

## 激光雷达和毫米波雷达的卷云微物理特性的联合反演方法

单坤玲<sup>1</sup>, 刘新波<sup>2</sup>, 卜令兵<sup>2</sup>, 郜海阳<sup>2</sup>, 黄兴友<sup>2</sup>

- (1. 南京信息工程大学 物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044;  
2. 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 联合激光雷达和毫米波雷达对卷云观测可以得到更全面的卷云特性信息, 是卷云观测的一种发展趋势。使用美国大气辐射观测 (Atmospheric Radiation Measurement, ARM) 计划中卷云观测数据, 将激光雷达和毫米波雷达反演的云边界信息相结合, 得到更为准确的卷云边界信息。提出卷云微物理特性的激光雷达和毫米波雷达联合反演算法, 该联合反演算法能在激光雷达不能穿透或毫米波不能识别卷云的情况下, 反演出整个卷云的冰水含量、光学厚度。使用联合反演算法对一次卷云过程进行反演, 其中激光不能穿透的区域冰水路径含量反演精度提高 24%, 毫米波雷达无法识别的区域冰水路径含量反演精度提高 48%。在正确反演冰水含量的基础上, 利用冰水含量、粒径分布与光学厚度的关系得到卷云过程的光学厚度, 克服了由于卷云对激光雷达强衰减导致的光学厚度观测的困难。

**关键词:** 激光雷达; 毫米波云雷达; 卷云; 联合反演算法

**中图分类号:** P412.25   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2742-05

## Joint inversion method of cirrus physical properties using both Lidar and millimeter wave radar

Shan Kunling<sup>1</sup>, Liu Xinbo<sup>2</sup>, Bu Lingbing<sup>2</sup>, Gao Haiyang<sup>2</sup>, Huang Xingyou<sup>2</sup>

- (1. College of Physics & Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
2. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Joint observation using Lidar and millimeter wave cloud radar (MWCR) from which more comprehensive properties of cirrus can be retrieved is the main trend of cirrus observation. Combining the information of cirrus boundary from Lidar and MWCR of ARM project, more accurate boundary of cirrus was obtained. Joint inversion method for retrieving cirrus microphysical properties was presented. Both ice water content and optical depth can be inverted accurately even in cases when the cirrus can't be penetrated by Lidar or can't be sensed by the MWCR through this method. The joint method was applied to a cirrus case, the results showed the accuracy of ice path content increased by 24% when the Lidar can't penetrate the cirrus and 48% when the MWCR can't sense the cirrus. Based on the accurate inversion of ice water content, the optical depth of cirrus was obtained using the relationship between ice

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(40805016); 江苏省自然科学基金(BK20141480)

作者简介: 单坤玲(1975-), 女, 实验师, 主要从事激光雷达数据分析方面的研究。Email: 40156773@qq.com

water content, size distribution and optical depth. The inversion method of optical depth can overcome the difficulty arise from the attenuation of cirrus to Lidar.

**Key words:** lidar; millimeter wave cloud radar; cirrus cloud; joint inversion method

## 0 引言

卷云产生机制复杂,一般分布在对流层上部到平流层下部,主要由各种大小和形状的冰晶粒子组成。卷云在地球表面的覆盖率约为30%,它既反射太阳短波辐射,又吸收地面的长波辐射,因此,对天气和气候有着重要的影响<sup>[1-2]</sup>。由于卷云所处位置高,光学厚度小,因探测困难,数据稀缺导致其在气候模式中不能很好的参数化。IPCC第四次评估报告中指出卷云在辐射强迫和气候变化中的作用还存在很大的不确定性,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<sup>[3]</sup>。就卷云的地面遥感探测而言,激光雷达和毫米波雷达是两种目前常用的卷云观测仪器,但这两种仪器各有利弊,仅用其中任何一种都很难完成对卷云物理特性的准确、全面的观测。因此,激光雷达与毫米波雷达相结合是地基卷云探测的发展趋势。Intrieri等<sup>[4]</sup>提出利用激光雷达和气象雷达进行卷云粒子有效半径探测的方法,揭示了多种仪器联合探测的可行性。Wang等<sup>[5-6]</sup>利用消光系数和毫米波反射率因子联合反演出卷云冰水含量和有效粒子半径等,总结出卷云微物理特性的演变规律。为验证Calipso和Cloudsat未来在探测卷云方面的潜力,NASA利用机载激光雷达和毫米波雷达开展了卷云观测试验。Tinel等<sup>[7]</sup>使用CRSYTAL-FACE(Cirrus Layer-Florida Area Cirrus Experiments)中激光雷达和毫米波雷达的数据对卷云进行了分析,总结出光学厚度小的卷云,毫米波可能探测不到,激光雷达却有优势。已查到有关激光雷达、毫米波雷达共同反演卷云特性的文献大都是在激光雷达数据和毫米波雷达数据均有效的前提下进行的。实际上,由于波长差异,激光雷达和毫米波雷达对卷云粒子响应灵敏度不同,加之卷云物理特性复杂多变,仪器参数不同,在卷云观测中,很难保证激光雷达信号和毫米波雷达信号均为有效信号。因此,发展一种基于激光雷达和毫米波雷达普遍适用的卷云特性反演算法,对卷云探测有重要意义。

文中使用大气辐射观测ARM观测计划中微脉冲激光雷达和95 Hz的毫米波云雷达(MWCR)的卷云观测数据,提出了适用于卷云微物理特性反演的联合反演算法,该算法充分利用激光雷达和毫米波雷达各自探测优势和联合反演的准确性,能够实现卷云光学厚度及冰水含量和有效半径的反演。

## 1 卷云云区识别

联合两种雷达对卷云特性的准确反演,首先需要确定卷云云区。激光雷达波长短,对云中小颗粒物足够敏感,但由于云的衰减,不能够穿透较厚的卷云;毫米波雷达穿透卷云的能力强,可以描述云内部物理结构,但对太薄的卷云不能够识别。在理想情况下,对于较薄的卷云和卷云云底的识别,激光雷达优于毫米波雷达,并且在两部雷达都可以穿透卷云的情况下,研究已经表明毫米波雷达对云顶的识别能力不如激光雷达。在激光雷达不能够穿透卷云的情况下,考虑使用毫米波雷达确定云顶。因此,为了更好的确定卷云所在的位置,识别卷云云区范围,对于薄卷云,使用激光雷达确定卷云云区;对于激光雷达不能够穿透,毫米波可以穿透的卷云,使用激光雷达确定云底,毫米波确定云顶。图1(a)、(b)为ARM计划中移动观测站在安徽寿县2008年11月12日一次卷云观测的激光雷达和MWCR回波时序图,可以看出卷云经历了薄-厚-薄的演变过程,从10:00(世界时,下同)到12:00左右,卷云较薄,激光雷达可以穿透卷云;12:00~17:00一段时间内,激光雷达出现不能穿透较厚卷云的情况;17:00以后卷云又开始逐渐变薄,激光雷达可以穿透卷云。由于激光雷达波长短,对卷云粒子敏感,在激光雷达可以穿透的区域,使用激光雷达确定卷云云区。在激光雷达不能穿透的区域,利用激光雷达确定云底高度,利用MWCR确定云顶高度。按照上述方法识别的卷云云区如图1(c)所示。其中,上下两条实线代表激光雷达和MWCR联合确定出的卷云云顶和云底边界,虚线代表激光雷达所计算出的云顶边界,很明显可以看出

激光雷达在 15:00 前后一段时间内所识别的云顶高度低于毫米波,没有穿透卷云。所以,激光雷达和毫米波雷达联合反演可以更准确地识别卷云云区,是进行卷云微物理特性反演的基础。

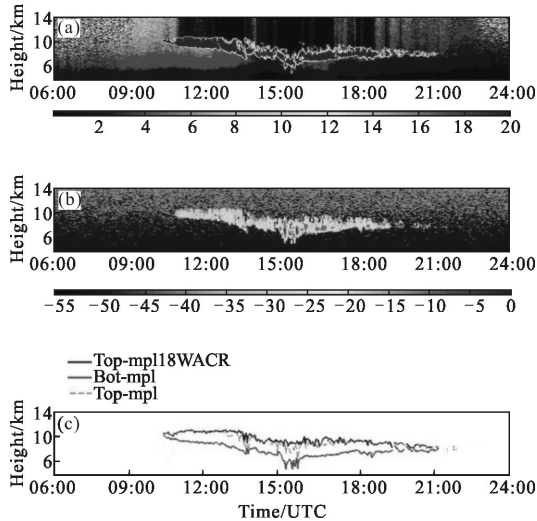


图 1 激光雷达毫米波雷达识别卷云云区,激光雷达回波时序图(a)、毫米波雷达回波时序图(b)和卷云云区识别结果(c)  
Fig.1 Identification of cirrus boundary information based on Lidar and the MWCR, time serials of Lidar backscatter signal(a), time serials of MWCR reflectivity factor(b) and identified result of cirrus(c)

## 2 卷云物理特性联合反演

### 2.1 冰水含量和有效粒子半径联合反演

Avery<sup>[8]</sup>将星载激光雷达获得的卷云消光系数和机载云粒子探测器探测的资料进行对比,在超过五年数据的基础上总结得到卷云消光系数与卷云冰水含量的经验公式。Heymsfield 等<sup>[9]</sup>在中低纬度 CALIPSO 遥感数据和模式结果基础上分析出有效粒子半径 Dge1 与消光系数间的关系。使用激光雷达反演 IWC1 和 Dge1 的经验公式分别为(方法一):

$$IWC1=119 \cdot \sigma^{1.22} \quad (1)$$

$$Dge1=c \left[ \frac{IWC1}{\sigma} \right] \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为消光系数,单位为  $m^{-1}$ ,可利用 Fernald 法<sup>[10]</sup>计算求得,且卷云激光雷达比由 Chen<sup>[11]</sup>和 Xue 等<sup>[12]</sup>的方法确定; $c$ 可根据 Heymsfield 等总结为 1.64;卷云冰水含量 IWC1 单位为  $g/m^3$ 。

Liu Chunlei 等<sup>[13]</sup>利用大量飞机实地观测的云粒径谱资料和总结已有研究成果基础上,给出了毫米波

雷达反演 IWC2 和 Dge2 经验公式分别为(方法二):

$$IWC2=0.137 \cdot Ze^{0.643} \quad (3)$$

$$Dge2=200 \cdot Ze^{\frac{1}{4.09}} \quad (4)$$

$Ze$  为雷达反射率  $Ze=10^{Z/10}$ ,且  $Z$  是以 dBZ 为单位的雷达反射率(下同);IWC2 单位为  $g/m^3$ ,粒子有效半径 Dge2 为  $\mu m$ 。

Wang 等<sup>[15-6]</sup>通过消光系数和毫米波反射率因子建立了与飞机实地观测较一致的反演卷云冰水含量和有效粒子半径经验关系,计算公式为(方法三):

$$IWC3=\left(\frac{Ze}{C'}\right)^{1/(b+1)} \left(\frac{\sigma}{a_1}\right)^{b/(b+1)} (\rho_i)^{1/(b+1)} \quad (5)$$

$$Dge3=\left(\frac{Ze}{C'}\right)^{1/(b+1)} \left(\frac{a_1}{\sigma}\right)^{1/(b+1)} (\rho_i)^{1/(b+1)} \quad (6)$$

式中:对于 527 nm 的微脉冲激光雷达  $a_1=2.518 05$ ;  $C'=CK_w^2/K_w^2$ ,  $K_w^2$ 、 $K_i^2$  分别是水滴和冰晶的质电常数,95 GHz 的毫米波相对应的值为 0.622 19、0.176 0;  $\rho_i=0.92 g/cm^3$ ;  $b$ 、 $C$  是与 Dge3 有关的常数。

在满足一定条件下,激光雷达和毫米波雷达都可以单独反演卷云冰水含量和粒径谱分布(方法一和方法二),也可以将两种雷达联合起来对冰水含量和 Dge 进行反演(方法三)。上述三种方法的前提是激光雷达和 MWCR 均能正确的探测到卷云,但由于卷云的多样性,可能出现激光雷达不能穿透及毫米波雷达对卷云无响应的情况,所以提出一种适用性更强的卷云联合反演方法。对联合反演方法可以描述如下:(1) 激光雷达可以穿透,毫米波不可以识别的卷云,使用方法一反演;(2) 激光雷达和毫米波雷达都可以穿透的卷云,使用方法三反演;(3) 激光雷达不可穿透,毫米波可以穿透,使用方法二反演。实际上述三种情况往往会出现同一次卷云过程中,这使得同一块云中的冰水含量是由三种方法计算得到的,由于三种方法中均存在经验参数,导致微物理特性值会在反演方法更换时发生突变,这与云体的连续性相悖,因此,在反演中,需以一种方法为标准,对其他几种方法经验参数进行拟合。当卷云特性较大发生变化时,选定的标准方法不再适合,则从另外两种方法中选定一种,使用拟合的经验参数对卷云微物理特性进行反演,这样可以准确的得到整个卷云云水含量。

### 2.2 对比验证

将联合反演方法应用与 2008 年 11 月 12 日安

徽寿县激光雷达和毫米波雷达观测结果(见图1)。12:00之前的卷云较薄,两种雷达都可以有效探测到卷云。在激光雷达和毫米波雷达均能穿透的区域使用方法三进行冰水含量反演,并将方法三计算出的IWC3与方法二中关系式 $IWC3=a_1 \cdot Ze^{b_1}$ 进行拟合,得到 $a_1=0.093, b_1=0.436$ ;同时与方法一中关系式 $IWC3=a_2 \cdot Ze^{b_2}$ 进行拟合,得到参数 $a_2=12.18; b_2=0.96$ 。在12:00~17:00间激光雷达不能穿透卷云,使用方法二进行冰水含量反演。在17:40以后,使用方法一进行反演,就可以计算整个卷云的冰水含量。综合使用三种反演算法,可以准确地得到整个卷云的冰水含量。图2中(a)、(b)、(c)、(d)分别为方法一、方法二、方法三和联合反演算法的反演结果。由于在12:00~17:00间,激光雷达不能穿透卷云,17:40以后毫米波不能很好识别出薄卷云,所以在图2(a)、(b)、(c)中冰水含量存在很明显的缺失区域,如图中椭圆标记所示。相比而言,图2(d)得到了完整的冰水含量时序变化图,计算出卷云冰水含量在 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 之间,在经验值范围内<sup>[5-6,14]</sup>。

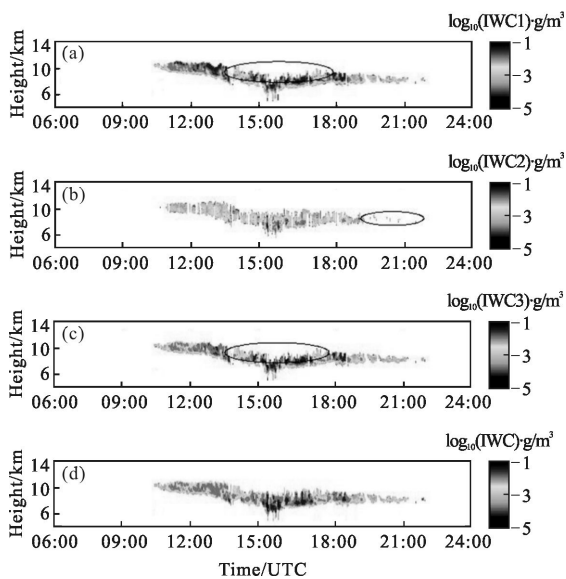


图2 四种方法冰水含量反演结果对比

Fig.2 Comparison of inversion results for ice water content using four methods

在12:00~17:00之间,激光雷达没有穿透卷云,毫米波可以穿透卷云,所以方法一和方法三在该段时间内反演结果可信度较差,将方法二与联合反演方法结果进行对比。图2(b)在12:00~17:00内冰水含量分布为 $8.12 \times 10^{-5} \sim 0.3926 \text{ g/cm}^3$ ,冰水路径总和

为 $2168 \text{ g/cm}^2$ ,图2(d)冰水含量分布为 $1.65 \times 10^{-4} \sim 0.1912 \text{ g/cm}^3$ ,冰水路径总和为 $2839 \text{ g/cm}^2$ 。由于12:00之前,反演结果是有保证的,拟合出的系数也更符合当前卷云的特性,所以图2(d)冰水路径总和较图2(b)大,符合实际情况,使用联合反演算法后,冰水路径含量精度提高24%。在17:40以后,毫米波不能很好识别出薄卷云,图2(b)结果不连续,但激光雷达依然可以很好地探测到卷云,可将图2(a)作为对比参考。统计得到17:40后,图2(a)冰水含量分布范围为 $3.27 \times 10^{-5} \sim 0.1261 \text{ g/cm}^3$ ,冰水路径总和为 $668.7 \text{ g/cm}^2$ ,图2(d)冰水含量分布范围为 $8.09 \times 10^{-5} \sim 0.0944 \text{ g/cm}^3$ ,冰水路径总和为 $450.8 \text{ g/cm}^2$ ,反演精度提高48%。

### 2.3 卷云光学厚度

光学厚度是描述卷云微物理特性的另一参数,与卷云辐射特性有直接关系。通常,卷云光学厚度可以利用激光雷达测量信号进行计算,如透过率法<sup>[11]</sup>,但该方法只适用于激光雷达可以穿透卷云的情况,当激光雷达不能够穿透卷云时,该方法不可用,所以有必要采用一种适用性更强的光学厚度计算方法。Wang等<sup>[5]</sup>指出在已知卷云光学厚度时,可以联合毫米波 $Ze$ 计算出卷云的冰水路径和平均有效半径,因此,根据联合反演得到的冰水含量和有效粒子半径,可以推导出卷云光学厚度计算公式为:

$$\tau_c = IWP \cdot \left( a_0 + \frac{a_1}{D_{ge}} \right) \quad (7)$$

以上述卷云过程为例,根据公式(7)得到此次过程卷云光学厚度和几何厚度对比时序图,如图3所示,虚线 $\tau_{c1}$ 代表利用激光雷达透过率法计算得到的光学厚度,实线 $\tau_{c2}$ 代表公式(7)计算出的光学厚度,点划线 $\Delta H$ 代表云层几何厚度。12:00前和17:00后,激光雷达能穿透卷云,此时透过率法可以得到较为正确的光学厚度,对比公式(7)在该段时间内计算出的光学厚度 $\tau_{c1}$ 与 $\tau_{c2}$ 的时间廓线,两者十分接近,且基本走势相一致。而12:00~17:00是激光雷达不能穿透卷云的时间, $\tau_{c1}$ 与 $\tau_{c2}$ 廓线间基本没有重合。在整个卷云过程中,对比 $\Delta H$ ,从 $\tau_{c1}$ 和 $\tau_{c2}$ 廓线整体走势来看, $\tau_{c2}$ 与 $\Delta H$ 整体走势相一致,相关性为0.799,这与研究已经证明的光学厚度和几何厚度成正比的结论符合<sup>[15]</sup>。 $\tau_{c1}$ 却由于在激光雷达不能穿透卷云的时间12:00~17:00内一致性很差,使得 $\tau_{c1}$ 整体与 $\Delta H$ 的相关性仅为0.4149。在12:00之前, $\tau_{c1}$ 和 $\tau_{c2}$ 分布

范围和平均值很接近,两者相关性为0.8796;17:00以后, $\tau_{c2}$ 分布范围和平均值比 $\tau_{c1}$ 略大,但相关性依然较好,为0.6096,此时出现相关性减小的现象是由于在18:20左右 $\tau_{c2}$ 的结果明显大于 $\tau_{c1}$ ,而对比几何厚度演变趋势可知, $\tau_{c2}$ 的结果更合理, $\tau_{c1}$ 偏小可能是由于在该段时间云厚逐渐增大,云顶信噪比已经很低,使得透过率法计算得到的 $\tau_{c1}$ 不稳定,这也反映出利用公式(7)计算光学厚度不仅结果准确,而且稳定。在12:00~17:00之间,对比 $\tau_{c1}$ 和 $\tau_{c2}$ ,二者相关性很差,仅为0.0623,平均值和分布范围也有很大不同。 $\tau_{c1}$ 分布范围为0.0150~1.0036,平均值为0.3203,这与12:00前和17:00后云层较薄时的光学厚度十分接近,根据光学厚度和几何厚度成正比的结论,明显此时 $\tau_{c1}$ 结果不正确。相比而言, $\tau_{c2}$ 分布范围为0.0611~5.4871,平均值为1.0242,该段时间内与 $\Delta H$ 的相关系数为0.7659,结果符合对卷云光学厚度的一般认识。

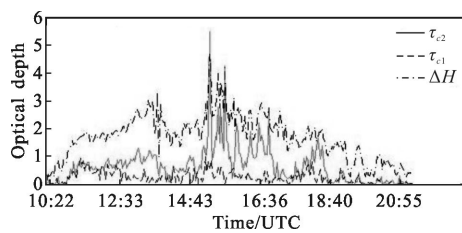


图3 卷云光学厚度和几何厚度对比

Fig.3 Comparison of cirrus optical depth and geometrical thickness

### 3 结论

综合使用激光雷达和MWCR获得准确的卷云边界信息,在此基础上,提出了基于激光雷达和毫米波雷达的对卷云冰水含、光学厚度联合反演算法。通过实例分析,证明了联合算法的可行性和优势。使用文中提出的联合反演算法,能在激光雷达不能穿透或毫米波不能识别卷云的情况下,能够准确的获得整个云区的冰水含量、光学厚度。由于观测手段的限制,目前无法将反演结果与其他探测手段进行对比,后续将考虑使用卫星数据或机载测量数据对联合反演算法结果进行验证。

### 参考文献:

[1] Wylie D P, Menzel W P. Eight years of high cloud statistics using HIRS[J]. *J Climate*, 1999, 12(1): 170-184.

[2] Cao Yanan, Chen Xiuhong, Wei Heli, Study of the effects of cirrus altitude on the atmospheric infrared spectral radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 1965-1970. (in Chinese)

[3] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability [M]. UK: Cambridge University Press, 2007: 982.

[4] Intrieri J M, Stephens G L, Eberhard W L, et al. A method for determining cirrus cloud particle sizes using lidar and radar backscatter technique [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(6): 1074-1082.

[5] Zhiem W, Sassen K. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements, Part I: algorithm description and comparison with in situ data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(3): 218-229.

[6] Zhiem W, Sassen K. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements, Part II: midlatitude cirrus microphysical and radiative properties [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 59(14): 2291-2302.

[7] Tinel C, Testud J, Pelon J, et al. The retrieval of ice-cloud properties from cloud radar and lidar synergy [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(6): 860-875.

[8] Avery M, Winker D, Heymsfield A, et al. Cloud ice water content retrieved from the CALIOP space-based lidar [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L05808.

[9] Heymsfield A J, Winker D, Zadelhoff G -J van. Extinction ice water content-effective radius algorithms for CALIPSO [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L10807.

[10] Fernald F G. Analysis of atmosphere lidar observation: some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652-653.

[11] Chen Weinai, Chiang Chiwei, Nee Janbai. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus cloud [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(30): 6470-6476.

[12] Ding Hongxing, Dai Lili, Sun Dongsong. Spatial distribution of aerosol in troposphere measured by lidar at slant range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 442-446. (in Chinese)

[13] Liu Chunlei, Illingworth A J. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2009, 39: 1130-1146.

[14] David R D, Lawrence F R. A summary of physical properties of cirrus clouds [J]. *J Appl Meteor*, 1990, 29(9): 970-978.

[15] Wang Jin, Zhang Lei, Wang Hongbin, et al. Lidar observations of spatial and temporal variations of clouds over semi-arid areas in Northwest [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 66-72. (in Chinese)