

文章编号 : 0253-2239(2001)08-1012-04

L625 激光雷达探测平流层气溶胶*

吴永华 胡欢陵 周 军 胡顺星 张 民

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 国家八六三计划大气光学重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 介绍了一台用于探测平流层气溶胶的米氏散射激光雷达及其数据处理方法, 其探测结果与美国 SAGE II 卫星的结果基本一致。初步分析了 1991 年~1998 年期间平流层气溶胶消光系数和积分体后向散射系数的变化特征。

关键词: 激光雷达; 平流层; 气溶胶

中图分类号: TN249; TN95 文献标识码: A

1 引 言

激光和光电子技术的发展促进了激光雷达的发展, 由于其具有较高的时空分辨率及较大的测量范围而被广泛用于大气探测领域^[1]。平流层气溶胶是影响地球大气系统辐射收支的重要的不确定因子之一, 并且它通过非均相化学反应影响了平流层臭氧浓度的分布^[2]。尤其是火山爆发向平流层注入的大量火山灰已明显影响了全球气候和环境的变化^[3]。国际上已建立了平流层变化观测网(NDSC), 在全球布网监测平流层中气溶胶和痕量成份的分布; 平流层过程及其气候效应组织(SPARC)也已加强了对气溶胶的观测; 而激光雷达已被认为是平流层气溶胶观测的最有效手段之一^[4]。本文介绍了我们自行研制的探测平流层气溶胶的 L625 激光雷达系统, 其观测结果与美国航空航天局(NASA)SAGE II 卫星的结果进行了对比, 二者呈现较好的一致性, 长期的平流层气溶胶观测资料表现了一定的季节变化。

2 L625 激光雷达系统

L625 米散射激光雷达系统主要由激光发射、回波信号接收和数据采集及控制三部分组成, 其结构框图如图 1 所示。Nd:YAG 激光器调 Q 单横模倍频输出光(波长 532 nm)作为探测激光, 其工作频率为 10 Hz, 单脉冲能量约为 70 mJ, 脉宽为 18 ns, 光

束发散角小于 1 mrad。激光束经导向镜垂直导向大气层, 并在发射光路近旁设置 CCD 以监视光束方向的调整。直径 62.5 cm 的卡塞格林型望远镜用以收集大气气溶胶和分子的后向散射光信号, 其接收视场角为 2 mrad; 后向散射的光信号由光电倍增管进行光电信号转换, 并经放大后由光子计数器检测, 最后传给计算机实时显示和贮存。

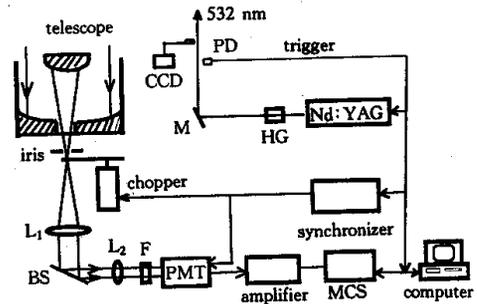


Fig. 1 Schematic diagram of L625 Mie scattering lidar. HG: harmonic generator; M: steering-mirror; PD: photodiode; BS: beam-splitter; L₁, L₂: lens; F: interference filter; MCS: multichannel scaler

为防止低层强回波给光电倍增管(PMT)带来的非线性效应及信号诱导噪声, 接收望远镜焦平面附近放置了机械斩光盘用以斩掉低层强回波; 机械斩光盘、高速电机及其电路控制部分组成机械光开关, 其转速为 400 周/秒, 整个开关响应过程对应的距离约为 5 km, 开门高度连续可调。选用了线性较好并带有门控电路的 EMI 9817B 型光电倍增管, 并配置了相应的制冷器, 用以降低它的热噪声和暗电流噪声; 门控电路为 EMI GB1B 型, 其最长开门时间为 1 ms, 它的抑制比为 1000:1。另外, 为了抑制天空背景噪声, 光电倍增管前放置了窄带干涉滤光

* 国家科委 863 高科技项目(激光技术领域)和国家自然科学基金(49775258)资助课题。

片,其中心波长为 532 nm,带宽为 1 nm,峰值透过率为 50%。基于视窗(Windows)界面的计算机软件可分别设置采样的大气分层厚度、最大高度和激光脉冲数,并实时显示回波信号随高度的分布曲线。整个系统可用计算机外触发激光器而实现自动工作,也可通过添加其它探测激光波长而探测平流层臭氧^[5]。

3 测量及数据处理方法

对于激光雷达探测平流层气溶胶而言,由于白天天空背景噪声较大及其回波信号较弱,因此我们只在合肥地区(31.9°N)晴朗无云的夜晚进行观测。Nd:YAG 激光器发射 10000~20000 个激光脉冲,这样累积多个激光脉冲回波有利于提高信噪比。回波信号采样的距离分辨率为 150 m,采样最大高度为 150 km。由于回波光子数曲线在 100 km~150 km 范围内比较平坦,已明显看不出信号的存在,并考虑到某一高度上的回波光子数具有一定的起伏性,故取该段高度范围内的平均回波作为背景噪声。数据处理过程为,首先对原始回波信号进行了 1 km 移动平滑平均,以降低大气自身起伏带来的随机噪声;然后计算背景并加以扣除;最后使用 Fernald 方法^[6]计算气溶胶的体后向散射系数和消光系数。Fernald 方法的详细描述参见文献[6],它是目前单波长米氏散射激光雷达较常使用的一种气溶胶数据处理方法。其主要特点是,把气溶胶和分子的消光和后向散射分开考虑,在假定气溶胶的消光后向散射比为常数,假设已知某一高度上气溶胶与分子的后向散射系数比情况下,可以求解气溶胶消光系数和后向散射系数随高度分布的廓线。计算中空气分子的后向散射系数及消光系数可由气象探空或大气模式给出,其消光后向散射比取为 $8\pi/3$;不同高度上的气溶胶消光后向散射比取为常数 15~50 之间^[7]。参考高度即清洁大气层的高度一般选在 30 km 左右,认为那里气溶胶的含量很少,气溶胶与分子的体后向散射系数之比取为 0.01^[8]。气溶胶积分体后向散射系数定义为

$$\delta_{\text{strat}} = \int_{h_1}^{h_2} \beta_a(z) dz,$$

这里 $\beta_a(z)$ 为气溶胶的体后向散射系数, h_1 和 h_2 为积分高度区间,这一公式表征了某高度范围内气溶胶粒子的后向光散射特性,若平流层气溶胶谱分布和折射率随高度不变,那么气溶胶积分体后向散

射系数 δ_{strat} 正比于平流层气溶胶的柱含量。

4 测量结果与讨论

4.1 与 SAGE II 卫星结果对比

SAGE II 是美国航空航天局研制的一个星载辐射计,它采用掩星法测量气溶胶消光系数的空间分布,其垂直距离分辨率为 1 km,大量的数据有效对比实验验证了其结果的可靠性^[9]。由于平流层相对比较稳定,并且 L625 激光雷达 532 nm 波长与 SAGE II 525 nm 通道的波长接近,故该激光雷达的观测结果与 SAGE II 卫星在合肥临近地区的结果具有可比性。

图 2 为 1996 年 10 月 4 日晚该激光雷达与 SAGE II 获得的气溶胶消光系数分布,图中短横线标出了 SAGE II 结果的误差范围。其中 SAGE II 测量地点为 29.2°N/115.6°E,测量时间为北京时间 17:52。可以看出,平流层 19 km~34 km 范围内激光雷达与 SAGE II 结果表现了很好的一致性;19 km 以上随高度升高气溶胶消光系数递减。激光雷达的结果表明,在 17 km~34 km 范围内气溶胶消光系数变化了近两个量级。19 km 以上激光雷达较 SAGE II 的结果偏小,这是由于气溶胶消光系数与波长成反比关系,故它们是合理的。同时,考虑到不同波长的气溶胶消光系数在转化时存在着一些不确定性参数^[10],故本文只进行了二者结果的直接比较。图 2 中气溶胶的消光系数在 18 km 左右达到最大值,这即是人们通常所说的气溶胶荣格(Junge)层,但荣格层处激光雷达的结果明显偏大,这可能是局地气溶胶层的分布不同引起的。

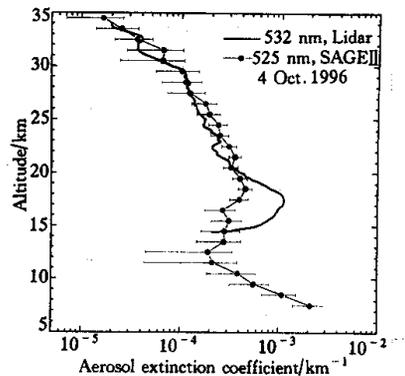


Fig. 2 Profiles of aerosol extinction coefficients by L625 lidar and SAGE II on 4 Oct. 1996

图 3 为 1997 年 11 月 1 日晚 L625 激光雷达与 SAGE II 获得气溶胶消光系数分布,短横线标出了

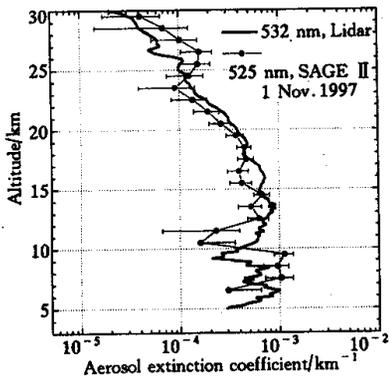


Fig. 3 Profiles of aerosol extinction coefficients obtained by L625 lidar and SAGE II on 1 Nov. 1997

SAGE II 结果的误差范围。其中, SAGE II 测量地点为 $30.3^{\circ}\text{N}/116.7^{\circ}\text{E}$, 测量时间为北京时间 17:17。可以看出, 在 12 km~30 km 范围内 L625 激光雷达与 SAGE II 得到的气溶胶消光系数反映了较为一致的分布结构, 尤其是在 14 km 及 26 km 左右的两个结构区。但由于二者测量的空间分辨率不同而存在着一些差别。在 10 km 以下, 激光雷达与 SAGE II 的结果大小几乎一致, 但反映了两个气溶胶层, 而 SAGE II 的结果反映了一个较厚的气溶胶层, 这可能与二者观测时间与地点的差异有关, 尤其是对流层中气溶胶的分布随时间和地点变化较大。总的来说, 它们的一致性表明了该激光雷达的观测结果较为可靠, 也反映了一般情况下气溶胶消光系数在平流层中的空间分布特点。

4.2 平流层气溶胶消光系数和积分体后向散射系数

1991 年 7 月至 1998 年 12 月期间, L625 激光雷达获得的气溶胶消光系数随高度-时间的分布如图 4 所示, 图中等值线上标出的数值为放大 10^4 倍后的气溶胶消光系数。可以明显看出, 合肥地区平流

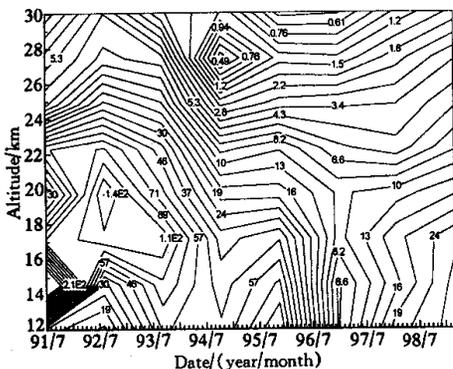


Fig. 4 Distribution of aerosol relative extinction coefficients ($\times 10^4$) with height and time by L625 lidar

层气溶胶消光系数在 1991 年至 1995 年期间较大, 它明显是受 1991 年 6 月爆发的菲律宾皮纳图博 (Pinatubo, $15.1^{\circ}\text{N}/120.4^{\circ}\text{E}$) 火山灰的影响, 在其爆发后的半个月该激光雷达就观测到火山灰已输送到合肥上空^[11]。图 4 还表明, 最初气溶胶消光系数峰值中心区位于 14 km 左右, 随后处在 17 km~22 km 高度区间, 这表明火山灰气溶胶先后分别从低层和高层入侵到合肥上空。1991 年 7 月至 1994 年 7 月整个平流层 (至 30 km) 范围内均受到皮纳图博火山灰的影响, 气溶胶消光系数普遍较大。随着火山灰的逐渐扩散和沉降, 1996 年以后时期合肥地区平流层气溶胶消光系数又接近背景值。图 5 给出了平流层气溶胶积分体后向散射系数的分布, 积分高度区间为对流层顶至 27 km, 它基本上代表了平流层气溶胶层的高度范围; 图中实心圆点代表了原始数据积分结果, 粗实线为相邻 7 点平滑平均后的结果; 图 5 也同时给出了合肥地区对流层顶的高度。由图 5 看出合肥地区平流层火山灰气溶胶积分后向散射系数的峰值较背景期增加了几十倍, 这表明火山灰严重扰动了平流层气溶胶的含量。其中, 在火山灰影响期间平流层气溶胶积分后向散射系数表现为冬季大和夏季小, 这种分布特点与北半球中纬度地区其它激光雷达的观测结果是一致的^[12,13]; 气溶胶积分后向散射系数的季节变化与平流层和对流层的上下交换有密切关系。同时, 图 5 表明平流层气溶胶积分后向散射系数与对流层顶高度基本上表现了负相关关系。

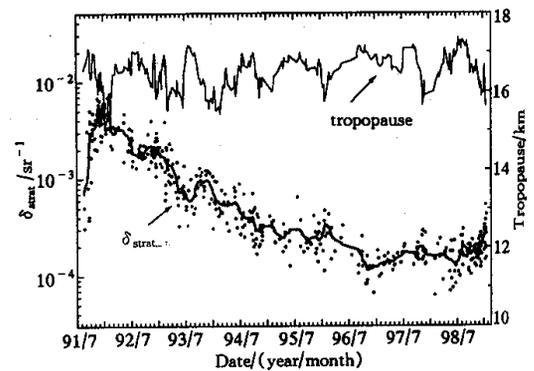


Fig. 5 Integrated backscatter coefficients δ_{strat} of stratosphere aerosol obtained by L625 lidar

小结 报道了一台用于探测平流层气溶胶的 L625 激光雷达系统, 给出了平流层气溶胶消光系数随高度的分布。通过与 SAGE II 卫星观测结果的对比, 表明了其结果的可靠性。

多年的观测资料分析表明,皮纳图博火山灰严重增加了合肥地区平流层气溶胶的含量,较背景期增加了近几十倍;同时,平流层气溶胶积分体后向散射系数表现了一定的季节变化特征。

金传佳、戚福弟、岳古明和陈毓红等同志参加了该激光雷达的建立和观测,NASA Langley 研究中心提供了 SAGE II 资料。作者表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Hinkley E D. Laser monitoring of the atmosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1976. 247~256
- [2] D'Almeida G A, Peter K. *Atmospheric Aerosol: Global Climatology and Radiative Characteristics*. Hampton: A. Deepak Publishing, 1991. 127~146
- [3] McCormick M P, Larry W. Thomason and Charles R. Trepte. Atmospheric effects of the Mt. Pinatubo eruption. *Nature*, 1995, **373**(2): 399~404
- [4] McDermid I S. NDSC and the JPL stratospheric lidar. *Rev. Laser Eng.*, 1995, **23**(2): 97~103
- [5] 胡欢陵,王志恩,吴永华等. 紫外差分吸收激光雷达探测平流层臭氧. *大气科学*, 1998, **22**(5): 701~708
- [6] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation:

- some comments. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- [7] Takamura T, Yasuhiro Sasano. Ratio of aerosol backscatter to extinction coefficients as determined from angular scattering measurements for use in atmospheric lidar applications. *Optical and Quantum Electronics*, 1987, **19**: 293~302
- [8] Sasano Y, Edward V B. Light scattering characteristic of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(9): 1670~1679
- [9] Ackerman M, Brogniez C, Diallo B S. European validation of SAGE II aerosol profiles. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(6): 8399~8411
- [10] Thomason L W, Osborn M T. Lidar conversion parameters derived from SAGE II extinction measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**(16): 1655~1658
- [11] 周 军,胡欢陵,龚知本. Mt. Pinatubo 火山云激光雷达探测. *科学通报*, 1993, **38**(9): 811~813
- [12] Jager H, Uchino O, Nagai T *et al.*. Ground-based remote sensing of the decay of the pinatubo eruption cloud at three northern hemisphere sites. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(5): 607~610
- [13] Uchino O. Global lidar monitoring of Pinatubo volcanic aerosols and their effects on climate. *Rev. Laser Engng.*, 1995, **23**(2): 161~165

Measurements of Stratosphere Aerosol with L625 Lidar

Wu Yonghua Hu Huanling Zhou Jun Hu Shunxing Zhang Min
(*Atmospheric Optics Lab, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)
(Received 21 March 2000; revised 21 July 2000)

Abstract: L625 Mie lidar and data processing for measuring stratospheric aerosol are described. The results show the good agreement with those of American NASA/SAGE II satellite observation. Long-term variations of aerosol extinction coefficients and integrated backscatter coefficients in the stratosphere during the years of 1991~1998 are preliminarily analyzed.

Key words: lidar; stratosphere; aerosol