

文章编号: 1001-3806(2009)05-0455-04

用云高仪测量边界层高度

陈臻懿, 刘文清*, 张玉钧, 张春光, 阮俊, 何俊峰

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 为了研究测量混合层高度的方法, 对判断混合层高度的几种重要方法, 如目测法、梯度法等进行了分析, 采用本文中所介绍的 Steyn 法, 通过阐述其理论基础, 给出了理想模型图, 并举例强调实际运用时初始值选择对拟合结果的影响。利用云高仪 Vaisala 测得的 3 幅雷达回波信号图(气溶胶后向散射系数和高度)进行拟合, 得到了混合层高度等结果。结果表明, Steyn 法即使在混合层后向散射系数多变、混合层高度偏低的复杂情况下, 仍能准确有效地识别混合层高度、夹卷层厚度等信息, 大气边界层日变化的实测结果与理论预测值能较好地吻合。

关键词: 激光技术; 混合层高度; 夹卷层厚度; Steyn 法; 云高仪

中图分类号: X831; TH765.6⁺1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.003

Detection of mixing layer depth with ceilometer

CHEN Zhen-yi, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, ZHANG Chun-guang, RUAN Jun, HE Jun-feng

(Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to study the methods of determining the height of the mixing layer, some important methods, such as visual inspection and gradient method, were analyzed. A novel method, namely the Steyn method, was put forward. After describing its basic principle, its ideal model was given out. It was emphasized how the initial value affected the fit result. Then the signals (the profile of aerosol backscatter coefficient and height) obtained from the ceilometer Vaisala CL31 were fitted and the height of the mixing layer was obtained. The results show that with the Steyn method, some information, such as the mixing layer height and the entrainment depth, can be obtained accurately no matter the backscatter vertical distribution varies greatly or the mixing layer is very shallow. The spatial and time distribution of the mixing layer height agrees with the theoretical prediction very well.

Key words: laser technique; mixing layer height; entrainment zone thickness; Steyn method; ceilometer

引言

位于对流层底部的混合层受非均匀下垫面的影响, 不仅会对辐射收支、气象场等产生影响, 而且对污染物的沉降、输送及排出等都有重要作用, 如对空气污染物的分布具有支配性作用^[1]。因此, 混合层高度是评价空气质量受城市污染源、长距离输送或沉降影响的关键参量, 也是检验空气污染数值模拟效果的重要参量。

目前还没有直接测量混合层高度的方法, 比较常用的技术有无线电探空、远程探测和参量化法^[2]。在最新的远程探测法中, 利用云高仪的气溶胶后向散射廓线图推断混合层高度是一种理想的方法。通常自由

大气中气溶胶的浓度要比混合层中的气溶胶浓度低, 因此, 在后向散射的垂直廓线图中可以通过鉴别较强的梯度来推测混合层。确定混合层的高度有多种, 如目测法^[3]、梯度法^[4]和阈值法^[5]。

1 分析方法比较及云高仪介绍

图 1 是一张典型的气溶胶后向散射廓线图。用目

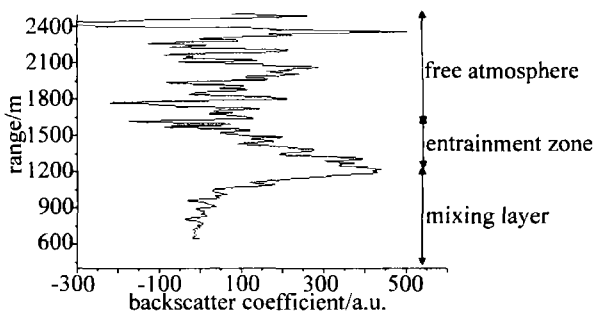


Fig. 1 The typical profile of backscatter coefficient

测法分析, 后向散射信号从离地面近 600m 处急剧增加至约 1200m, 随后迅速减小, 此转折点即可鉴别为混合层, 这也是夹带层的底部; 约 1500m 处, 信号停止减

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项基金资助项目 (GYHY200706023)

作者简介: 陈臻懿(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事测云激光雷达的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2008-06-06; 收到修改稿日期: 2008-07-31

小,变化趋向于稳定,可将该点高度视为夹带层顶部,即1200m~1500m构成整个夹带层;在约1500m以上相对较为稳定的后向散射信号是较为干净的自由层大气。目测法分析存在的缺点如下:由于后向散射系数和消光系数之间的关系很复杂,后向散射系数能否代表真实的大气状态仍需商酌;该方法有较强的主观性,视觉误差不可避免。所以,此法只可以用来大致估计混合层和夹带层。另外,由于回波信号起伏很大,因此,采用的廓线图一般都是经过平均处理的,这就有可能丢失一些瞬时的有用信息^[6]。

梯度法的理论基础是混合层相对不变的浓度一般高于混合层之上大气的浓度,因此,混合层到混合层之上就会看到一个变化,从混合层内相对较强的散射变为混合层上较小的散射。梯度方法就是通过选择后向散射系数的负梯度最大值的地点作为混合层顶。但是因为有限差分导致噪声被放大,在实际过程中很难区分何时出现后向散射系数的最大值,为解决这一问题,通常选择时间或空间的一段连续区域进行平均,并对平均后的廓线图进行垂直平滑处理,但即使进行时空平均处理后,该方法仍有可能把混合层之上的散射层或混合层之下的一些卷云当作混合层。

所谓的阈值法是以后向散射信号低于一个预先设定的阈值作为判断基准^[7],或者以后向散射信号超过清洁大气信号一定值为判断基准^[8],这里不作具体阐述。

本文中运用的 Steyn 法(在后面第2节中有具体阐述)能克服前几种判别法的缺点,鉴别力高、误差小,在利用该方法对云高仪 Vaisala 测得的3幅雷达回波信号图进行拟合时发现,即使在混合层高度很低的特殊情况下,依然能较好地识别出混合层高度,获取有效信息。

本实验中采用 Vaisala 增强型单镜头云高仪 CL31,激光波长为905nm,重复频率10kHz,出射视场角0.83mrad,因为是收发合置光学结构,因此可以忽略小发散角的多次散射效应,后向散射角主要介于179.9°~180.1°之间,其它参量见表1。2s中发射了16384个激光脉冲,接收器的信号被15MHz的10位

Table 1 The parameters of the ceilometer^[9]

property	description
laser source	InGaAs
wavelength	(910 ± 10) nm
repetition	10.0kHz
peak power	11W typical
resolution	10m

A/D转换器转换之后输出770个距离门,结果是经过距离和重叠修正的后向散射衰减廓线,最大可测高度为7700m,10m距离分辨率,衰减后散射廓线可以 $(100000\text{sr} \cdot \text{km})^{-1} = 10^{-8}\text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 为单位报告出来。Vaisala CL31与其它结构复杂的激光雷达相比,具有肉眼安全的激光光源、能实现零距离探测、全天候高性能等优点。缺点是由于单脉冲能量较低,也限制了可探测的最大距离。但是一般边界层的高度都在3km以下,因此对于边界层探测无影响。

2 混合层高度确定方法

运用的方法是 STEYN 于1999年介绍的方法^[10],本质上也是梯度法的一种延伸。这种方法的特点不是从雷达回波信号得出混合层高度,而是选择一条与原始回波信号最接近的理想曲线,从中得出混合层高度。拟合的理想曲线表达式如下:

$$B(z) = \frac{B_m + B_u}{2} - \frac{B_m - B_u}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{z-h}{s}\right) \quad (1)$$

式中, B_m 是混合层后向散射系数平均值, z 是高度, h 是混合层平均厚度, s 与夹带层的厚度有关, B_u 是混合层上空后向散射系数平均值。误差函数的表达式为

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

图2是理想化的边界层廓线图。从图中可以看

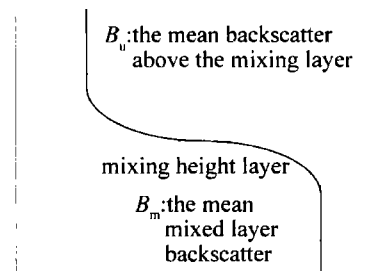


Fig. 2 The ideal backscatter profile

出,分别假定了混合层和混合层之上的大气的后向散射系数均为定值 B_m 和 B_u ,边界层的高度定义在夹带层的中央。

为便于拟合,设定 $M_1 = \frac{B_m + B_u}{2}$, $M_2 = \frac{B_m - B_u}{2}$,在

拟合过程中发现,初始值对拟合出来的曲线影响比较明显,如图3所示,可以看到有两个明显的梯度,如果选择第1个梯度出现的地方 P_1 ,则设 $M_1 = 230$,拟合后的混合层高度为325m,数值太低;如果选择第2个梯度出现的地方 P_2 ,则设 $M_1 = 100$,拟合后的混合层高度为575m,符合这几天该地区上空混合层高度特征。由此可见,根据后向散射廓线图适时地选择初始化参量对拟合出的结果是很重要的。

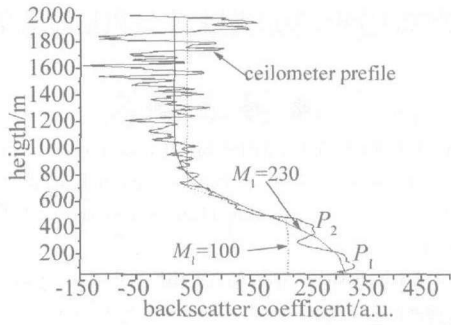


Fig. 3 The effect of different initial parameters on the fitting results

3 实测数据

图 4 是云高仪测得的 3 种情况的气溶胶后向散射廓线图和拟合后的曲线,图 4a 中在近地面处的后向散射系数值较小,可能是因为测量时间为早晨 6 点,无污染源,大气较清洁,尽管 Steyn 法在底部廓线和原始信号的拟合并不完美,但不影响混合层高度的确定,混合层高度较高;图 4b 的混合层在 500m 左右,偏低,但利用仍能较好地判断出混合层,在约 1400m 处后向散射

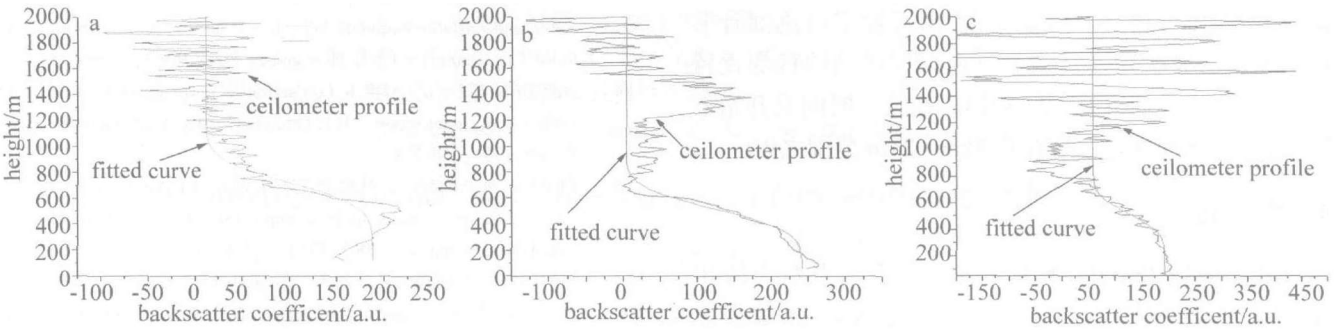


Fig. 4 The fitting results in different cases

a—2007-04-01T06:25 b—2007-04-03T20:20 c—2007-04-05T11:50

系数突然增大, Vaisala 给出的分析结果为 375m 厚的云层;从图 4c 可以看出,除一些噪声外,廓线拟合与实际情况较吻合。

从上述实际拟合图可以看出:在混合层后向散射系数垂直分布变化多变,混合层高度很低等特殊情况下,Steyn 法都能较好地识别出所需信息(如混合层高度,夹卷层等),且避免了平滑处理,保留了某些有用信息。

研究表明,利用 Steyn 法进行边界层的探测是有效可行的,即使在一些较困难的情况下,如混合层高度较低,混合层和其上层后向散射信号较相近、难以区分转折点,在混合层中存在强散射气流团等时,这种方法仍然有效。

图 5 为 2007-04-01 测得的边界混合层高度变化图,其中图 5a ~ 图 5d 是截取的上午几个时间段的拟合图。

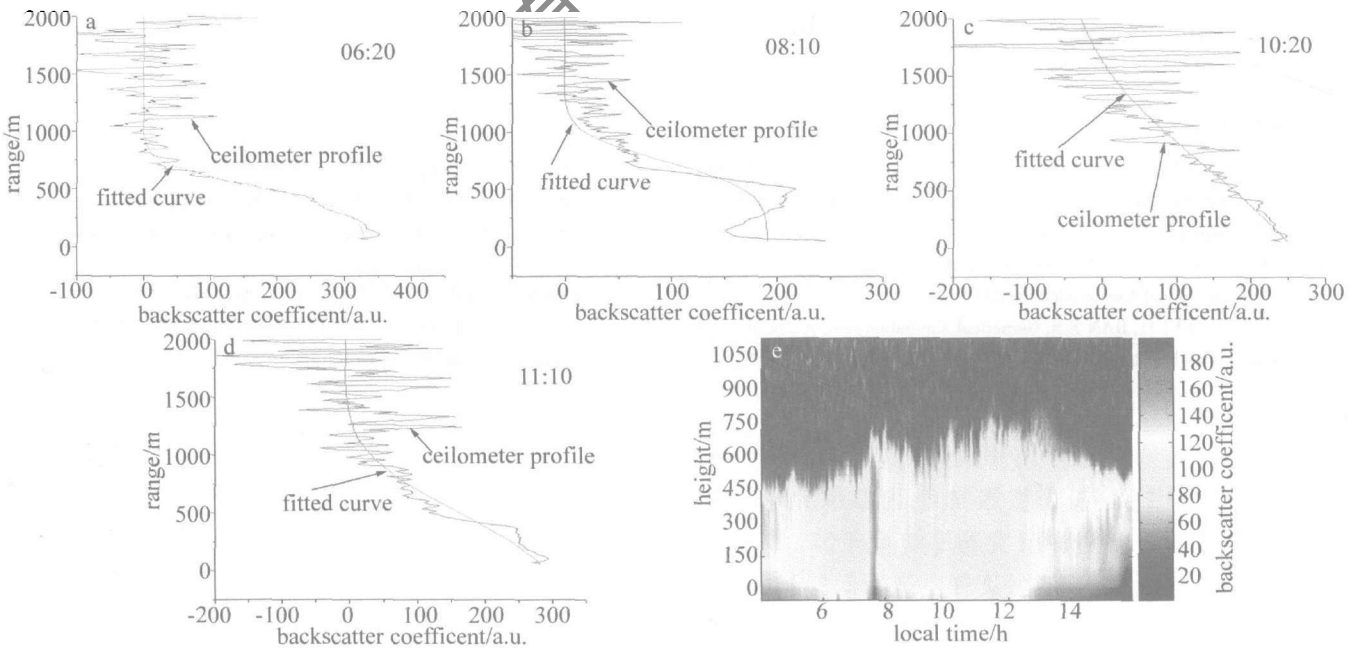


Fig. 5 The mixing layer height observed on 2007-04-01

从图 5 中可以看出,刚开始混合层形状是阶梯式的,梯度变化较为明显,混合层高度为 545m,同时也较

易鉴别出夹带层的厚度,随后梯度变化趋于平缓,混合层高度增加。图 5e 是一整天的时空变化图,从 13:00

左右混合层高度开始下降。对此给出的解释是:太阳未升起前,由近地面热对流引起的混合层高度较低,太阳升起后,在晴朗干净的天气情况下,地面开始存储大量的热能,地面上空能保持的热对流不断积累,而当大气层面处于不稳定状态时,热对流又与空气的垂直浮动有关,剧烈的热对流加快空气垂直浮动,混合层高度变高;又因为热对流造成自由大气向下浮动,同时云的反馈作用使地面接收的热辐射通量减少,地面温度偏低,大气湿度较大,因此,边界层高度在某一时间开始下降,夹带层厚度增加。总体来说,由近地层对流混合形成的城市边界层高度具有大气边界层典型的日变化特点,即早晚比较低,白天逐渐升高,在某一时间又开始下降,边界层高度变化一般在0.5km~2km范围之内。

4 结论

从云高仪 Vaisala 实测大气后向散射系数廓线出发,在白天及夜间不同大气状况下用 Steyn 法获得大气边界层高度等参量,并对 2007-04-01 全天的观测结果进行了分析,获取了当天大气边界层结构及其全天变化的重要信息。应该指出,采用 Steyn 法的缺陷是,运用时要注意选择正确的初始值,剔除有云存在时的干扰因素,尤其当近地面空气被气溶胶含尘气流所覆盖时,无法进行有效的信息鉴别。在实际运用时,如果设备允许,可以选取云高仪法和无线电探空法等同时探测,比较所测混合层高度。同时有必要进行更多的资料积累,并结合边界层风、温、湿等要素垂直分布作

更深入细致的分析,为边界层、空气质量的研究提供科学依据。

参考文献

- [1] DUPONT E, MENUT L, CARISSIMO B, *et al.* Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(6): 979-994.
- [2] ERESMAA N, KARPPINEN A, JOFFRE S M, *et al.* Mixing height determination by ceilometer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(6): 1485-1493.
- [3] JOFFRE S M, KANGAS M, HEIKINHEIMO M, *et al.* Variability of the stable and unstable boundary-layer height and its scales over a Boreal forest [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(3): 429-450.
- [4] HAYDEM K L, ANLAUF K G. Pacific '93 lower fraser valley oxidant study aircraft data report [R]. Ottawa, Canada: Environment Canada Report, 1994: 268-278.
- [5] FRILOUD M, MITEV V, MATTHEY B, *et al.* Elevated aerosol stratification above rhine valley under strong anticyclonic conditions [J]. *Atmosphere Environment*, 2003, 37(13): 1785-1797.
- [6] MOK T M, RUDOWICZ C Z. A lidar study of the atmospheric entrainment zone thickness and mixed layer over HongKong [J]. *Atmospheric Research*, 2004, 69(3/4): 147-163.
- [7] MÜNKEL C, RÄSÄNEN J. New optical concept for commercial lidar ceilometers scanning the boundary layer [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5571: 364-374.
- [8] MÜNKEL C, ERESMAA N, RÄSÄNEN J, *et al.* Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer [J]. *Boundary-Layer Meteorol*, 2007, 124(1): 117-128.
- [9] Vaisala Oyj Corporation. Vaisala ceilometer CL31 user's guide [M]. Vantaa, Finland: Vaisala Oyj, 2004: 121-123.
- [10] STEYN D G, BALDI M, HOFF R M. The detection of mixed layer and entrainment zone thickness from lidar backscatter profiles [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 1999, 16(7): 953-959.

(上接第 451 页)

- [3] HE J S, GUO T W, GU W Y, *et al.* Study on optimal design broadband and flat-gain multi-wavelength pumped fiber Raman amplifier [J]. *Journal of Optical Communications*, 2003, 24(1): 2-5.
- [4] HUANG J F, WU J X. MW-FRA and its pump optimization [J]. *Study on Optical Communication*, 2005(2): 53-55 (in Chinese).
- [5] TONG Z, WEI H, JIAN S S. Numerical simulation and optimization of broadband fiber Raman amplifiers using multi-wavelength pumps [J]. *Acta Optical Sinica*, 2003, 23(2): 194-196 (in Chinese).
- [6] MEI J J, LIU D M, HUANG D X. Analysis of power conversion efficiency of fiber Raman amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 350-356 (in Chinese).
- [7] YANG X B, LIU D M, HUANG D X. Analysis of fiber Raman laser and multi-wavelength lasers [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5): 410-414 (in Chinese).