

北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究^{*}

贺千山 毛节泰

(北京大学大气科学系,北京,100871)

摘 要

2002 年 3~10 月在北京大学利用微脉冲激光雷达(MPL)观测了气溶胶时空变化。提出一种反演混合层高度的方法,这种方法减小了仪器订正的误差,反演的混合层高度与探空测量结果有很好的 consistency。利用该方法计算了观测期间晴天无云天气条件下的混合层高度,分析了混合层高度及其增长率的日变化、季节变化,初步研究了混合层高度和近地面气溶胶分布的相互关系,分析了表征大气扩散能力的通风系数的日变化。结果表明,利用 MPL 监测城市混合层是可行的和优越的。

关键词: 微脉冲激光雷达, 混合层高度, 反演方法, 日季变化。

1 引 言

地面与自由大气的物质和能量交换一直是大气边界层物理的重要问题。边界层高度是大气边界层的重要参数,如何方便有效地确定边界层高度并准确监测其变化过程,对空气污染物的扩散,传输模式以及污染物预报模式都具有十分重要的意义^[1],另外在大气动力和降水的研究中也要用到边界层高度^[2],因此需要一个方法长期监测边界层高度的演变。

理论上边界层高度与地面热通量和风、温度、湿度廓线有关^[3]。利用位温和湿度廓线可以估算出边界层高度,然而探空气球测量的温、湿度廓线常常达不到足够高的时空分辨率,虽然可以利用地面温度和最近的探空数据计算的混合层高度来填补探空间隙,可是这样也会因为忽略平流和下沉对温度廓线的影响而导致计算误差^[4]。

边界层与自由大气相比具有较高的湿度和含有更多的气溶胶,边界层顶处激光雷达信号回波强度表现出明显的突变,可以用于监测边界层发展的时空演化^[5~7]。已经有很多利用激光雷达遥感反演边界层高度的方法,导数法是反演边界层高度最常用的方法,这种方法是把距离订正信号(RCS)的梯度

最小值所在的高度作为边界层高度^[8~10]。还有一种较为成熟的方法为拐点法,它把距离订正信号对高度的二阶导数最小值所在高度作为边界层高度。然而这些方法对激光雷达信号的信噪比要求较高,随着高度的增大噪音信号往往掩盖了激光雷达信号的真实变化,另外仪器订正(尤其是填充订正)的误差往往歪曲了激光雷达廓线的实际变化趋势,所有这些缺点使得以上方法在实际应用中失效。本文基于导数法提出了一些改进,通过与前人方法的比较验证了改进措施的效果,可以较为客观地得到边界层高度,并且利用新方法分析了长期的边界层演变特征。混合层是行星边界层的一个重要的特征量,同时也是白天大气边界层中最常见的情况,因此本文着重研究混合层的特点,对其他形式的边界层仅做简要讨论。

2 仪器与测量

虽然已经有不少研究工作利用激光雷达估计混合层高度^[11,12],然而大多数激光雷达系统达不到人眼的安全标准而且设备庞大复杂,不能长期连续观测混合层。微脉冲激光雷达(MPL)在监测边界层的时间演化方面是一个强有力的工具,这种结构紧

* 初稿时间:2004 年 3 月 10 日;修改稿时间:2004 年 6 月 7 日。

资助课题:教育部博士点基金“激光雷达监测北京城市大气气溶胶垂直分布特征研究”(20030001091)和《国家重点基础研究发展规划》项目:首都北京及周边地区大气、水、土环境污染机理与调控原理(G1999045700)。

作者简介:贺千山,1975 年生,男,在读博士,主要从事大气辐射和辐射的研究工作。E-mail: oxeye@pku.edu.cn

凑、对人眼安全的后向散射激光雷达系统采用固态二极管激光器,发射波长是 523.5 nm(2 倍谐波的 Nd:YLF 激光发射器),光束经发射望远镜扩至直径 20 cm,接收装置主要为 Geiger 雪崩式光电子计数器^[13]。系统参数在表 1 中给出。因为激光发射

能量是 10 μ J,所以单个激光脉冲返回信号的信噪比是很低的。为了提高信噪比我们舍去了 MPL 遥感的优越性之一——高时间分辨率,对数据进行 6 min 平均。这个平均时间取自边界层大气湍流的特征时间尺度^[14]。

表 1 MPL 系统相关参数

Table 1 Standard system specifications and software settings

激光	波长	523 nm
	平均输出能量	10 μ J
	光束发散角	50 μ rad
	脉冲延时	10 ns
	脉冲宽度	0.2 nm
	脉冲重复频率	2.5 kHz
接收器	望远镜类型	施米特-卡塞格伦式收发合置
	有效孔径	0.2 m
	接收视场	<100 μ rad
	完全填充距离	200 m
检测和数据处理	检波类型	光子计数器
	检波器	PMT
	距离分辨率	30 m
	理论探测高度	30 km
	数据处理软件	Visual C++, Matlab

MPL 安装在北京大学物理楼(39°59.5'N, 116°18.6'E) 5 层的一个房间内,射向朝北,避免了日间阳光直射造成的背景噪音误差。发射的激光透过房间的窗户玻璃以 45°仰角射向窗外,目的是保护接收望远镜免受意外损坏和防尘。一台计算机与 MPL 相连用于控制运行和接收并预处理数据。经过填充订正和寄生脉冲订正后,激光雷达的理论最低探测高度距地面 0.095 km。该激光雷达系统可以全天连续自动地进行数据采集,除了 6 月份因进行大规模检修而停止工作外,从 2002 年 3 月 19 日~10 月 12 日,均为 24 h 连续观测。

探空数据从北京南郊观测站取得,该站与激光雷达测站分属城南城北,两点相距大约 30 km,两地的下垫面特征有较大差异,探空站属郊区,而激光雷达位于城郊结合部,因此两地的混合层高度可能有所差异,但考虑到做比较实验所采用的数据均来自早晚时刻,这样的时间里混合层高度比较低,且受下垫面热力作用的影响不大,同时都受同一个天气系统影响,所以在一定的误差范围内两种结果具有一定的可比性。近地面风、温资料由中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔测量得到,该塔与激光雷达观测点相距 5~6 km,虽然下垫面物理特性稍有不同,可能导致边界层高度有 5~20 m 的差别,但同

属城市地区,其对比差异在误差允许范围内可以接受。利用塔上 8~320 m 共分 15 层的风温资料做 30 min 平均用于分析混合层的演变并计算通风系数。

激光雷达测点北京大学位于北京海淀地区,根据该地区长期统计的气候特征,海淀地区的主导风向分别为偏南风 and 偏北风^[15]。秋冬型的风速日变化较小,风向较稳定,主要为西北和偏北风,表明该地区秋、冬季受系统偏北大风影响。春、夏季则有明显的风向、风速日变化,且白天基本是偏南风,夜间为偏北风,风速小,充分反映了当地热力作用下山地-平原风的中尺度环流和日夜演变^[16]。

3 反演方法

由激光雷达回波信号可以直观看出边界层演化的一般特征。图 1a 中展示不稳定大气边界层中一个传统的热动力模式^[14],近地面的对数递减层很快混合为常数层,上面的一个稳定层象一个盖子一样阻止了空气的垂直运动,这个模式是几乎所有边界层模式的基础。图 1b 给出的是 2002 年 4 月 18 日激光雷达距离订正信号强度的时空分布,在某一距离 r 处激光雷达返回信号是每微秒的光子数,经过噪音订正与距离订正的信号以不同的颜色显示在图中,深色表示很高的信号强度。混合层内的激光

雷达回波廓线与模式中的位温廓线具有类似的特征。白天,强烈的地面加热导致热力对流,热力和机械湍流的综合作用使得混合层内粒子和气体均匀混合,混合层顶覆盖着一层逆温层,该层阻止了混合层以上的空气夹卷入内。然而上午由于湍流作用上层逆温层强度较弱,混合层高度升高很快,午后热力混合作用逐渐降低,地面产生的气溶胶被限制到最低层。00:00~08:00(北京时,下同)边界层是稳定的,

边界层高度几乎保持定常,09:00后混合层迅速发展,到14:00抬升到最高1.5 km。从图1b中看到04:30~06:00的气溶胶垂直分布呈多层排列结构,同时铁塔观测到多层逆温,在不同天气条件下城市边界层温度垂直结构特征差异大,有时会出现多层逆温的现象^[17],这表明温度层结与气溶胶堆积有很好的相关性。

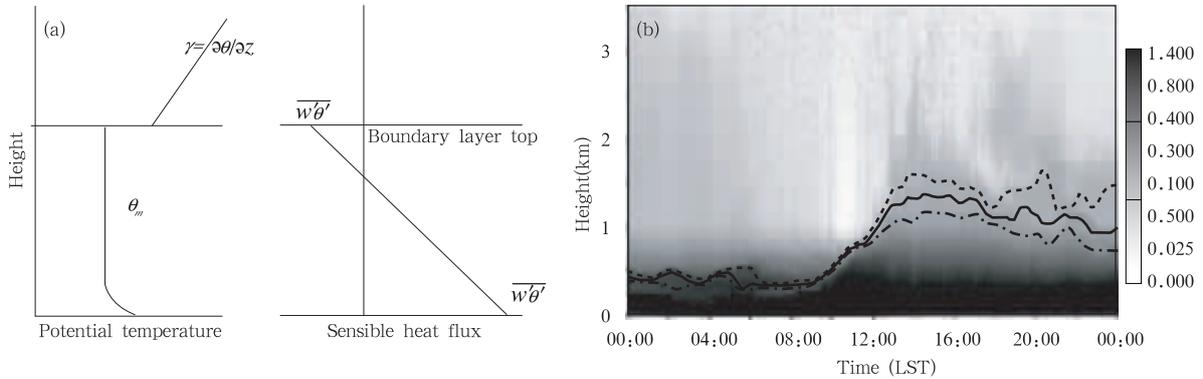


图1 混合层发展模式 and 距离订正 Lidar 信号

(a. 混合层发展零阶模式模型, b. lidar 观测混合层日变化, 实线、虚线和点划线分别为阈值法及阈值的±20%所决定的混合层高度)

Fig. 1 A traditional thermodynamic model of an unstable atmospheric boundary layer and time-height cross section of the range-corrected lidar signal; (a) zero-order jump model applied to (left) and to (right); (b) time-height cross section of the range-corrected lidar signal and the mixed layer height determined from a threshold on the backscatter signal (solid curve) and from ±20% of the threshold on the backscatter signal (dashed curve and dashed-dotted curve)

从距离订正信号图中可以估计出混合层的垂直延伸范围,然而这种可视化估计是主观的,尤其在颜色对比不强烈的区域上,仅由图像很难得出正确的结果,而且对于这种长期的大气监测,经常要用其他设备取得的数据与它联合分析^[18],为了方便数据分析并和其他探测设备数据相互比较,必须寻求一种可靠的自动判别混合层高度的方法。Melfi 用阈值法,即把混合层高度定义为超过自由对流层中的距离订正信号强度 25% 的第一个点所在的高度^[19]。利用这种方法计算的混合层高度也在图 1b 中画出,数据处理包括滤波和定义代表高浓度向低浓度转变的信号强度阈值标准,中间线表示混合层高度,而上下两虚线表示取阈值的±20%所在高度。可以看到这种定义辨别夜间边界层高度较理想,因为这时逆温层靠近地面,气溶胶分布较集中,而到了白天由于混合层的发展使得气溶胶被稀释,夹卷层变厚,阈值法确定混合层高度的精度便会降低,而且在遇到驻留层的情况往往得出错误的结果。

导数法利用距离订正信号的垂直梯度分析气溶

胶分布的空间结构时,梯度本身包含着信号强度的信息,而信号强度随时空有变化,故梯度也不是一个很好的指标。因此这里引入归一化梯度进行客观分析。

激光雷达接收到的大气散射原始信号可以写为:

$$P(z) = [(O_c(z)CE\beta(z)T^2/z^2) + n_b(z) + n_{ap}(z)]/D_{TC}[P(z)] \quad (1)$$

其中 $T^2 = \exp[-2\int_0^r \sigma(r')dr']$ 为大气透过率,其中 $\sigma(r)$ 为距离 r 处的消光系数; $P(z)$ 是雷达探测器接收的光电子数(phe/ μ s),即激光雷达接收的 z 高度处的返回信号; $O_c(z)$ 是填充订正函数,MPL 虽然是同轴雷达,但由于出射激光和接收器的立体角分别为 50μ rad 和 100μ rad,发射和散射的区域在空间中有不重叠部分,二者的空间在一定距离 R_0 处交叉,大于 R_0 的空间,接收区域大于发射区域,该项因子为 1,这是相对于一般双轴激光雷达重叠区订正的优越之处,小于 R_0 的区域,接收区小于发射区域, $O_c(z)$ 小于 1,此时的数值必须通过实验来确定;

C 是系统常数; E 是发射的激光脉冲能量(μJ); $\beta(z)$ 是气溶胶和大气总的后向散射系数(k/m); z 是探测体与接收器望远镜之间的距离, 由于探头记数时刻超前于激光发射器开始发射脉冲信号的时刻, 回波信号的距离定位与探测体实际距离会产生偏移, 我们使用的 MPL 的时间延迟是 $10 \mu\text{s}$, 相应的距离偏移为 60 m 左右, 当空间采样为 30 m 时, 必须进行距离偏移修正, 偏移的大小可通过对一段时间的激光雷达信号的平均后, 去掉第一个峰值以前的几个数据来获得。虽然 MPL 的出射激光角度比较小, 但仍为球面波, 发射能量随距离平方而减小, 因此要做距离修正; $n_b(z)$ 是背景噪音($\text{phe}/\mu\text{s}$), 尤其在白天的观测, 太阳光的强烈背景导致这一项比较大, 一般认为该项随距离变化不大, 将探测距离设为 60 km 时, 最后 5 km 的数值平均可作为该项的大小; $n_{ap}(z)$ 是探测器寄生脉冲修正($\text{phe}/\mu\text{s}$), 是由于内部光学器件的噪声造成的, 一般通过瞄准障碍物的观测来获得超出障碍物以外距离处的订正值, SESI 公司(Science & Engineering Service, Inc.) 建议直接将工作中的 MPL 用盖子盖住 10 min 得到平均值来获取该数值的分布, 但时间太长有可能对激光探头造成伤害; $DTC[P(z)]$ (记为 $D_{TC}[P(z)]$) 是探测器延时修正函数, 是因激光探头光子记数与实际接收能量的非线性关系引起, 由激光探头的厂家标定。

式(1)经过上述几项修正得到标准的距离订正信号:

$$X(z) = \{P(z) \times D_{TC}[P(z)] - n_b(z) - n_{ap}(z)\} \times z^2 \quad (2)$$

这个值随高度的变化表征了实际大气中的气溶胶的垂直分布特征, 要取得气溶胶的更细化的特点(如吸收系数和后向散射系数)则须分别考虑 $\beta(z)$ 和 T^2 的物理意义, 但应用于混合层这样一个整体, 只关心这两个物理量的综合变化就可以满足应用要求, 反映到具体算法, 就是针对距离订正信号 $X(z)$ 做进一步的数学分析, 那么距离订正信号随高度的归一化梯度 N_{SG} 定义为

$$N_{SG}(z) = \Delta X(z) / [\Delta z \times X(z)] \quad (3)$$

其中高度的间隔 Δz 为激光雷达的距离分辨率。

与导数法一样, 归一化距离订正信号梯度最小值所在高度对应混合层高度, 这种客观方法得到的是大气气溶胶垂直廓线的相对变化, 排除了信号强度时空变化的影响并进一步消除了激光雷达系统修正的影响, 其优点在于不要求激光雷达信号的绝对标定, 同时激光雷达出射能量的变化也不会影响结果的准确性, 而在反演消光系数等物理量时激光雷达的参数是要经常标定的^[20]。图 2 是用 4 月 18 日 20:00 的激光雷达和探空数据做的对比分析, 其中图 2a 和 2b 中的实线是距离订正信号廓线, 图 2a 中虚线是距离订正信号的梯度, 图 2b 中虚线为距离订正信号的归一化梯度。由于填充订正采用经验公式, 激光雷达回波廓线在混合层下部的偏差较大, 即

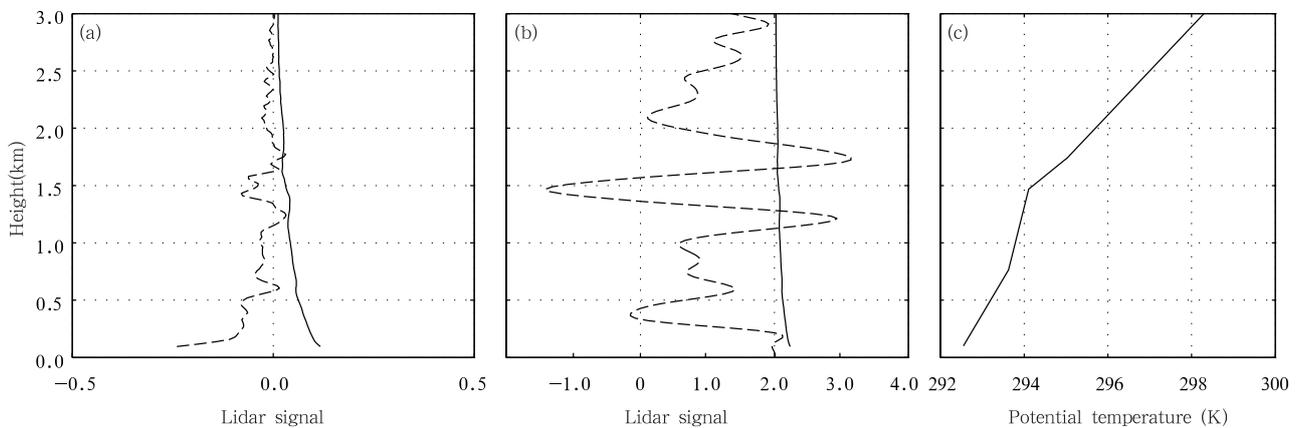


图 2 导数法和归一化梯度法反演混合层高度与探空位温廓线的对比

(各图的纵轴相同; a. 利用梯度法由距离订正信号(实线)得出的一阶导数(虚线), b. 利用归一化梯度法由距离订正信号(实线)得出的信号变化强度(虚线), c. 20:00 探空得到的位温廓线)

Fig. 2 Retrieval methods of the mixed layer height (MLH) using the range corrected signal (RCS)

(a. profile of the first derivative of the RCS, b. profile of the normalized first derivative of the RCS, MLH is taken as the lowest data point of the negative part of the signal gradient profile, c. potential temperature sounding measured at Beijing at 2000LST.

The value of the MLH inferred from the sounding is 1.5 km and should be compared with that of (b). In this example, the MLH is determined to be 1.5 km from the normalized first derivative and 0.095 km from the first derivative of the RCS)

使在混合发展最旺盛的时候近地面处仍然有很大的递减,无法确定准确的探测下限。采用归一化方法,可以看出填充订正结果较为正确的高度,在此高度下的激光雷达数据是不适合分析的。另外,归一化梯度法突出了高层气溶胶浓度的变化,同时抑制了低层由于以下原因造成的不恰当极值的出现:低层靠近地面,受地面气溶胶源和地形扰动的影响,容易产生垂直分布不均,这种不均性有时可以超过混合层顶处气溶胶浓度的突变。因此该方法有效消除了多种误差影响,实现了自动判别混合层高度。最后对归一化梯度进行低通滤波以消除由信噪比引起的伪峰值。

图 2b 得出混合层高度为 1.5 km,当日 20 时的探空位温廓线也标示在图 2c 中,强逆温高度在 1.5 km 左右,这与 MPL 的反演结果一致。为了进

一步考察反演方法的适用性,我们把 2002 年 3 月 26 日(图 3a)和 4 月 4 日(图 3b)08:00 的反演结果放在图 3 中,3 月 26 日探空得到的混合层高度是 0.472 km,归一化法反演的高度是 0.491 km,同 4 月 18 日一样,导数法的结果为激光雷达探测下限,没有表现出气溶胶垂直结构的真实变化。从图 3b 看到,4 月 4 日探空结果为 0.384 km,同时两种方法都得到了较一致的反演结果,导数法和归一化法分别为 0.371 和 0.407 km。另外从归一化法反演的梯度廓线中看到在 2 km 附近有大的极值出现,它的数值甚至超过了实际混合层顶的梯度变化,这是由于云对激光雷达信号的影响造成的,可以通过对 RCS 的观察手动剔除它的影响,但是当混合层顶和云相隔距离较近时,主观判断的困难增大导致反演结果误差会很大。

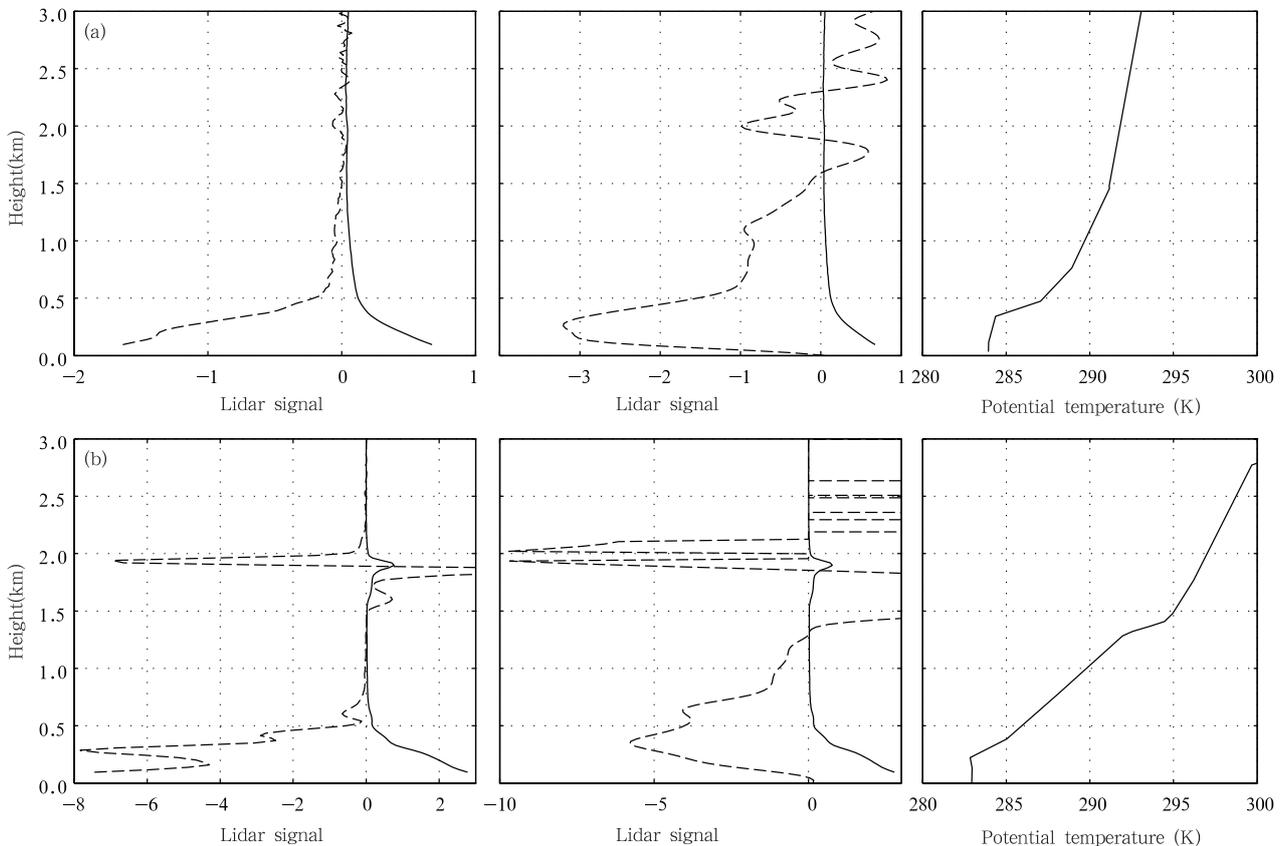


图 3 同图 2,2002 年 3 月 26 日(a)和 4 月 4 日 08 时(b)(地方时)的探空和遥感结果

Fig. 3 Same as Fig. 2, observed at 08:00 BST on 26 Mar 2002 (a) and on 4 Apr 2002 (b)

在表 2 所列日期范围中选取一些适合计算混合层高度的探空数据得到实测的结果,把它与上述两种方法反演的结果做对比(图 4)。由于探空数据只有 08:00 和 20:00 两次,故计算混合层高度只能在

早晚时段,这个时段的混合层高度一般较低,所以图中的数据点多集中在 0.5 km 以下。图中实线为归一化法得到的结果与实测结果的线性拟合,它们的相关系数是 0.96,而导数法的结果与实测结果的相关

关系数是 0.47。同时可以看到导数法得到的混合层高度中有 7 个样本均位于 0.095 km 的激光雷达探测下限,这是由于填充订正的误差使得导数法反演混合层高度失效, $\frac{\partial X}{\partial z}$ 的最小值位于廓线的最低处,没有反映出混合层的实际结构特征。图中也可以看到,利用导数法得到的大多数高度位于 1:1 的相关线下方,表明该方法的反演结果系统偏低,因为梯度廓线中包含了回波强度的绝对量,而一般讲低层比高层的回波强度大,混合层内的气溶胶浓度随高度的波动很容易掩盖混合层高度的真实变化。最后由 t 检验(双因素对比试验结果的 t 检验)的方法分析所得到的混合层高度和实测值的误差,归一化法 $t=0.54$,导数法 $t=2.72$,样本数为 36 时查 t 检验表得 $t_{0.05}=2.042$,由 $t_{\text{归一化}} < t_{0.05} < t_{\text{导数}}$ 的关系可以看出,归一化法计算的混合层高度与实测值没有产生显著性差异,而导数法结果则与实测值相比差异显著。分别计算两种方法结果与实测值的均方根偏差(rms)可看出,从导数法的 310.4 m 下降到归一化法的 99.4 m,说明后者比前者更接近实际值。

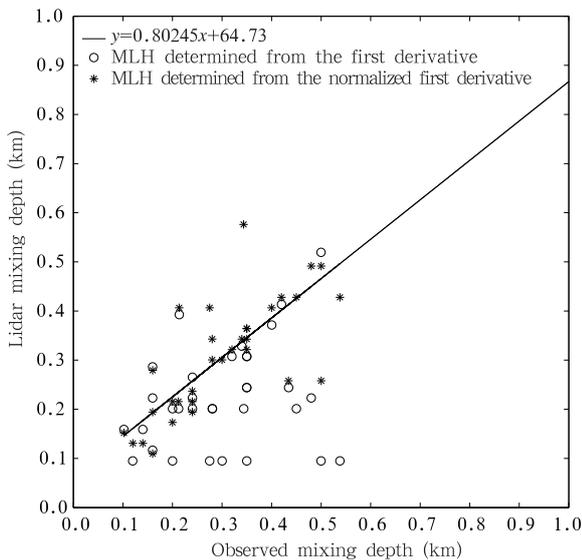


图 4 激光雷达廓线反演和探空取得的混合层高度
Fig. 4 Scatter plot comparing the mixing depths determined by MPL and temperature soundings

4 反演结果

图 5 实线是利用新方法反演的 2002 年 4 月 18 日混合层高度的日变化。对时间序列进行趋势分析表明混合层高度从夜间到白天是增加的(如点划线所示),其抬升分为 4 个阶段:(1)浅混合层形成并缓

慢加深;(2)混合层厚度急剧增长;(3)形成接近常值厚度的混合层;(4)湍流衰减时混合层的下降。日出后混合层高度迅速增长,到 14:50 达到最大 2.2 km,虽然温度到 17:00 还在增长,而 MPL 测得此时的混合层高度的增长率已经下降,随后混合层高度缓慢降低,21:00 后混合层高度的再次抬升是驻留层的影响,不是实际的混合层高度。增长率是开始混合到达到最大高度过程中混合层高度的抬升速度,由当天的反演结果计算得到增长时期的增长率为 281 m/h。结合气象塔的 240 m 处的风向、风速和温度 30 min 的平均数据分析混合层高度的变化,清晨 04:00~08:00 风向改变很大,强烈的风切变造成这个时段的混合层高度波动很大,12:00 以后风向变得稳定、气温为日最高,相应地,混合层高度达到最大值。17:00 后风速再次增加,风向由西改北,这表明混合层以上的大气是不稳定的,气溶胶粒子 17:00~19:00 一直悬浮着,使得混合层高度一直维持在 1 km 附近,不同于典型的下降过程。为了说明混合层高度与近地面消光系数的关系,利用文献[21]提出的方法反演了气溶胶消光系数和气溶胶光学厚度。图中的虚线表示当日距地面 0.2 km 处的消光系数,夜间消光系数在某一固定值附近做微弱波动,这是由于上层空气的平流作用带来的其他地方的气溶胶团影响了本地的气溶胶垂直结构,而午

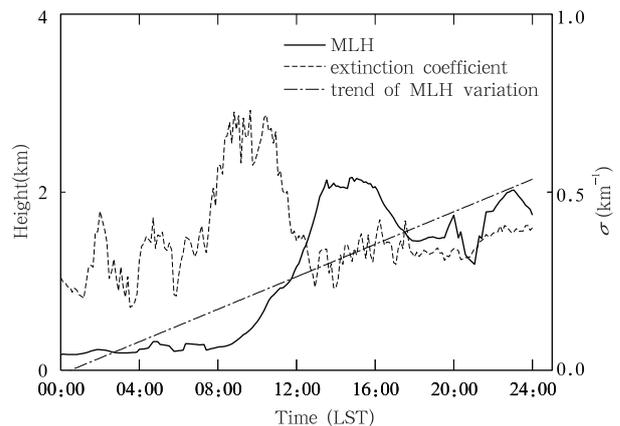


图 5 4 月 18 日混合层高度和 0.2 km 高度处消光系数的日变化

Fig. 5 Diurnal variations of MLH(solid line)and extinction coefficient(dash line) for 18 Apr 2002(The dash-dot line is the trend of MLH variation. The legends in the upper left are maximum mixing depth (MMD), the time mixing depth reached maximum and the growth rate of MLH calculated using the data from the onset of mixing to the establishment of the maximum MLH, respectively; σ is extinction coefficient)

后大气混合均匀使得消光系数变化平缓。清晨大气运动较弱,随着日出大气被加热,对流运动增强,地表面的颗粒物被带到空中,使得近地面的粒子浓度变小,高处的粒子浓度增加,随着混合层顶的抬升,上层空气的消光系数也逐渐增大。但是整层大气气溶胶光学厚度日变化与近地面消光系数变化不相同,甚至相反。当日整层气溶胶光学厚度随时间有一些起伏,除了 07:00~08:00 稍有下降,总趋势是随时间增大的,而近地面消光系数在 10:00 后随时间是连续下降的,特别是上午 07:00~10:00 消光系数有一峰值,这与当时的交通与人类活动的排放有关,另外这一时段的混合层高度很低也限制了气溶胶的向上扩散,从而在近地面产生堆积,造成消光系数的激增。

选择激光雷达测站上空无云影响的晴天的 MPL 数据,利用本文提出的方法反演出每日从日出到日落时段的混合层高度,观测期间符合条件的日期列在表 2。

表 2 被选择的适合分析混合层月季特征的日期
Table 2 Sunny days chosen between Mar and Oct 2002

月份	3	4	5	7	8	9	10
日期	24	4	1	14	11	5	2
	26	6	24	20	12	6	8
	30	7		21	23	7	
		11		23	26	9	
		12		25		12	
		14		26		14	
		16		29		15	
		18				16	
		24				21	
		27				26	
		30				29	
						30	

最大混合层高度是反映日间边界层大气特征的重要气象参数,也是空气污染潜势预报必须考虑的重要因素,分析数据集看到混合层高度在夏季中午达到最大值,而在冬季要到下午某时才能达到最大值。大多数月份的混合层高度在早晨增长缓慢,尤其是冬季受到夜间稳定边界层的影响时这种情况更明显。图 6 是混合层高度增长率和最大混合层高度月平均图,实线是最大混合层高度,虚线是混合层高度增长率,左轴是高度标尺,右轴是增长率标尺。从图中看出混合层高度在 5 月最高,达到 2.026 km,9 月和早春较高,10 月最低,春季和秋季是两个峰值,

这与文献[22]的结果较一致。图中看到增长率与最大混合层高度具有相同的变化趋势,同样在 5 月份具有最大抬升速度 282.4 m/h,说明混合层高度的增长速度影响其最终的发展极限。虽然在冬季混合层有较长时间的发展,但其热力支撑的湍流动力不强,不能把气溶胶推向更高层,所以冬季的平均最大混合层高度低于其他季节,这也说明混合层发展时间的长短与最大高度相关性小。图 7 描述了最大混合层高度出现时间的月变化。由图上可看出,出现时间从冬季到夏季有逐渐提前的趋势,冬末春初时间最迟,4 月份要到 14:20 混合层才能达到最高,而 8,9 月份在 13:30 混合层就已经发展到极限了。3 和 5 月由于样本较少,可能代表性差一些,这种变化趋势与日出时间的早晚相对应,日出后加热地面,地面热通量驱动混合层的形成和发展,说明了地面热力作用是混合层发展的决定因素。

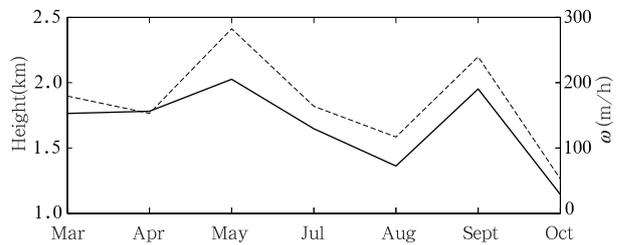


图 6 混合层高度增长率和最大混合层高度月平均值
(实线是最大混合层高度,虚线是混合层高度增长率)
Fig. 6 Monthly average of the growth rate of the MLH and the maximum MLH between Mar and Oct 2002

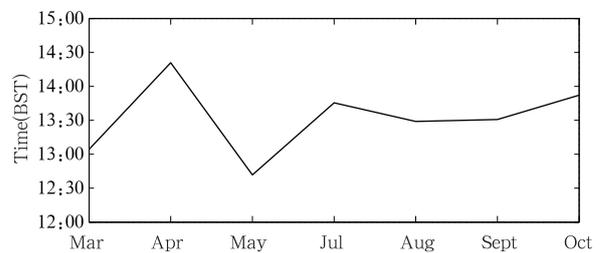


图 7 最大混合层高度出现时间的月变化
Fig. 7 Monthly average of the time when maximum MLH is reached between Mar and Oct 2002

通风系数表示混合层中污染物的传输速率^[23],通风系数越高,大气处理污染的能力越强,因而污染越小,空气质量越好^[24]。利用激光雷达反演的混合层高度计算通风系数有明显的优越性,因为激光雷

达的高时间分辨率提供了混合层的连续变化,配合同步风的观测可得到该系数精确的演变特征。图 8 给出了 3 月 24 日通风系数、混合层高度和混合层平

均风速的日变化。由图中可看出通风系数的变化与平均风速变化的关系比它与混合层高度的关系更密切,这与文献[25]的结果一致。

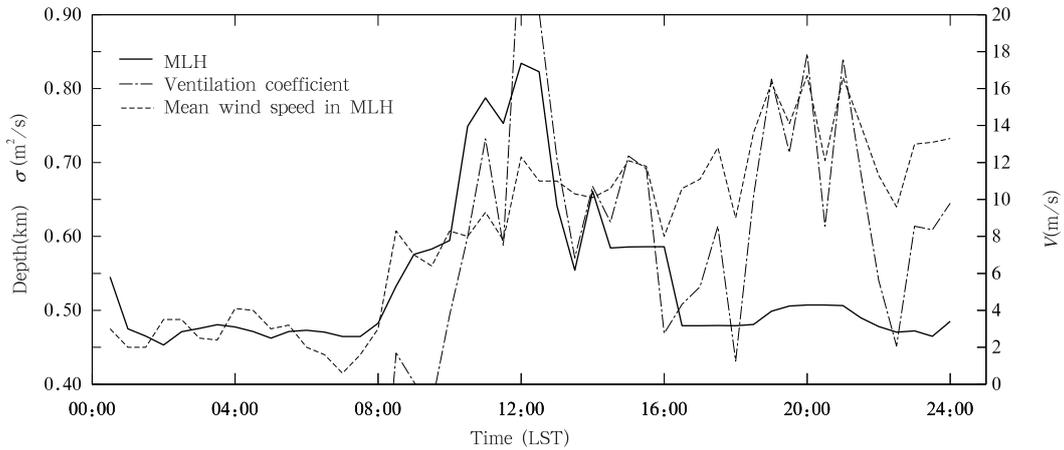


图 8 3 月 24 日通风系数(σ)、混合层高度和混合层平均风速的日变化
(其中通风系数的数值乘以 10^4 为实际量)

Fig. 8 Diurnal variations in ventilation coefficient(σ), mixing depth and mean wind speed observed on 24 Mar 2002 at Beijing

5 结论与讨论

文中我们利用 MPL 数据分析了北京地区混合层高度及其结构的演化特点。提出一个自动方法反演了混合层高度,选择观测期间的晴天条件下由 MPL 测量的数据计算混合层高度,并把反演结果与其他手段的探测结果作了对比,结果表明本文提出的方法对反演城市地区的混合层高度是可靠的,从这些数据中分析了本地混合层高度的日变化和季节变化。混合层的发展与气溶胶光学厚度的演变有一致性,最大混合层高度的变化在观测期间有两个峰值,5 月和 9 月最大,10 月最小,一天中增长率的大小与最大混合层高度出现时间的早晚是正相关的,从季节变化看最大混合层高度的出现时间有从春季到夏季逐渐提前的趋势,说明混合层的发展与气象条件的季节性有关。

由距离订正信号归一化梯度最小值所在位置可知混合层高度,这个高度对应着位温的跃变和风切变。我们在混合层内有时可以看到归一化梯度廓线有几个较明显的极值,这表明在某种气象条件下,大气边界层的垂直结构是由大量连续的混合层构成,也许第一二层混合层是起源于本地排放,而高层混合层是结合局地排放、平流和其他地区的混合综合形成的。混合层下降阶段也观测到混合层上部与整体分

离而形成驻留层,该层是中性层结,湍流较弱且很均匀,与其下面的混合层湍流状况不一样,这层气溶胶随着时间下降缓慢,有时甚至继续抬升,它可以解释污染物移出过程以及混入自由对流层中的过程^[26]。

在气溶胶化学组成和成分不变的情况下,激光雷达返回信号及其归一化梯度的变化由气溶胶后向散射系数的变化造成的,但根本原因是两个因素:粒子浓度和空气湿度的改变,而且湿度的变化还会导致粒子谱的改变^[27],因此在利用激光雷达研究混合层结构的时候也应该考虑到湿度的影响。

夜间边界层的演化是由地面和近地面的空气辐射降温触发的,从日落到日出夜间边界层随地面条件的改变而变化强烈,增长、下沉,再次增长,一夜之间有多次变化^[28,29]。白天对流活动抬升的气溶胶到了夜间会在大气低层悬浮很长时间,而地面的辐射逆温抑制对流混合,地面产生的气溶胶会被限制在底层,悬浮气溶胶层只能以水平平流的形式停留在夜间边界层顶以上,其发展动力主要由风切变提供^[30,31]。虽然平流和下沉是高层气溶胶的主要演化特征,但地形特征导致局地热力动力强迫也能影响夜间边界层的特征。人们对白天混合层发展的研究很深入,而对夜间边界层很少研究,因为夜间边界层的研究有一定困难,一方面日落后湍流变弱,另一方面夜间边界层中有各种尺度的不稳定发展,如风

切变和 Helmholtz 波,但是这些问题也使得声雷达更适合遥感夜间边界层的特点,因为它比激光雷达具有更高的距离分辨率和更低的探测下限^[14]。

从 9 月 9 日激光雷达的距离订正信号图中也看到另一个有趣的现象,00:00~03:00 存在一个周期为 1 h 的振荡,振幅约 0.2 km,这可能是过山气流的非静力波动产生重力内波^[32],针对这种现象我们将在以后的研究中做更深入的分析。

通过分析长期的激光雷达探测数据,我们发现自动取得边界层高度存在以下几个困难:(1)边界层的复杂多变导致边界层演化类型的多样性,一种反演技术不能适用于各种环境;(2)边界层的非静态性使得判断边界层高度的标准变得复杂;(3)几种不同的气象条件可以导致同一种类型的边界层结构,故边界层结构廓线的形状和引发它的形势不是一一对应的关系;(4)实测廓线的外形很少是理想分布的,因此从廓线中分析出各自特征对确定判别标准很关键;(5)用自动算法正确区分出混合层顶和它上面的气溶胶层一直是研究的一个难点;(6)混合层顶上的云的存在往往使自动算法失效,混合层云的出现使激光雷达信号发生强烈的变化,此时对混合层高度的计算偏差会很大;(7)在实际应用中,当噪音影响很大时边界层垂直结构的真实变化会被杂乱无章的变化掩盖,因此在激光雷达数据的预处理时应该考虑一个合适的滤波算法。

整个分析结果表明连续长期的观测可以看出混合层的演变特征,但由于有的月份数据样本较少,结果可能缺乏代表性,进一步工作应该利用更长时间的观测,取得更完善的资料,从而更客观地分析混合层的变化规律。因此 MPL 可用于研究城市混合层的演变,同时要结合 MPL 的长期观测结果和相关气象数据才能更深入理解混合层的日季特点。

致谢:北京应用气象研究所赵增亮博士提供探空资料,北京大学王宝民和孙学金博士给予很多有价值的意见。

参考文献

- [1] Beniston M, Wolf J P, et al. Use of lidar measurements and numerical models in air pollution research. *J Geophys Res*, 1990, 95: 9879—9894
- [2] Parikh N C, Parikh J A. Systematic tracking of boundary layer aerosols with laser radar. *Opt Laser Technol*, 2002, 34 (2): 177—185
- [3] Bhumralkar C M. Parameterization of the planetary boundary layer in atmospheric general circulation models. *Rec Geophys Space Phys*, 1976, 14: 215—226
- [4] White A B, Senff C J, Banta R M. A comparison of mixing depths observed by ground-based wind profilers and an airborne lidar. *J Atmos Ocean Tech*, 1999, 16 (5): 584—590
- [5] Kunkel K E, Eloranta E W, Shipley S T. Lidar observations of the convective boundary layer. *J Appl Meteor*, 1977, 16: 1306—1311
- [6] Boers R, Eloranta E W, Coulter R L. Lidar observations of mixed layer dynamics: tests of parameterized entrainment models of mixed layer growth rate. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23: 247—266
- [7] Mel S H, Spinhirne J D, Chou S H, et al. Lidar observations of the vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean. *J Climate Appl Meteor*, 1985, 24: 806—821
- [8] Hoff R M, GuiseBagley L, Staebler R M, et al. Lidar, nephelometer, and in situ aerosol experiments in southern Ontario. *J Geophys Res—Atmos*, 1996, 101 (D14): 19199—19209
- [9] Hayden K L, Anlauf K G, Hoff R M, et al. The vertical chemical and meteorological structure of the boundary layer in the Lower Fraser Valley during Pacific '93. *Atmos Environ*, 1997, 31 (14): 2089—2105
- [10] Flamant C, Pelon J, Flamant P H, et al. Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer. *Bound-Layer Meteor*, 1997, 83 (2): 247—284
- [11] Coulter R L. A comparison of the three methods for measuring mixing-layer height. *J Appl Meteor*, 1979, 18: 1495—1499
- [12] Marsik F J, Fischer K W, McDonald T D, et al. Comparison of the methods for estimating mixing height used during the 1992 Atlanta field intensive. *J Appl Meteor*, 1992, 34: 1802—1814
- [13] Spinhirne J D. Micro pulse lidar. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1993, 31(1): 48—54
- [14] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988
- [15] 佟华, 刘辉志, 胡非等. 城市规划对大气环境变化及空气质量的影响. *气候与环境研究*, 2003, 8(2): 167—179
Tong Hua, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. The impact of city programming on the atmospheric environment and air quality in urban area. *Climate Environ Res (in Chinese)*, 2003, 8 (2): 167—179
- [16] 蔡旭晖, 郭昱, 刘辉志. 北京地区低层大气流动模态研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(3): 387—392
Cai Xuhui, Guo Yu, Liu Huizhi, et al. Flow patterns of lower atmosphere over Beijing area. *Acta Sci Naturalium Univer Pekinensis (in Chinese)*, 2002, 38(3): 387—392
- [17] 徐德祥, 丁国安, 周丽等. 北京城市冬季大气污染动力: 化学过程区域性三维结构特征. *科学通报*, 2003, 48(5): 496—

- 501
 Xu Xiangde, Ding Guoan, Zhou Li, et al. Localized 3D-structural features of dynamic-chemical processes of urban air pollution in Beijing winter. *Chinese Sci Bulletin(in Chinese)*, 2003, 48(8): 819—825
- [18] Siebert P, Beyrich F, Gryning S, et al. Review and inter-comparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmos Environ*, 2000, 34: 1001—1027
- [19] Melfi S H, Spinhirne J D, Chou S H, et al. Lidar observations of the vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean. *J Climate Appl Meteor*, 1985, 24: 806—821
- [20] Voss K J, Welton E J, Quinn P K, et al. Lidar measurements during aerosols99. *J Geophys Res*, 2001, 106 (D18): 20821—20831
- [21] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar return. *Applied Optics*, 1981, 20: 211—220
- [22] Chen W B, Kuze H, Uchiyama A, et al. One-year observation of urban mixed layer characteristics at Tsukuba, Japan using a micro pulse lidar. *Atmos Environ*, 2001, 35 (25): 4273—4280
- [23] Holzworth G C. Mixing heights, wind speeds and potential for urban air pollution throughout the contiguous United States. US: Office of Air Programs, 1972, 101ppJP
- [24] Gross E. The national air pollution potential forecast program. US: Dept of Commerce, 1990. 47pp
- [25] Devara P C S, Mahes Kumar R S, Pandithurai G, et al. Lidar study of air quality in the atmospheric boundary layer. In: Gupta R K, Reddy S J, eds. *Advanced Technologies in Meteorology*. New Delhi: M/s Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1995. 371pp(ebook)
- [26] Kossmann M, Corsmeier U, de Wekker S F J, et al. Observations of handover processes between the atmospheric boundary layer and the free troposphere over mountainous terrain. *Contr Atmos Phys*, 1999, 72: 329—350
- [27] Fitzgerald J W, Hoppel W A, Vietti M A. The size and scattering coefficient of urban aerosol-particles at Washington, DC as a function of relative-humidity. *J Atmos Sci*, 1982, 39 (8): 1838—1852
- [28] Devara P C S, Raj P E, Murthy B S, et al. Intercomparison of nocturnal lower-atmospheric structure observed with lidar and sodar techniques at Pune, India. *J Appl Meteorol*, 1995a, 34: 1375—1383
- [29] Devara P C S, Raj P E, Sharma S, et al. Real-time monitoring of atmospheric aerosols using a computer-controlled lidar. *Atmos Environ*, 1995b, 29: 2205—2215
- [30] Mahrt L, Heald R C, Lenschow D H, et al. An observational study of the nocturnal boundary layer. *Bound-Layer Met*, 1979, 17: 247—264
- [31] Mahrt L. Vertical structure and turbulence in the very stable boundary layer. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 2332—2349
- [32] 刘辉志, 洪钟祥, 桑建国等. 地形引起的重力内波的水槽实验. *气象学报*, 2001, 59(1): 59—65
- Liu Huizhi, Hong Zhongxiang, Sang Jianguo, et al. A fluid experiment of gravity internal wave induced by terrain. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2001, 59(1): 59—65

OBSERVATION OF URBAN MIXED LAYER AT BEIJING USING A MICRO PULSE LIDAR

He Qianshan Mao Jietai

(Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

About one-year characteristics of the mixed layer was observed by an eye-safe, compact Micro Pulse Lidar (MPL) at Peking University. A retrieval method of the Mixed Layer Height (MLH) which reduces error of instrument correction is presented. Three case studies were carried out using the data observed on 24 Mar, 4 Apr and 18 Apr 2002. Comparisons were made between the new method calculations, the results of the retrieval method developed by Hoff et al. (1996) and the rawinsonde data. The results showed that MLH derived from lidar data using the normalized first derivative method agrees well with that from rawinsonde data. The correlation coefficient and rms errors that characterize the MLH retrievals with the new method and the rawinsonde data in Beijing were 0.94 and 99.4 m; with the first derivative method and the rawinsonde data, they were 0.47 and 310.4 m, respectively. MLH and its growth rate under clearness

and cloudless condition were estimated from the MPL measurement. The characteristics of diurnal and seasonal variation of MLH were derived with the data set, including the relation between the aerosol mass concentration and MLH, the diurnal variation of ventilation coefficient. The results were as follows: Annual variation of monthly mean maximum mixing depth (MMD) and the growth rate accorded with a double cycle pattern, that was, the minimum value of monthly mean MMD and growth rate occurred in October, but the maximum value of them occurred in May and September. The phase of annual variation of monthly mean growth rate was almost consistent with that of annual variation curve of monthly mean MMD. This showed that their positive correlation was remarkable. However, the annual variable tendency of the time mixing depth reached maximum was different from that of monthly mean MMD. In other words, the surface heat flux was a primary factor affecting MMD. The development of the mixed layer exhibited temporal behavior similar to that of the aerosol optical thickness calculated from the lidar measurement using the Klett method. It can be concluded from the diurnal variation of ventilation coefficient that the variations in ventilation coefficient followed more closely with the variations in average wind than those in mixing depth. Some relations between several parameters about mixed layer were obtained from backscatter of lidar. This work also demonstrated that a MPL is quite useful and predominant for long-term monitoring of the urban mixed layer.

Key words: Micro pulse lidar, Mixed layer height, Retrieval method, Diurnal and seasonal variation.

《气象学报》增设新栏目

根据中国气象学会第二十五届理事会《气象学报》编审委员会常务委员会 2005 年第二次会议讨论决定,自 2005 年第 5 期开始,《气象学报》开辟“综论”和“学术论坛”两个新栏目。“综论”栏目主要是系统地综合介绍作者在某个科学问题上的系统研究成果。

“学术论坛”栏目坚持“百家争鸣、百花齐放”的原则,发表新的科学思想,进行不同观点的学术论文,鼓励争鸣,为科学家们提供一个交流、讨论的园地,活跃学术气氛。

《气象学报》编辑部