

微脉冲激光雷达和毫米波雷达联合 探测卷云微物理特性

王 敏 卜令兵 高爱臻 袁 静 黄兴友 夏俊荣

(南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要 卷云具有辐射强迫作用,而卷云的微物理特性是影响辐射强迫的主要参数。对基于微脉冲激光雷达和毫米波雷达联合反演卷云微物理特性的算法进行了研究。该算法首先利用微脉冲激光雷达探测到的卷云回波信号反演出消光系数,然后用该消光系数和毫米波雷达测得的卷云回波信号强度值共同反演出卷云的冰水含量(IWC)和粒子有效尺寸(GES)。使用微脉冲激光雷达数据和毫米波雷达数据对发生在寿县的一次卷云过程进行分析,得出卷云冰水含量分布在 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ g/m}^3$,冰晶粒子有效尺寸分布在 $1 \sim 200 \mu\text{m}$,与经验值相符,其变化也符合卷云的演变规律,说明了该方法的有效性。

关键词 大气光学;微脉冲激光雷达;毫米波雷达;卷云;微物理特性

中图分类号 P412.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.070102

Microphysical Properties Observation of Cirrus Based on Micro-Pulse Lidar and Millimeter Wave Radar

Wang Min Bu Lingbing Gao Aizhen Yuan Jing Huang Xingyou Xia Junrong

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract Cirrus has the effect of radiative forcing which is influenced by the microphysical properties of cirrus. An algorithm for retrieving the microphysical properties of cirrus based on micro-pulse lidar and millimeter wave radar is presented. In the algorithm, lidar extinction coefficient retrieved from backscatter signal intensity and water equivalent radar reflectivity factor are combined to obtain cirrus-cloud ice water content (IWC) and general effective size (GES). A cirrus case in Shouxian is analyzed using the proposed algorithm and the data from micro-pulse lidar and millimeter wave radar. The results show that the IWC and GES are $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ g/m}^3$ and $1 \sim 200 \mu\text{m}$, respectively, which are consistent with the empirical values. The changes of IWC and GES with time are in accordance with the evolutions of cirrus. The analysis results imply the feasibility of retrieving microphysical properties of cirrus from micro-pulse lidar and millimeter wave radar data.

Key words atmospheric optics; micro-pulse lidar; millimeter wave radar; cirrus cloud; microphysical property

OCIS codes 010.1615; 280.3640; 280.5600

1 引 言

卷云是由于大气系统的抬升或湿空气的深度对流而形成的,主要由冰晶粒子组成。卫星观测数据表明卷云大约覆盖了地球表面的30%^[1-2]。由于卷云的特殊组成和所处的海拔高度使得其对大气的红外加热效应要大于对太阳辐射的反射减温效应,所以产生正的温度反馈效应^[1,3]。不过这种类似温室气体的加热作用都是通过基于很多物理假设的数值模式模拟出来的^[4]。而通过观测揭示出的卷云的辐射效应的正负性,如今还是一个有争议的问题^[5-6]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告中也指出卷云在

收稿日期: 2013-02-24; 收到修改稿日期: 2013-05-10; 网络出版日期: 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(40805016)

作者简介: 王 敏(1987—),女,硕士研究生,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: 327058748@qq.com

导师简介: 卜令兵(1976—),男,博士,副教授,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: lingbingpu@gmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

辐射强迫和气候变化中的作用还存在很大的不确定性,卷云在地球、大气辐射平衡中具有重要的作用,了解其辐射强迫效应是当前全球气候变化研究中一个亟需解决的问题^[7]。卷云辐射强迫的不确定性,部分原因是由于模式的困难,但其主要原因还是对卷云的观测数据不足、认识不够。卷云复杂的产生机制、所处位置、光学厚度都给其观测带来很大的困难,目前所使用的观测手段都会带来不小的观测误差,而这些卷云在宏观、微观物理特性上的观测误差很大程度上导致了辐射强迫效应的不确定性^[8-9]。

激光雷达以它的高时间、空间分辨率以及测量精度而成为一种重要的卷云探测工具,它可以较为精确地确定卷云的高度、结构以及光学性质,国内外已有相关研究并取得了重要的进展^[10-11]。毫米波雷达除能够连续观测云高、云厚、云量等宏观参数外,因具有穿透云的能力而能描述云内部物理结构,例如回波顶的高度和回波的体积、面积等反映了云的特征尺度,回波强度反映了云中粒子的大小和浓度,回波强度在时间和空间上的变化反映了云内微物理过程的结构和演变特征。目前,已有很多使用单雷达来反演云微物理特性的研究,但是国内还没有使用激光雷达和毫米波雷达联合进行卷云探测研究的报道。本文就联合微脉冲激光雷达(MPL)和毫米波雷达资料反演卷云冰水含量(IWC, C_{IW})和粒子有效尺寸(GES, D_{ge})的方法进行了研究。

2 仪器介绍和数据来源

2008年5~12月,美国能源部的大气辐射测试(ARM)项目的移动观测设备安装在中国寿县,本文所用的仪器为微脉冲激光雷达和W波段的云雷达(WACR)文中所涉及的时间均为世界时。微脉冲激光雷达是一种弹性散射激光雷达,由激光发射系统、信号接收系统和数据采集系统构成,激光发射系统发射波长为527 nm的脉冲信号,信号通过同一望远镜发射、接收,利用雪崩光电二极管光子计数器将望远镜收集到的散射光信号转化为电信号,其垂直分辨率为15 m。W波段云雷达的工作频率为95.04 GHz,波长为3 mm,垂直分辨率为43 m,探测的最大高度为15 km,定位于探测云过程的微物理和动力结构的垂直变化,具有高灵敏度、高空间分辨率、高机动性等特点,该雷达主要探测参数为云系的回波强度、径向速度、速度谱宽和原始的多谱勒谱。

3 算法描述

微脉冲激光雷达的探测原理用激光雷达方程说明。激光雷达方程是表示发射功率与接收到的回波功率之间关系的方程,写作

$$n_r(r) = \{[O_c(r)CE\beta(r)T^2/r^2] + n_b(r) + n_{ap}(r)\}/D[n(r)], \quad (1)$$

式中 $n_r(r)$ 是雷达探测器接收的光电子数(单位为 μs^{-1}), $O_c(r)$ 是填充订正函数, C 是系统常数, E 是发射的激光脉冲能量(单位为 μJ), $T^2 = \exp\left[-2\int_0^r \sigma(r')dr'\right]$ 是大气透射率, $\beta(r)$ 是气溶胶和大气总的后向散射系数(单位为 km^{-1}), r 是探测体与接收望远镜之间的距离, $n_b(r)$ 是背景噪音(单位为 μs^{-1}), $n_{ap}(r)$ 是探测器后脉冲订正函数(单位为 μs^{-1}), $D[n(r)]$ 是探测器间歇时间订正函数^[12]。

使用 Klett 方法^[13]根据(1)式对大气后向散射回波信号进行处理可获得大气消光系数 $\sigma(r)$,该方法中的积分使用的是后向积分,迭代的初始值根据曹念文等^[14]对南京北郊气溶胶观测研究中得到的结果来确定,取值为 $10^{-2} km^{-1}$ 。

采用 Fu^[15]提出的方法,大气消光系数 σ 可由卷云冰水含量 C_{IW} 和粒子有效尺寸 D_{ge} 表示为

$$\sigma = C_{IW} \left(a_0 + \frac{a_1}{D_{ge}} \right), \quad (2)$$

式中 a, a_1 是与波长有关的系数,对于波长为 527 nm 的微脉冲激光雷达, $a_0 = -3.03108 \times 10^{-5}$, $a_1 = 2.51805$ 。

根据 Wang 等^[16]提出的方法,毫米波雷达的基本产品回波强度 Z_e 可表示为

$$Z_e = C' \frac{C_{IW} D_{ge}^b}{\rho_i}, \quad (3)$$

其中 $C' = CK_i^2/K_w^2$, K_i^2, K_w^2 分别是冰晶和水滴的质电常数,对于 95 GHz 的雷达来说, $K_i^2 = 0.1768$, $K_w^2 =$

$0.93, \rho_i = 0.92 \text{ g/cm}^3$, C 和 b 是与 D_{ge} 有关的常数(表 1), 假设 $D_{ge} < 34.2 \mu\text{m}$, 那么把对应的 C 和 b 的值代入(3)式中, 联立(2)、(3)式, 就可以得到卷云的冰水含量和粒子有效尺寸, 求出的 D_{ge} 如果不在该范围内, 就依次假设 D_{ge} 是在表 1 中的第二、三个范围内, 然后将相对应的 C 、 b 值代入(3)式, 直到求出的 D_{ge} 值符合假设条件。

表 1 (3)式中的常数

Table 1 Constants in Eq. (3)

Range of $D_{ge}/\mu\text{m}$	C	b
< 34.2	$e^{-10.560}$	2.825
$34.2 \sim 93.9$	$e^{-12.509}$	3.377
> 93.9	$e^{-15.658}$	4.070

4 个例分析

选取 2008 年 11 月 12 日 09:00~23:00 微脉冲激光雷达和毫米波测云雷达探测到的一次卷云过程进行分析。图 1(a)、(b)分别为 2008 年 11 月 12 日 09:00~23:00 微脉冲激光雷达经过距离订正的后向散射回波信号和毫米波雷达测得的回波信号强度的时空分布。从回波图可以看出, 卷云经历了从发生、发展到消亡的阶段, 10:00 左右卷云产生, 随即卷云厚度迅速增加, 而在 11:00~13:00 之间卷云相对稳定, 云底高度和厚度基本上没有变化, 13:00 以后云底高度持续降低, 厚度减小, 而 16:00 以后云底高度开始增高, 厚度增大, 19:00 以后卷云逐渐地消散掉了。图 1(c)、(d)分别为微脉冲激光雷达和毫米波雷达联合反演的卷云粒子有效尺寸和冰水含量的时空变化。David 等^[17]总结了许多学者的实验结果, 归纳了卷云参数的典型值和范围, 涉及到的卷云纬度范围为南北纬 $5^\circ \sim 65^\circ$ 。如卷云中心高度为 4~20 km, 云厚范围为 0.1~8 km, 冰晶尺寸的范围为 1~8000 μm , 云内冰水含量范围 $10^{-4} \sim 1.2 \text{ g/m}^3$ ^[17]。从图 1(c)、(d)中可以看出, 卷云冰晶粒子有效尺寸分布在 1~200 μm 之间, 冰水含量分布在 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ g/m}^3$ 之间, 与经验值相符。卷云的微物理特性随着时间的变化和卷云厚度的增加而改变。当云厚度相对较薄时, 冰晶粒子尺寸相对较小, 冰水含量较低; 反之, 粒子尺寸增大, 冰水含量也同样增多, 与 Wang 等^[16,18]总结出的卷云微物理特性的演变规律整体上是

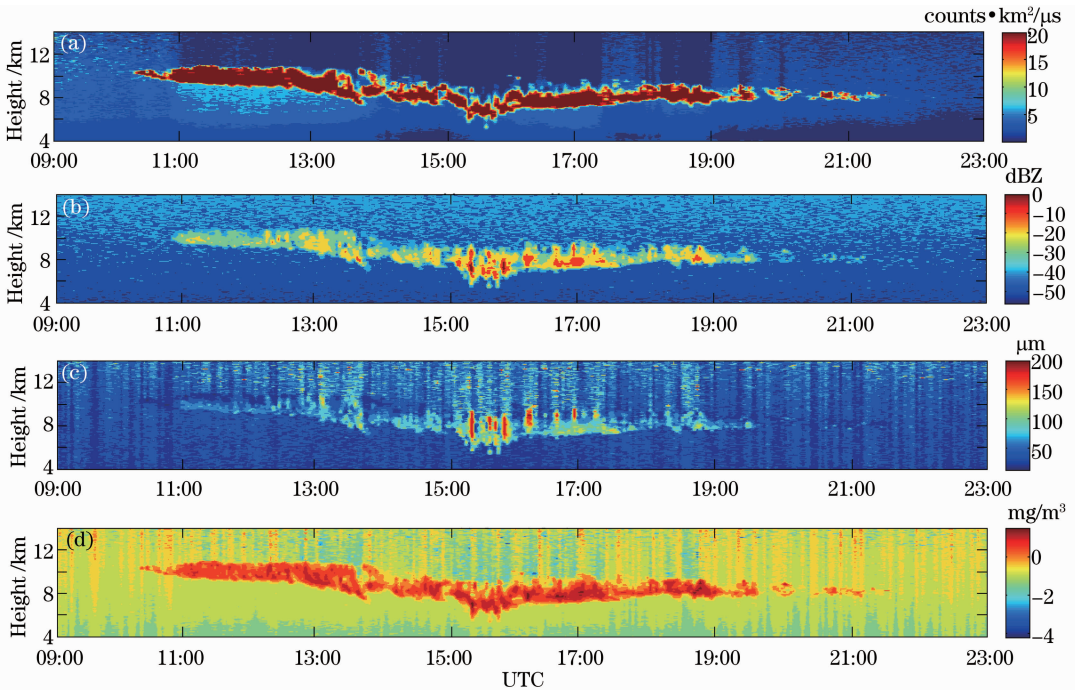


图 1 2008 年 11 月 12 日 09:00~23:00 卷云的时空分布图。(a) $P(r)r^2$; (b) 雷达回波强度; (c) 粒子有效尺寸; (d) 冰水含量

Fig. 1 Spatial and temporal distribution of cirrus between 09:00~23:00 on Nov. 12, 2008. (a) $P(r)r^2$; (b) radar reflectivity factor; (c) generalized effective size; (d) ice water content

由于激光雷达和毫米波雷达波长的差异,使得激光雷达的后向散射系数与粒子直径的平方成正比,而毫米波雷达的后向散射系数则与粒子直径的六次方成正比。虽然激光雷达对探测对流层中的任何一种云都足够敏感,但是由于云的强光学衰减作用而限制了激光雷达穿透光学厚度很厚的云的能力,即卷云太厚,导致部分卷云只有毫米波雷达回波信号;而云雷达则被认为是相对于小粒子而言对大粒子的探测更为敏感,即卷云太薄,导致某些卷云不能被毫米波雷达识别,而只有激光雷达信号。所以最好的探测云的方法是联合激光雷达和毫米波雷达^[8]。

本文没有飞机现场实测数据来进行相关性分析,只能和经验值进行大致比较,反演结果必然存在一些误差。产生误差的原因很多:微脉冲激光雷达的信噪比、积分时间以及消光系数反演方法,都给消光系数的反演带来了相当大的误差;毫米波雷达回波信号强度的测量误差主要来源于雷达系统的标定和噪声的影响;在算法中对冰晶形状的假设等都会给反演结果带来误差。同时不同天气条件对结果的准确性也有一定的影响,例如在雾霾天气条件下,卷云消光系数的反演会受到影响,从而影响卷云冰水含量和粒子有效尺寸的准确度。

5 结 论

对基于微脉冲激光雷达和毫米波雷达联合反演卷云冰水含量和粒子有效尺寸的算法进行了研究。使用该算法分析了2008年11月12日09:00~23:00的一次卷云过程,结果表明:卷云冰水含量和冰晶粒子有效尺寸分布均在经验值范围内,且幅度范围远小于经验值;卷云的微物理特性变化符合卷云发展过程中的客观规律。本研究为卷云微物理结构探测提供了一种可行的方法,也可基于该方法使用CALIPSO和CloudSat数据获得全球范围内卷云的微物理结构特性,为卷云辐射研究提供必要的数据库。

参 考 文 献

- 1 K N Liou. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective [K]. *Monthly Weather Review*, 1986, 114(6): 1167–1199.
 - 2 H Nazaryan, M P McCormick, W P Menzel. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(D16): D16211.
 - 3 C Platt. Lidar and radiometric observations of cirrus clouds [J]. *J Atmospheric Sciences*, 1973, 30(6): 1191–1204.
 - 4 K Sassen, J R Campbell. A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing. Part I: macrophysical and synoptic properties [J]. *J Atmospheric Sciences*, 2001, 58(5): 481–496.
 - 5 B Lin, B A Wielicki, L H Chambers, *et al.*. The iris hypothesis: a negative or positive cloud feedback? [J]. *J Climate*, 2002, 15(1): 3–7.
 - 6 M D Chou, R S Lindzen, A Y Hou. Comments on "The iris hypothesis: a negative or positive cloud feedback?" [J]. *J Climate*, 2002, 15(18): 2713–2715.
 - 7 M L Parry, O F Canziani, J P Palutikof, *et al.*. (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
 - 8 G L Stephens, S-C Tsay, P W Stackhouse Jr, *et al.*. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback [J]. *J Atmospheric Sciences*, 1990, 47(14): 1742–1753.
 - 9 D K Lynch, K Sassen, D Starr, *et al.*. *Cirrus* [M]. New York: Oxford University Press, 2002.
 - 10 J D Spinhirne. Micropluse lidar [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1993, 31(1): 48–54.
 - 11 K Sassen, B S Cho. Subvisible-thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological reserch [J]. *J Appl Meteor*, 1992, 31(11): 1275–1285.
 - 12 J R Campbell, D L Hlavka, E J Welton, *et al.*. Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites: instruments and data processing [J]. *J Atmos Ocean Tech*, 2002, 19(4): 431–442.
 - 13 J D Kleet. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211–220.
 - 14 Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, *et al.*. Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing City [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060101.
- 曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060101.

- 15 Q Fu. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models [J]. *J Climate*, 1996, 9(9): 2058—2082.
- 16 Z Wang, K Sassen. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements. Part I: algorithm description and comparison with *in situ* data [J]. *Appl Meteor*, 2002, 41(3): 218—229.
- 17 R D David, F R Lawrence. A summary of physical properties of cirrus clouds [J]. *J Appl Meteor*, 1990, 29(9): 970—978.
- 18 Z Wang, K Sassen. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements. Part II: midlatitude cirrus microphysical and radiative properties [J]. *J Atmos Sci*, 2002, 59(14): 2291—2302.