频率较大的范围为 0%~25% 和 95%~100%，其中 0%~15% 的累积频率最大，说明该高度以不规则气溶胶为主， $3\sim4\text{ km}$ 的退偏比 5%~20% 和 95%~100% 范围的出现频率大，以不规则气溶胶为主。该日的色比随高度的频率分布进一步说明了不同高度气溶胶颗粒大小的分布情况(图 8(b))。可知 $0\sim2\text{ km}$ 高度的色比值出现在 $0.2\sim2.0$ 范围，其中在 $1.9\sim2.0$ 的范围出现频率大，说明该高度主要是大颗粒气溶胶，而 $2\sim4\text{ km}$ 高度的主要以细粒子气溶胶为主。

3 结论

通过上文对不同高度 532 nm 总后向散射系数频率分布、不同高度体积退偏比频率分布、不同高度色比频率分布、4 年 $0\sim4\text{ km}$ 高度 532 nm 总后向散射系数频率分布的研究，得出以下结论。

(1) 从 2008~2011 年 4 个冬季的总体分布发现，重庆地区冬季霾期间，散射能力随着高度增加而减弱，其中 $0\sim1\text{ km}$ 海拔高度散射能力最强；各高度层以规则气溶胶为主，其中 $0\sim1\text{ km}$ 的规则、大颗粒气溶胶所占比例最大， $3\sim4\text{ km}$ 的不规则、小颗粒气溶胶所占比例最大。

(2) 对比 4 年冬季各参量总体分布的年际变化发现，大气气溶胶散射强度逐年增强，其中 2008~2010 年变化较小，2011 年明显增强；各年均以规则气溶胶为主，2011 年不规则气溶胶所占比例最大；各年均以小颗粒气溶胶为主，但大颗粒气溶胶所占比例逐年增大。

(3) 个例分析表明，霾天气有大量气溶胶粒子主要聚集在 $1.0\sim2.5\text{ km}$ 海拔高度范围内， $1.5\sim2.5\text{ km}$ 高度大气散射能力最强； $0\sim2\text{ km}$ 高度以规则气溶胶占主导， $2\sim4\text{ km}$ 高度的不规则气溶胶所占比例最大； $0\sim2\text{ km}$ 高度以大颗粒气溶胶为主， $2\sim4\text{ km}$ 高度的细颗粒气溶胶较多。

参考文献：

- [1] CONTINI D, BELOSI F, GAMBARO A, et al. Comparison of PM10 concentrations and metal content in three different sites of the Venice Lagoon: an analysis of possible aerosol sources[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(11): 1954~1965.
 - [2] ZHANG J, ZHANG Q, TANG C G, et al. Aerosol structure and vertical distribution in a multi-source dust region[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(8): 1466~1475.
 - [3] 胡荣章, 刘红年, 张美根, 等. 南京地区大气灰霾的数值模拟[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 808~814.
- 【HU R Z, LIU H N, ZHANG M G, et al. Simulation of brownish haze in urban areas of Nanjing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(4): 808~814.】

-
- [4] JACOBSON M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. *Nature*, 2001, 409(6821):695 - 697.
- [5] TAN J H, DUAN J C, HE K B, et al. Chemical characteristics of PM2.5 during a typical haze episode in Guangzhou[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(6): 774 - 781.
- [6] SUN Y, ZHUANG G, TANG A A, et al. Chemical characteristics of PM2.5 and PM10 in haze-fog episodes in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(10): 3148 - 3155.
- [7] PENNER J E, DONG X Q, CHEN Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect[J]. *Nature*, 2004, 427(6971): 231 - 234.
- [8] MENON S, HANSEN J, NAZARENKO L. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, 297(5590):2250 - 2253.
- [9] YAN P, TANG J, HUANG J, et al. The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(8): 2229 - 2242.
- [10] HE X, LI C C, LAU A K H, et al. An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(22): 8903 - 8915.
- [11] LYAMANI H, OLMO F J, ALADOS-ARBOLEDAS L. Physical and optical properties of aerosols over an urban location in Spain: seasonal and diurnal variability[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(1): 239 - 254.
- [12] 江玉华, 王强, 李子华, 等. 重庆城区浓雾的基本特征[J]. *气象科技*, 2004, 32(6): 450 - 455.
【JIANG Y H, WANG Q, LI Z H, et al. Characteristics of fog in Chongqing urban area[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32(6): 450 - 455.】
- [13] 李礼, 杨灿, 余家燕, 等. 重庆典型灰霾天气下大气气溶胶的激光雷达探测[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(1): 143 - 146.
【LI L, YANG C, YU J Y, et al. Atmospheric aerosol detection with lidar under typical haze weather in Chongqing[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(1): 143 - 146.】
- [14] 黄伟, 翟崇治, 余家燕, 等. 重庆区域性灰霾天气下大气污染分析初探[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 37(7): 142 - 146.
【HUANG W, ZHAI C Z, YU J T, et al. Tentative analysis of air pollution in Chongqing under haze weather[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 37(7):142 - 146.】
- [15] CLAQUIN T, SCHULZ M, BALKANSKI Y, et al. Uncertainties in assessing radiative forcing by mineral dust[J]. *Tellus B*, 1998, 50(5):491 - 505.

-
- [16] 刘刚, 史伟哲, 尤睿. 美国云和气溶胶星载激光雷达综述[J]. 航天器工程, 2008, 17(1): 78 - 84.
- 【LIU G, SHI W Z, YOU R. Cloud-aerosol Lidar of America[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(1): 78 - 84.】
- [17] 中国气象局. QX/T 113-2010 霾的观测和预报等级[S]. 北京: 气象出版社, 2010.
- 【China Meteorological Administration. QX/T 113-2010 Observation and forecasting levels of haze[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2010.】
- [18] 柯宗建, 汤洁. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 553 - 559.
- 【KE Z J, TANG J. An observation study of the scattering properties of aerosols over Shangdianzi, Beijing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(3): 553 - 559.】
- [19] 蔡斌彬. 城市霾天气下气溶胶的散射消光特征及其影响分析[D]. 天津: 南开大学硕士学位论文, 2007:29 - 52.
- [20] 徐梅, 韩素芹, 武国良, 等. 天津市区秋冬季大气气溶胶散射系数的变化特征[J]. 气象, 2011, 37(12): 1566 - 1571.
- 【XU M, HAN S Q, WU G L, et al. The scattering properties of aerosols in urban site of Tianjin[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(12):1566 - 1571.】
- [21] REID J S, HOBBS P V, FEREK R J, et al. Physical, chemical, and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D24):32059 - 32080.
- [22] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 1 - 6.
- 【WU D, DENG X J, BI X Y, et al. Study on the visibility reduction caused by atmospheric Haze in Guangzhou area[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(1): 1 - 6.】
- [23] 刘新罡, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 733 - 738.
- 【LIU X G, ZHANG Y H, ZENG L M, et al. Research on the influential factor of visibility reduction in Guangzhou[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(6): 733 - 738.】
- [24] 吕梦瑶. 重庆城市灰霾的统计分析与模拟研究[D]. 南京: 南京大学硕士学位论文, 2011:1 - 136.
- 【LV M Y. Statistical analysis and numerical simulation on urban haze in Chongqing area[D]. Nanjing: Master Dissertation of Nanjing University, 2011: 1 - 136.】
- [25] 董旭辉, 祁辉, 任立军, 等. 偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析[J]. 环境科学与研究, 2007, 20(2): 106 -

【DONG X H, QI H, REN L J, et al. Application and data demonstration of lidar in sandstorm observation[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(2): 106 - 111.】

[26] LIU Z Y, LIU D, HUANG J P, et al. Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2008, 8(2): 5957 - 5977.

[27] HUANG J P, MINNIS P, YI Y H, et al. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(18): L18805.