

Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展

夏俊荣, 张 镭*

(兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000;
兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 简要论述了激光雷达探测大气的优点, 以及求解 Mie 散射激光雷达方程的理论方法, 并阐述了国内外近 20 a 来 Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的主要成果, 及其存在的问题。

关键词: 激光雷达; 大气探测; Collis 斜率法; Fernald 方法; Klett 方法

中图分类号: P412.25

文献标识码: A

引 言

激光雷达 (lidar) 是一种主动式的现代光学遥感设备, 是传统的无线电或微波雷达 (radar) 向光学频段的延伸。激光的许多特殊性能几乎都可以在大气探测中得到充分的利用。例如, 它的高亮度、高准直度和短脉冲特性, 使激光雷达具有很高的探测灵敏度和时空分辨率; 激光的高单色性和激光波长的可调谐能力, 使激光雷达能够探测各种大气组分。特别是激光波长很短的特点, 使激光束可以与大气中的微小粒子乃至原子、分子直接相互作用, 不存在探测盲区^[1]。

早在 20 世纪 60 年代初, 国外就开展了激光雷达探测大气的工作, 目前已建立了很多激光雷达观测站, 用于探测研究中低层大气 (80 km 以下) 的温度、密度、湿度、风场、臭氧密度, 气溶胶的光学特性, 污染物浓度, 以及高层大气 (80 ~ 110 km) 中金属原子的密度, 另外还可以探测云底高度与云的厚度, 在大气环境、大气化学、大气辐射以及天气气候等领域发挥了重大的作用。

激光雷达虽然有着如上所述的众多优越能力, 但由于其费用较高, 限制了其广泛应用。目前国内仅有北京、香港、合肥、武汉和兰州等地的几家科研单位和高校利用激光雷达进行大气探测试验, 考察大气中气溶胶的光学特性、臭氧密度廓线、钠原子密

度廓线、温度廓线、风廓线、水汽含量、沙尘暴与能见度等。

根据激光雷达工作原理的不同, 可以把当前探测大气的激光雷达分为 Mie 散射激光雷达、Rayleigh 散射激光雷达、Raman 散射激光雷达、差分吸收激光雷达和共振荧光激光雷达等若干种类。其中 Mie 散射激光雷达主要用于探测大气气溶胶的辐射特性, Rayleigh 散射激光雷达主要用于探测 30 ~ 70 km 高空的大气密度和温度分布, Raman 散射激光雷达一般则用于对大气温度、湿度以及一些污染物的测量, 差分吸收激光雷达一般用于测量大气中臭氧以及其它痕量气体, 其测量精度比 Raman 散射激光雷达高出约 3 个量级, 共振荧光激光雷达一般用于对 80 ~ 110 km 高空的一些金属原子的测量, 比如钠原子。

激光雷达接收到的是回波能量, 一般借助于求解激光雷达方程来得到我们需要的参量。对 Mie 散射激光雷达而言, 常用的求解方法有 Collis 斜率法、Fernald 方法以及 Klett 方法。本文对这 3 种方法作了介绍, 并阐述了国内外近 20 a 来 Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的主要成果, 及其存在的问题。

1 Mie 散射激光雷达方程及其求解方法

Mie 散射激光雷达方程如下:

收稿日期: 2006-04-04 改回日期: 2006-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40275039) 和国家高校优秀青年教师教学科研奖励计划资助

作者简介: 夏俊荣 (1980-) 男, 江苏兴化人, 硕士研究生, zhanglei@lzu.edu.cn

* 通讯联系人: Email: zhang lei @ lzu. edu. cn

$$P(Z) = ECZ^{-2}\beta(Z)\exp\left[-2\int_0^Z\alpha(Z')dZ'\right] \quad (1)$$

其中 $P(Z)$ 为激光雷达接收到了高度 Z 处的大气后向散射回波信号的能量, E 为激光雷达的发射能量, C 为雷达常数, $\beta(Z)$ 为大气后向散射系数, $\alpha(Z)$ 为大气消光系数。这里只有一个方程, 但却有 2 个未知量 $\beta(Z)$ 与 $\alpha(Z)$, 这是求解 Mie 散射激光雷达方程的难点。

(1) Collis 给出了求解该激光雷达方程的简单方法, 称为 Collis 斜率法^[2-4]。其主要思想为:

令

$$S(Z) = \ln[Z^2P(Z)] \quad (2)$$

这样激光雷达方程(1)可变为下面的形式:

$$S - S_0 = \ln\frac{\beta}{\beta_0} - 2\int_{Z_0}^Z\sigma dZ' \quad (3)$$

这里 $S = S(Z)$, $S_0 = S(Z_0)$, $\beta_0 = \beta(Z_0)$, Z_0 为参考高度。上式的微分形式为:

$$\frac{dS}{dZ} = \frac{1}{\beta}\frac{d\beta}{dZ} - 2\sigma \quad (4)$$

在大气均匀分布的情况下 $d\beta/dZ = 0$, 这样就可以得到大气消光系数:

$$\sigma = -\frac{1}{2}\frac{dS}{dZ} \quad (5)$$

Collis 方法很简单, 但也有着严重的缺陷, 该方法应用的前提条件是大气均匀分布, 但是在实际大气中, 气溶胶与云、雾等分布经常出现较大的变化, 大气并不是均匀分布的, 这样就极大地限制了斜率法的应用。

(2) Klett 在 Collis 的斜率法的工作基础之上更

$$\sigma_1(z) = -\frac{S_1}{S_2}\sigma_2(z) + \frac{X(z) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)\int_z^{z_c}\sigma_2(z')dz'\right]}{\frac{X(z_c)}{\sigma_1(z_c) + \frac{S_1}{S_2}\sigma_2(z_c)} + 2\int_z^{z_c}X(z')\exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)\int_z^{z_c}\sigma_2(z'')dz''\right]dz'} \quad (9)$$

而 Z_c 以上各高度的气溶胶粒子消光系数(前向积分)为:

$$\sigma_1(z) = -\frac{S_1}{S_2}\sigma_2(z) + \frac{X(z) \cdot \exp\left[-2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)\int_z^{z_c}\sigma_2(z')dz'\right]}{\frac{X(z_c)}{\sigma_1(z_c) + \frac{S_1}{S_2}\sigma_2(z_c)} - 2\int_z^{z_c}X(z')\exp\left[-2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right)\int_z^{z_c}\sigma_2(z'')dz''\right]dz'} \quad (10)$$

这里下标 1、2 分别表示气溶胶与空气分子, $S = \sigma/\beta$, $X(z) = P(z)Z^2$, S_1 根据不同情况而事先给定, $S_2 = 8\pi/3$, $\sigma_2(z)$ 可以根据 Rayleigh 散射理论由美

进一步提出了 Klett 方法^[5], 该方法有效克服了均匀大气的限制, 从而得到了广泛的应用。Klett 首先假设了一个关系式:

$$\beta = C_0\sigma^k \quad (6)$$

式中 C_0 为常数, k 取决于激光雷达的波长与气溶胶的性质, k 的取值范围一般为 0.67 ~ 1。如果再假定 k 为常数, 则可以得到 $Z \leq Z_m$ (Z_m 为参考高度)处的大气消光系数:

$$\alpha(Z) = \frac{\exp[(S - S_m)/k]}{\{\sigma_m^{-1} + \frac{2}{k}\int_Z^{Z_m}\exp[(S - S_m)/k]dZ'\}} \quad (7)$$

$S_m = S(Z_m)$, $\sigma_m = \alpha(Z_m)$ 。这里的 σ_m 可以用 Collis 斜率法来确定, 即

$$\sigma_m \approx \frac{1(S_0 - S_m)}{2(Z_m - Z_0)} \quad (8)$$

这样就可以得到参考高度 Z_m 以下的大气消光系数廓线。该方法几经研究改进^[6-8]以后, 成为广泛应用的比较成功的算法。

(3) 第 3 种求解方法是 Fernald 方法^[9], 该方法由 Fernald 提出, 是国内相关学者普遍采用的算法。Fernald 将大气看成 2 部分: 空气分子与气溶胶, 认为大气消光系数(或后向散射系数)是空气分子的消光系数(或后向散射系数)与气溶胶消光系数(或后向散射系数)的和, 在此基础上给出了 Mie 散射激光雷达方程的解如下:

如果事先知道高度 Z_c 处气溶胶粒子和空气分子消光系数, 则 Z_c 以下各高度上的气溶胶粒子消光系数(后向积分)为:

国标准大气模式提供的空气分子密度的垂直廓线计算得到, 也可以由探空资料计算获得, 或者也可以引用 LOWTRAN7 的结果。 Z_c 为标定高度, 它是通过选

取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度来确定。对于 532 nm 波长的激光雷达 $\sigma_2(z_c)$ 由设定的气溶胶散射比 $1 + \beta_1(z_c)/\beta_2(z_c) = 1.01$ 来确定 (有时设定为 1.02 或 1.05)。

应用 Fernald 方法来求解激光雷达方程时,气溶胶消光后向散射比 S_1 是重要的误差产生源。 S_1 依赖于气溶胶粒子的尺度谱分布与折射指数,其变化范围很广,很难精确确定其垂直分布廓线。有很多学者在确定 S_1 的领域做了不少研究工作,如 Horst Jäger 与 David Hofmann 利用探空气球得到的数据拟合出中纬度地区火山爆发期的平流层气溶胶的尺度谱,进而计算得到中纬度地区火山爆发期的平流层气溶胶消光后向散射比 $S_1^{[10]}$;日本筑波大学的 Yasuhiro Sasano 等人在该领域作出了非常出色的工作,他们利用激光雷达、太阳光度计以及光学粒子计数器 (optical particle counter) 的探测数据计算出了中纬度地区的背景期对流层气溶胶消光后向散射比 S_1 , 得出其值在 20 ~ 70 之间,并分析了由 S_1 的固定取值所带来的误差^[11-19]。正是由于他们的出色工作,使得 Fernald 方法成为普遍采用的算法^[20-31]。

2 Mie 散射激光雷达的应用

Mie 散射的特点是散射粒子的尺寸与入射激光波长相近或比入射激光波长更大,其散射光波长和入射光相同,散射过程中没有光能量的交换,是弹性散射。相对其他的光散射机制而言,Mie 散射的散射截面最高,因此 Mie 散射激光雷达的回波信号通常较大,从而 Mie 散射激光雷达在技术上相对简单一些。Mie 散射激光雷达一般用于探测 30 km 以下低空大气中的尘埃和云雾。

国外在利用 Mie 散射激光雷达研究云的光学性质、云高以及云与气溶胶的相互影响等方面做得比较深入^[32-38],另外还有学者将 Mie 散射激光雷达探测与大涡模拟 (large-eddy simulation) 作了对比^[39-41],将 Mie 散射激光雷达用于监测气溶胶^[42-45],并将测得的一些大气参数作为辐射传输模式的输入^[46-48]。Charlson 等还将该型激光雷达用于全球气候变化的研究^[49],研究认为人为气溶胶的气候强迫效应是导致全球气候变化的主要原因。

这里值得一提的是美国 Baltimore 的 Johns Hopkins University 激光雷达系统,该激光雷达可发射 1 064 nm、532 nm 与 355 nm 3 个波段的激光脉冲,空间分辨率达 1.5 m,整体性能相当先进。该激光雷

达在研究大气边界层动力、大气气溶胶 (包括花粉与城市空气污染物) 领域发挥了重要的作用^[50-51],自投入运行以来已应用于多个观测试验 (a) 1999 年 5 月的 Clear Lake Experiment,观测数据用于 Clear Lake 上空风场的确定 (b) 2001 ~ 2002 年在 Baltimore 的 3 个测点进行的 Baltimore PM Supersite,雷达测得的垂直向资料有效弥补了其他观测仪器的不足 (其他观测仪器只能观测地面要素) (c) 2001 年 8 月在 Marshall 进行的 Marshall 2001 边界层试验,观测边界层高度 (d) 2001 年在 Baltimore 进行的有害物质研究试验,监测 Baltimore 地区烟囱排放的烟羽 (e) 2002 年在东海岸进行的 Biocomplexity project,雷达用于探测大气光学特性,研究千米尺度上花粉的传输。

中科院安徽光机所也研制出了多种 Mie 散射激光雷达并用于实测^[20-26],包括 AML-1 车载测污激光雷达、L625 激光雷达、L300 激光雷达、发射波长 1 064 nm 与 532 nm 的双波长 Mie 散射激光雷达以及体积较小的便携式激光雷达。其中 L625 激光雷达 (接收望远镜的直径为 625 mm) 自 1991 年运行以来,积累了数百个夜间 532 nm 波长平流层气溶胶消光特性的资料,包括菲律宾 Mt. Pinatubo 火山云从爆发、增长、衰变直至消亡全部过程的时空演变资料。图 1 为用 L625 激光雷达在合肥探测到的 Mt. Pinatubo 火山云初期阶段的气溶胶散射比垂直廓线,从图中可清楚地看出 Mt. Pinatubo 火山在 1991 年 6 月 15 日爆发半个月后,其火山云已从平流层底部输送到合肥上空。L300 激光雷达 (接收望远镜的直径为 300 mm) 自运行以来,积累了丰富的不同大

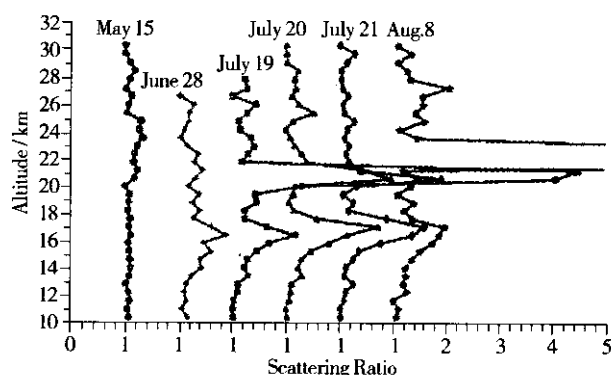


图 1 1991 年 Mt. Pinatubo 火山云初期阶段合肥上空的散射比垂直廓线 (引自文献 [24])

Fig. 1 Selected profiles of the scattering ratio at 532 nm over Hefei in 1991

气条件下平流层低层和对流层大气水平能见度、532 nm 波长大气气溶胶水平消光系数和消光系数垂直分布的探测资料。

石广玉等^[27]在青藏高原用日本名古屋大学提供的激光雷达观测拉萨上空的气溶胶,该激光雷达可发射 532 nm 与 1 064 nm 2 个波段的激光,可以探测气溶胶散射比、退偏振系数和 Angstrom 指数。观测发现在拉萨上空 20 ~ 30 km 的平流层存在的颗粒物,其浓度、粒径和分布呈现出较大的不均匀性。比较该激光雷达在拉萨与日本名古屋两地上空观测到的资料发现拉萨上空混合层气溶胶浓度较大且混合层更厚,混合层以上气溶胶的垂直分布特征差异也很明显。以往的一些激光雷达探测结果表明,沙尘暴粒子远距离输送带的高度在 6.5 km 以下^[52-53],但邱金桓于 2000 年在北京用多波长激光雷达探测到北京上空 4 ~ 10 km 高度范围内,存在厚度约为 6 km 的气溶胶粒子层,据估计是远距离输送来的沙尘气溶胶,这说明沙尘气溶胶粒子有可能在更高的高度远距离输送^[28]。兰州大学也于 2005 年引进了一台法国 Cimel 公司生产的 Mie 散射激光雷达,并已投入运行,获得初步的气溶胶分析结果^[54]。

Mie 散射激光雷达非常适合于 30 km 以下大气气溶胶及云雾探测。目前探测该层大气的各种手段都有其不足之处,如卫星遥感的精度太粗糙,无线电探空仪又很难做到连续观测,而高分辨率、高精度与可连续观测正是激光雷达的优势所在。

3 总结与讨论

相比卫星与无线电探空仪,探测大气的激光雷达有着分辨率高、可连续观测等独特的优越性,其问世后就受到了广泛关注,世界各国相继开展了大量的相关研究。但由于激光雷达技术复杂、维护困难、价格较高,激光雷达站点稀疏,而且分布不均,到目前为止很多工作仍停留在研究试验阶段。20 世纪 90 年代初出现了价格相对较低的微脉冲激光雷达,随后美国 NASA 资助建立了一个由 20 多台微脉冲激光雷达(MPL)组成的全球微脉冲激光雷达网,用于监测气溶胶和云的信息^[55]。目前国内已经有北京、香港、合肥、武汉和兰州等地的多家科研单位和高校利用各自研制或定制的激光雷达进行大气气溶胶探测试验,开展了一些研究工作,但还不能形成系统的观测网络,与国外相比还有较大的差距。随着低价格微脉冲激光雷达的进一步推广,以及近年来

中国气象局等部门从国外引进激光雷达,用于气溶胶探测,这有助于建立一个全国性的激光雷达探测气溶胶的网络,必将大大推动我国中低层气溶胶研究,缩小与国外的差距。

参考文献:

- [1] 阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 135 - 204.
- [2] Collis R T H. Lidar: a new atmosphere probe[J]. Q J R Meteorol Soc, 1966(92): 220 - 230.
- [3] Collis R T H, Uthe E E. Mie scatter techniques for air pollution measurement with lasers[J]. Opt Electron, 1972(4): 87 - 99.
- [4] Collis R T H, Russell P B. Lidar Measurements of Particle and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption[A]. Hinkley. Laser Monitoring of the Atmosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1976. 71 - 152.
- [5] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Appl Opt, 1981(20): 211 - 220.
- [6] Klett J D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios[J]. Appl Opt, 1985(24): 1638 - 1643.
- [7] Klett J D. Extinction boundary value algorithms for lidar inversion[J]. Appl Opt, 1986(25): 2462 - 2464.
- [8] Bissonnette L R. Sensitivity analysis of lidar inversion algorithms[J]. Appl Opt, 1986(25): 2122 - 2125.
- [9] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Appl Opt, 1984(23): 652 - 653.
- [10] Horst Jager, Hofmann D. Midlatitude lidar backscatter to mass, area, and extinction conversion model based on in situ aerosol measurements from 1980 to 1987[J]. Appl Opt, 1991(30): 127 - 138.
- [11] Takamura T, Sasano Y. Aerosol optical properties inferred from simultaneous lidar, aerosol-counter, and sunphotometer measurement[J]. J Meteorol Soc Jpn, 1990(68): 729 - 739.
- [12] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. Appl Opt, 1996(35): 4941 - 4952.
- [13] Shimizu H, Sasano Y, Nakane H, et al. Large scale laser radar for measuring aerosol distribution over a wide area[J]. Appl Opt, 1985(24): 617 - 626.
- [14] Qing P, Nakane H, Sasano Y, et al. Numerical simulation of the retrieval of aerosol size distribution from multiwavelength laser radar measurements[J]. Appl Opt, 1989(28): 5259 - 5265.
- [15] Sasano Y, Nakane H. Significance of the extinction/backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation[J]. Appl Opt, 1984(23): 11 - 13.
- [16] Sasano Y, Browell E, Ismail S. Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution[J]. Appl Opt, 1985(24): 3929 - 3932.
- [17] Sasano Y, Nakane H. Quantitative analysis of RHI lidar data by an iterative adjustment of the boundary condition term in the lidar solution[J]. Appl Opt, 1987(26): 615 - 616.
- [18] Takamura T, Sasano Y. Ratio of aerosol backscatter to extinction coefficients as determined from angular scattering measurements for use in atmospheric lidar applications[J]. Opt Quantum Electron,

- 1987(19) 293 - 302.
- [19] Takamura T, Sasano Y, Hayasaka T. Tropospheric aerosol optical properties derived from lidar, sun photometer, and optical particle counter measurements[J]. Appl Opt, 1994(33) :7132 - 7140.
- [20] 张改霞, 张寅超, 胡顺星, 等. AML - 1 车载测污激光雷达探测大气边界层气溶胶[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(3) :286 - 290.
- [21] 张改霞, 张寅超, 胡顺星, 等. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程测量[J]. 光学学报, 2004, 24(8) :1015 - 1019.
- [22] 杨陆军, 张寅超, 刘小勤, 等. 车载测污激光雷达测量大气气溶胶光学特性[J]. 量子电子学报, 2004, 21(1) :88 - 91.
- [23] 吴永华, 胡欢陵, 周军, 等. L625 激光雷达探测平流层气溶胶[J]. 光学学报, 2001, 21(8) :1012 - 1015.
- [24] 周军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2) :140 - 148.
- [25] 周军, 岳古明, 金传佳, 等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. 光学学报, 2000, 20(10) :1412 - 1417.
- [26] 钟志庆, 周军, 戚福第, 等. 探测大气气溶胶消光系数的便携式米氏散射激光雷达[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(12) :1145 - 1147.
- [27] 白宇波, 石广玉, 田村耕一, 等. 拉萨上空大气气溶胶光学特性的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2000, 24(4) :559 - 567.
- [28] 邱金桓, 郝斯平, 黄其荣, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003, 27(1) :1 - 7.
- [29] 胡欢陵, 吴永华, 谢晨波, 等. 北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1) :59 - 66, 73.
- [30] 余长明, 易帆. 武汉上空平流层气溶胶的激光雷达探测结果的初步分析[J]. 空间科学学报, 2004, 24(4) :261 - 268.
- [31] Iwasaka Y, Shi G Y, Kim Y S, et al. Pool of dust particles over the Asian Continent: balloon - borne optical particle counter and ground - based lidar measurements at Dunhuang, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2004(92) :5 - 24.
- [32] Spinhirne J D, Hart W D. Cirrus structure and radiative parameters from airborne lidar and spectral radiometer observations: The 28 October 1986 FIRE study[J]. Monthly Weather Review, 1990(118) :2329 - 2343.
- [33] Sassen K, Cho BS. Subvisual - thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological research[J]. J Appl Meteorol, 1992(31) :1275 - 1285.
- [34] Piironen A K, Eloranta E W. Convective boundary layer mean depths and cloud geometrical properties obtained from volume imaging lidar data[J]. J Geophys Res, 1995(100) :25569 - 25576.
- [35] Young S A. Analysis of lidar backscatter profiles in optically thin cloud[J]. Appl Opt, 1995(34) :7019 - 7031.
- [36] Gobbi G P, Donfrancesco G D, Adriani A. Physical properties of stratospheric clouds during the Antarctic winter of 1995[J]. J Geophys Res, 1998(103) :10859 - 10873.
- [37] Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. Reduction of tropical cloudiness by soot[J]. Science, 2000(288) :1042 - 1046.
- [38] Pelon J, Flamant C, Trouillet V, et al. Optical and microphysical parameters of dense stratocumulus clouds during mission 206 of EUCREX94 as retrieved from measurements made with the airborne lidar LEANDRE I[J]. J Atmos Res, 2000(55) :47 - 64.
- [39] Avissar R, Eloranta E W, Gurer K. An evaluation of the large - eddy simulation option of the regional atmospheric modeling system in simulation a convective boundary layer: A FIRE case study[J]. J Atmos Sci, 1998(55) :1109 - 1130.
- [40] Sullivan P P, Moeng C H, Stevens B, et al. Structure of entrainment zone capping the convective atmospheric boundary layer[J]. J Atmos Sci, 1998(55) :3042 - 3064.
- [41] Stevens B, Lenschow D H. Observations, experiments, and large eddy simulations[J]. Bull Am Meteorol Soc, 2001(82) :283 - 294.
- [42] Asimakopoulos D N. Application of sodar and lidar techniques in air pollution monitoring - A report on the Eurasp - 90 International meeting[J]. Atmos Environ, 1991(25) :2057 - 2060.
- [43] Hoff R M, Guise - Bagley L, Staebler R M, et al. Lidar, Nephelometer, and in Situ Aerosol Experiments in Southern Ontario[J]. J Geophys Res, 1996(101) :19199 - 19209.
- [44] Pinandito M, Rosananto I, Hidayat I, et al. Lidar network system for monitoring the atmospheric environment in Jakarta city[J]. Opt Rev, 1998(5) :252 - 256.
- [45] Carmuth W, Trickl T. Transport studies with the IFU three - wavelength aerosol lidar during the VOTALP Mesocyclone experiment[J]. Atmos Environ, 2000(34) :1425 - 1434.
- [46] Papayannis A, Balis D, Bais A, et al. Role of urban and suburban aerosols on solar UV radiation over Athens, Greece[J]. Atmos Environ, 1998(32) :2193 - 2201.
- [47] Satheesh S K, Ramanathan V, Xu L J, et al. A model for the natural and anthropogenic aerosols over the tropical Indian Ocean derived from Indian Ocean Experiment data[J]. J Atmos Res, 1999(104) :27421 - 27440.
- [48] Minomura M, Ru J, Kuze H, et al. Atmospheric correction of satellite data using multi - wavelength lidar data with MODTRAN3 code[J]. Adv Space Res, 2000(25) :1033 - 1036.
- [49] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. Science, 1992(255) :423 - 430.
- [50] Pahlow M. Atmospheric boundary layer dynamics and inversion technologies to obtain extinction coefficient profiles in the atmosphere from elastic lidar[D]. Johns Hopkins University, a dissertation with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2002.
- [51] Pahlow M, Kleissl J, Parlange M, et al. Atmospheric boundary - layer structure observed during a haze event due to forest - fire smoke[J]. Boundary - Layer Meteorology, 2005(114) :53 - 70.
- [52] 邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感与分析[J]. 大气科学, 1994(18) :1 - 10.
- [53] Iwasaka Y. The transport and special scale of Asian dust - storm clouds: a case study of the dust - storm event of April 1979[J]. Tellus, 1983(36) :189 - 196.
- [54] 夏俊荣. 利用激光雷达探测兰州大气气溶胶辐射特性[D]. 兰州大学, 2006.
- [55] 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染[J]. 应用气象学报, 2004(15) :641 - 650.

Review of Researches on Rainfall Enhancement in China

ZHANG Liang^{1 2}, WANG Shi - gong^{1 2}, SHANG Ke - zheng^{1 2}, YANG De - bao^{1 2}

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China ;

2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract : Under the background of global warming, the water resources shortage has become more and more prominent, and how to develop water resource in the atmosphere has been a focus for many people. The history of weather modification was reviewed and its present development home and abroad was summarized in this paper. The cloud physics characteristics of different areas was summed up, including the shape of cloud, the characteristics of cumulus, liquid water content, ice crystal concentration, etc., and based on it, the potential of rainfall enhancement in Northwest China was analyzed. In the end, the means of artificial rain making and its effect evaluation was introduced also.

Key words rainfall enhancement ; cloud physical characteristic ; effect evaluation

(上接第 72 页)

Advances in Detecting Aerosols with Mie Lidar

XIA Jun - rong ZHANG Lei

(College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University ; Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract : The advantages of lidar on detecting aerosols and the methods for solution to Mie lidar equation were summarily introduced in this paper. The major studies and the remaining problems on detecting aerosols with Mie lidar in recent two decades were also discussed.

Key words lidar ; detecting aerosols ; Collis slope method ; Fernald method ; Klett method

