

CALIPSO 卫星探测的大气气溶胶以及卷云的季节变化特性分析

路小梅，江月松

北京航空航天大学电子信息工程学院，北京 100191

E-mail: xiaomei_lu2006@ee.buaa.edu.cn

通讯地址：北京市学院路北京航空航天大学新主楼 F1111 房间，

邮编 100191

电话：15101154957

摘要：本文给出了 CALIPSO 卫星探测的北京地区的卷云消偏振特性和臭氧含量的季节性变化、以及经过长距离运输后的撒哈拉沙尘的消偏振特性。基于 CALIPSO 偏振激光雷达测量数据的分析结果可知：在秋季和夏季时卷云的消偏振度及其高度值要比在春季和冬季时的值高，并且卷云的高度受到平流层顶高度的调制；卷云的消偏振度随着高度的增加或者温度的降低而相应的增加。探测的撒哈拉沙尘暴消偏振度为 0.3。根据 2006-06~2009-02 探测的数据显示：北京地区春季和冬季的大气臭氧密度在 11~25km 范围内比在夏季和秋季要大，春季达到最大而秋季达到最小，而在大气边界层内夏季和春季的臭氧浓度要比冬季和秋季的要大。

关键词：消偏振，激光雷达，大气遥感后向散射

引言

大气气溶胶是一种重要的大气微量成分，不仅与云、降水形成等大气物理过程密切相关，而且对大气中的辐射传输产生重要的影响。近年来沙尘气溶胶的光学物理特性以及其对大气气候的影响已成为国内外大气气溶胶研究的热点。大气气溶胶的辐射特性和气候效应是继臭氧和温室气体之后又一个大气化学和全球气候变化的热点和难点问题。另外大气臭氧已经成为大气边界层的重要污染物之一。大气边界层臭氧作为一种二次污染物，其浓度过高会对人体健康和生态系统造成损害[1, 2]。

近年来激光雷达遥感技术不断成熟，人们已经将激光雷达技术应用到了对大气的测量中。欧洲气溶胶激光雷达研究网络（EARLINET）[3]是欧盟地面激光雷达站联合的组织，为了能够更好的对大气气溶胶的传输，分布以及气溶胶的宏观和微观性质进行测量研究。欧洲和美国自 90 年代初开始利用机载激光雷达进行一系列的大气探测，然而为了对全球大气进行研究，自 90 年代末至今，激光雷达已经应用到对地探测的卫星之上。1994 年 9 月航天飞机承载的三个波长（紫外、可见和红外）的激光雷达（LITE）[4]对地球部分地区大气成功的进行了测量，证明了星载激光雷达对云和气溶胶测量的可行性。2006 年美国和法国联合发射的 CALIPSO 卫星[5]，利用偏振激光雷达遥感的原理对大气进行测量，进一步研究气溶胶、云对大气的影响，并且在可见光通道利用了偏振的原理，从而获取大气气溶胶、云更加详细的信息。

基于 CALIPSO 卫星 2006-06~2009-02 的探测数据，本文主要研究北京地区卷云的消偏振特性和其季节分布情况，并简要的分析大气臭氧在整个对流层随季节的分布情况。最后给出源于撒哈拉地区的沙尘经过长距离传输后的消偏振特性。本文第一部分简要的描述 CALIPSO 卫星和意大利那波利（Napoli）站的激光雷达系统及其简要的工作原理。第二部分给出卷云、沙尘和臭氧的相关特性和季节分布情况，以及其与气象因素如温度的关系。最后的分析结论将在第三部分给出。

1 激光雷达系统简述

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星于 2006 年 4 月 28 日发射成功。CALIPSO 是基于 1994 年航天飞机上 LITE (Lidar In-space Technology Experiment) 探测经验的基础上研究并发射的。CALIPSO 上三个负载分别是：双波长偏振激光雷达（CALIOP）用于提高目前的气溶胶、云的测量能力；两个被动成像系统分别工作于红外和可见光波段。CALIPSO 负载用于研究影响大气辐射平衡的气溶胶、云的垂直分布情况以及其光学、物理特性。

双波长偏振激光雷达（CALIOP）由激光发射系统和接收系统组成如图 1 所示。激光发射系统包

括 Nd:YAG 激光器（工作波长为 1064nm 和 532nm），光束扩束镜等。接收系统包括牛顿望远镜，检测器（光子倍增管 PMT 和雪崩光电二极管 APD）、放大器等。其工作原理是：Nd:YAG 激光器向大气中发射波长为 532nm 的线偏振激光脉冲和 1064nm 的激光脉冲，激光脉冲被传输路径上的云或大气气溶胶所散射，后向散射光被接收望远镜接收。接收到的后向散射光经过干涉滤波片后分别进入红外通道（1074nm）和可见光通道（532nm）。在可见光通道，光束经过偏振分束镜后进入垂直和平行通道。利用可见光的平行和垂直通道可以获取大气气溶胶、云的消偏振特性。

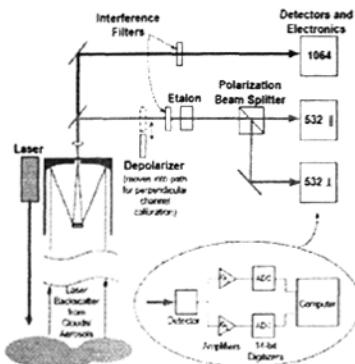


图 1 CALIOP 发射和接收系统

Fig. 1 CALIOP transmitter and receiver subsystems.

意大利那波利 (40.838° N, 14.183° E, 118m) 地面激光雷达站[6]是 EARLINET 诸多地面站中的一个。Nd:YAG 激光器发射波长为 1064nm, 532nm 和 355nm 的激光，但那波利站的工作波长在 532nm（可见光波段）和 355nm（紫外光波段）。接收系统除了能接收到紫外和可见光的弹性散射信号外，还可以接收到氮分子在 607nm（发射波长 532nm）和 387nm（发射波长 355nm）的拉曼（Raman）散射，以及接收到水分子在 407nm（发射波长 355nm）的拉曼散射信号。通过拉曼散射测量，可以直接获取大气气溶胶、云的光学参数：如后向散射系数、消光系数等。

2. 实验结果

CALIPSO 卫星的飞行速度为 7km/s，接收系统接收到的人气后向散射信号为单光子信号。为了提高信号的信噪比，在处理 CALIPSO Level 1 V2.01 数据时我们将平均 16s 的信号，即经过探测点前 8s 的信号和后 8s 的信号的平均[7]。那波利地面激光雷达站接收信号的时间分辨率为 1min，为了提高测量信号的信噪比我们将平均 10min 内测量的信号。

2.1 卷云

卷云会使地球表面的温度降低或者升高，因此卷云对地球大气气候变化以及辐射平衡有重要的影响[8]。图 2 表示了合肥地区 (31.90° N, 117.16° E)、北京地区 (39.93° N, 116.43° E) 和南京地区 (32.03° N, 118.83° E) 自 2006 年 6 月至 2009 年 2 月卷云消偏振特性、分布高度、以及对流层顶高度按月份分布的曲线。从图 2 的曲线可以看出：北京地区卷云的消偏振在 9 月份达到最大 (0.5) 1 月份消偏振最低 (0.15)；合肥地区卷云的消偏振特性在 5 月份时达到最大 (0.38) 而在 2 月和 6 月份时低至 0.20；南京地区卷云的消偏振值在 7、8、9 月份都大于 0.38，在 4 月份时其值小于 0.20。由此可以看出卷云的消偏振随着地理位置的不同而有所不同，但是由图 2 可以得出：不论在何地区，卷云的消偏振随着卷云的分布高度的不同而不同，即卷云的消偏振随着其分布高度的增加而相应的增加；卷云的分布高度受到对流层顶高度的调制，即卷云的分布高度随着对流层顶高度的增加而相应的增加。

为了更好的研究卷云消偏振随着其分布高度、对流层顶高度的变化而变化的特性。图 3 给出了北京地区卷云消偏振特性随着分布高度以及对流层顶高度变化的点分布图[8]，其中离散的点表示每次测量的卷云消偏振，红线表示线性拟合结果。从图 3 的点分布结果可以看出：卷云的消偏振随着高度的增加，温度的降低而增加。

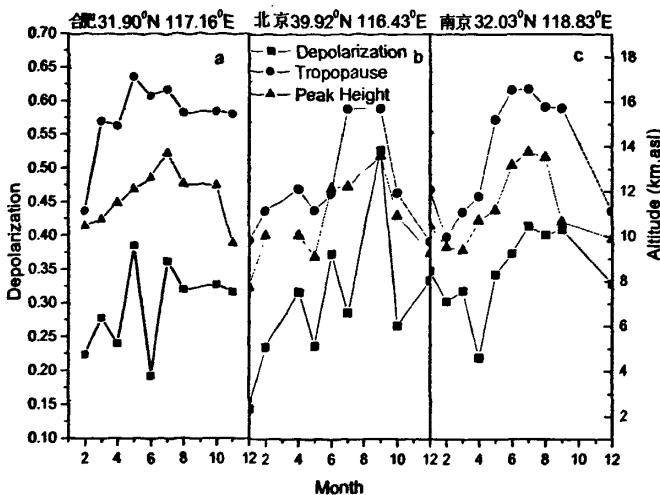


图2 合肥(a)、北京(b)和南京(c)地区的卷云消偏振特性、分布高度特性以及对流层高度的年分布图。

Fig. 2 Illustration of annual cycle of cirrus depolarization ratio, altitude of cirrus layer and tropopause over the region of Hefei, Beijing and Nanjing. Black squares stand for the depolarization ratio from the CALIPSO level 1 data. Red triangles present the cirrus layer altitude. The blue circles stand for the altitude of tropopause.

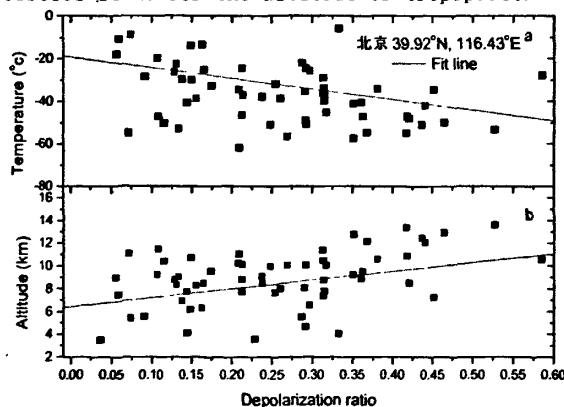


图3 北京地区的卷云消偏振特性与温度(a)和分布高度(b)关系的点分布图

Fig. 3 (a) Relation between depolarization ratio and temperature and (b) Relation between depolarization ratio and altitude. The black squares stand for the actual measurements from June 2006 to February 2009

2.2 撒哈拉沙尘暴

欧洲的南部和中部地区经常受到来自于撒哈拉 (10° N ~ 30° N, 10° W ~ 15° E) 沙尘暴的袭击[9, 10]。依赖于不同的天气情况和风向,这些沙尘可以穿过北非到达西班牙、意大利、希腊、法国和德国等地区和国家。

CALIPSO Total Attenuated Backscattering at 532nm

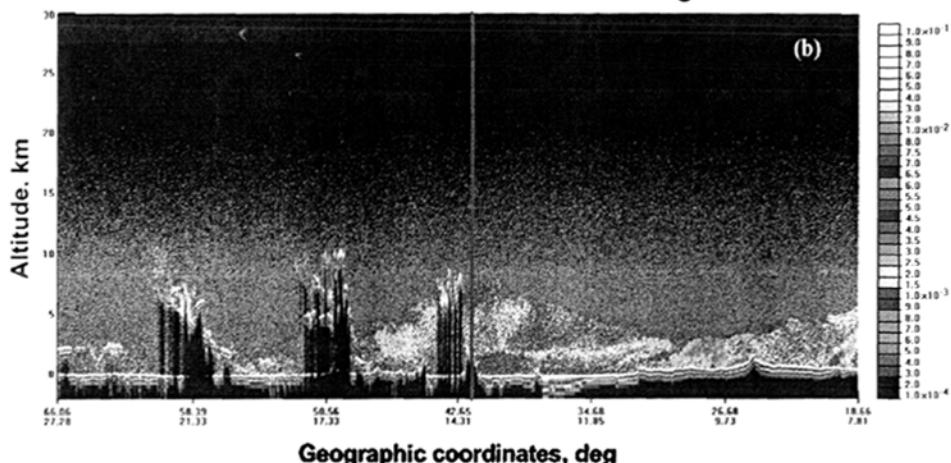


图4 CALIPSO于2006-08-20探测的532nm的大气后向衰减信号($\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$)，其中粉色线对应那波利的位置。横坐标表示纬度(上面)和经度。

Fig. 4 The CALIPSO 532 nm attenuated backscatter signal ($\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$) in which the pink line marks the overpass of CALIPSO, measured on 20 August 2006. The abscissas are latitudes (top) and longitudes in degrees.

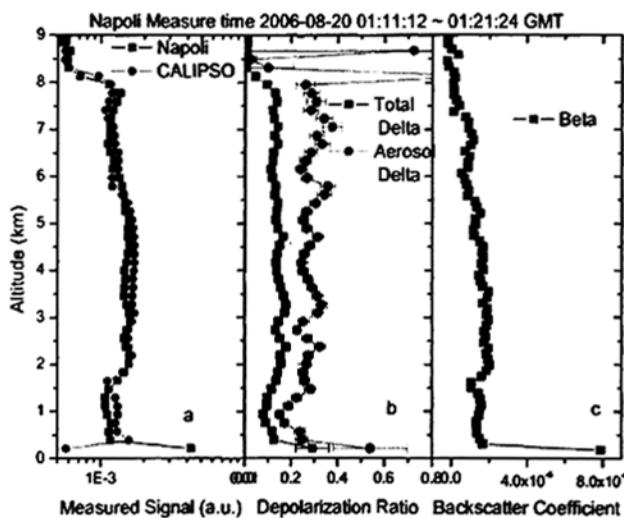


图5 (a) CALIPSO 和那波利探测的沙尘后向散射信号; (b) 总(沙尘加分子)消偏振和沙尘的消偏振参数; (c) 沙尘的后向散射系数

图4表示CALIPSO卫星于2006-08-20经过那波利前后的激光扫描图像。由图4可以清楚的看出沙尘暴的垂直和水平分布情况。由图可以看出沙尘在水平方向延伸可达几百公里，在垂直方向上从大气边界层可以延伸至5~8km。在那波利上空(粉色线所示位置)的沙尘暴从大气边界层一直延伸到8km的高度。为了进一步研究沙尘的光学特性，那波利探测数据和CALIPSO探测数据结合可以提取沙尘的消偏振特性如图5(b)所以。其中图5(a)表示CALIPSO和那波利激光雷达探测的沙尘的532nm的后向散射信号。图5(b)表示总(沙尘加分子)消偏振参数和沙尘的消偏振参数。由图5(b)可以看出沙尘的消偏振参数可以达0.3，然而总消偏振参数仅为0.15。图5(c)表示沙尘的后向散射系数。由图5可以看出沙尘的垂直分布从1km一直延伸到8km的高度，在这个高度区间内沙尘的光学特性如消偏振和后向散射系数等基本保持一致。

2.3 臭氧

臭氧在近地面的增加是当今环境科学的研究的前沿课题之一[11]。平流层大气臭氧层耗损和南极地区上空臭氧洞的出现，已经受到各国政府有关部门和科学家们的极大关注，这是因为人们担心大气臭氧层的耗损可能会给人类本身的生存环境带来严重的威胁。特别是在对流层已经发现大气臭氧在某些地区呈现出增长趋势。

本节根据2006~2009年间的探测数据对北京地区的臭氧进行分析。图6表示臭氧的季节分布和年分布统计曲线。由图6 (a) 可以看出：北京地区的臭氧在10km以上的高度其冬季和春季的密度比较大，在夏季和秋季时其密度较小；并且臭氧密度峰值在夏秋季节的高度比春冬季节的峰值高度要高。而在低空，尤其是大气边界层内其结果正好与高空的情况相反：大气边界层内的臭氧在夏季时密度比冬季时的密度要大。这可能是由于夏季的地面温度比冬季时的温度高，从而利于臭氧的产生。图6 (b) 表示臭氧的年变化曲线，由曲线可以看出：自2006~2008年大气边界层内的臭氧密度在逐年增加，并且增加速度变快；在10km以上的高度臭氧的密度也略有增加而且其峰值高度在逐年递减。这可能是由于人们向大气排放的废气例如汽车尾气NO_x 和碳氢化合物等增多从而导致臭氧含量增加。

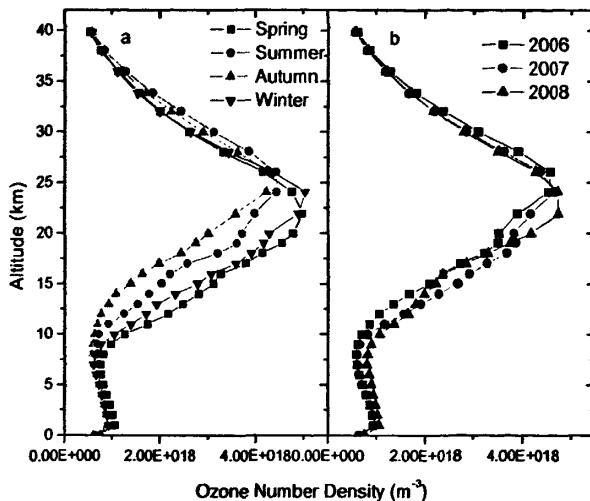


图6北京地区的臭氧季节分布(a)和年分布(b)曲线

Fig. 6 The seasonal (a) and annual (b) distribution of Ozone number density at Beijing

3. 结论

根据 CALIPSO 卫星 2006~2009 年的探测数据主要分析了大气中卷云、沙尘和臭氧的分布情况和光学物理特性。根据分析合肥、北京和南京地区的卷云数据可以得出：(1) 卷云的消偏振特性随着地理位置的不同而有所不同；(2) 卷云消偏振特性随着其分布高度的增加而相应的增加；(3) 卷云的分布高度收到对流层顶高度的调制，即卷云的分布高度随着对流层顶高度的增加而相应的增加；(4) 卷云的消偏振随着温度的降低、高度的增加而变大。利用意大利那波利和 CALIPSO 数据一起分析撒哈拉沙尘的特性可知：(1) 经过长距离传输后的沙尘的消偏振可达 0.3；(2) 沙尘的水平分布可达几百公里，垂直分布也可由大气边界层延伸至 8km 的高度。近三年来的臭氧数据显示：(1) 北京地区的臭氧在10km以上的高度其冬季和春季的密度比较大，在夏季和秋季时其密度较小；(2) 臭氧密度峰值在夏秋季节的高度比春冬季节的峰值高度要高；(3) 在低空，尤其是大气边界层内的臭氧在夏季时密度比冬季时的密度要大；(4) 自 2006~2008 年大气边界层内的臭氧密度在逐年增加，并且增加速度加快，在10km以上的高度臭氧的密度也略有增加且其峰值高度在逐年递减。以上的人气溶胶、云以及臭氧的分析可以为进一步的大气气候变化、化学污染等分析提供有利的科学基础。

参考文献：

- 魏鼎文, 秦芳, “中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化[J],” 科学通报 39 (16):

1509~1511. (1994).

2. Wang X K, Lu W Z, Wang W J , et al . A study of ozone variation trend within area of affecting human health in Hong Kong [J]. Chemosphere ,2003 ,52 :1405~14101.

3. V. Matthais, V. Freudenthaler, A. Amodeo, I. Balin, D. Balis, J. Bösenberg, A. Chaikovsky, G. Chourdakis, A. Comeron, A. Delaval, F. De Tomasi, R. Eixmann, A. Hågård, L. Komguem, S. Kreipl, R. Matthey, V. Rizi, J. A. Rodrigues, U. Wandinger, and X. Wang, "Aerosol Lidar Intercomparison in the Framework of the EARLINET Project. 1. Instruments," Appl. Opt. 43, 961-976 (2004).

4. V. Cuomo, P. Di Girolamo, F. Esposito, G. Pappalardo, C. Serio, N. Spinelli, M. Armenante, B. Bartoli, V. Berardi, R. Buzzese, C. Bellecci, G. E. Caputi, F. De Donato, P. Gaudio, M. Valentini, H. Melfi, and M. P. McCormick, "The LITE correlative measurements campaign in southern Italy: preliminary results," Applied Physics B: Lasers and Optics 64, 553-559 (1997).

5. D. Winker, M. Vaughan, and B. Hunt, "The CALIPSO mission and initial results from CALIOP," in *Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring VII*(SPIE, Goa, India, 2006), pp. 640902-640908.

6. P. Di Girolamo, P. F. Ambrico, A. Amodeo, A. Boselli, G. Pappalardo, and N. Spinelli, "Aerosol Observations by Lidar in the Nocturnal Boundary Layer," Appl. Opt. 38, 4585-4595 (1999).

7. X. Lu, Y. Jiang, X. Zhang, X. Lu, and Y. He, "An Algorithm to retrieve aerosol properties from analysis of multiple scattering influences on both Ground-Based and Space-Borne Lidar Returns," Opt. Express 17, 8719-8728 (2009).

8. X. Lu, Y. Jiang, X. Zhang, B. Zhou, and J. Ou, "Seasonal variability of cirrus depolarization properties derived from CALIPSO lidar measurements over Beijing, China," Chinese Optics Letters Vol. 8 No. 2 (2010).

9. I. Mattis, A. Ansmann, D. Müller, U. Wandinger, and D. Althausen, "Dual-wavelength Raman lidar observations of the extinction-to-backscatter ratio of Saharan dust," Geophys. Res. Lett. 29 (2002).

10. X. Lu, Y. Jiang, X. Zhang, X. Wang, and N. Spinelli, "Two-wavelength lidar inversion algorithm for determination of aerosol extinction-to-backscatter ratios and its application to CALIPSO lidar measurements," *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* submitted (2010).

11. 殷永泉, 李吕梅, 马桂霞, 崔兆杰, "城市臭氧浓度分布特征," 环境科学 Vol. 25 ,No. 6 (2004).