

# 2011 春季北京大气边界层的激光雷达观测研究

闫宝东<sup>1</sup> 宋小全<sup>1</sup> 陈 超<sup>1</sup> 陈玉宝<sup>2</sup> 刘秉义<sup>1</sup> 刘智深<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266003)  
(<sup>2</sup> 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要** 2011 年 3 月 21 日至 4 月 19 日, 中国气象局气象探测中心利用车载多普勒测风激光雷达在北京观象台进行实验, 对大气边界层进行观测, 并利用激光雷达距离平方校正信号梯度法进行了大气边界层高度的反演与分析。激光雷达观测数据处理结果表明, 测量期间当地时间上午 8:00 和下午 8:00 的平均混合层高度或近地面稳定边界层高度分别为  $(1.44 \pm 0.75)$  km 和  $(2.23 \pm 1.13)$  km, 平均边界层高度分别为  $(2.88 \pm 0.92)$  km 和  $(3.37 \pm 0.82)$  km。对比同步探空气球数据, 激光雷达反演结果与由位温梯度、相对湿度梯度获取的平均混合层高度和边界层高度相比, 相关系数达 94%, 体现出较好的一致性。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 大气边界层; 混合层高度; 梯度法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.s128001

## Beijing Atmospheric Boundary Layer Observation with Lidar in 2011 Spring

Yan Baodong<sup>1</sup> Song Xiaoquan<sup>1</sup> Chen Chao<sup>1</sup> Chen Yubao<sup>2</sup> Liu Bingyi<sup>1</sup> Liu Zhishen<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)  
(<sup>2</sup> CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract** From Mar. 21 to Apr. 19 in 2011, atmospheric observations with mobile Doppler wind lidar at Beijing observatory are operated by China Meteorological Administration. Atmospheric boundary layer is observed and analyzed by the gradient of lidar range-corrected signal. The processed results of lidar observation data indicate that the average mixing layer or surface stable boundary layer height is  $(1.44 \pm 0.75)$  km at 8:00AM and  $(2.23 \pm 1.13)$  km at 8:00PM, the average atmospheric boundary layer height is  $(2.88 \pm 0.92)$  km at 8:00AM and  $(3.37 \pm 0.82)$  km at 8:00PM, respectively. Compared with the gradient of potential temperature and relative humidity of synchronous radiosonde, the correlation index is as much as 94%, which shows good consistency with lidar.

**Key words** remote sensing; lidar; atmospheric boundary layer; mixed layer height; gradient method

**OCIS codes** 010.3640; 010.0280; 010.1310

## 1 引 言

大气边界层 (ABL) 是对流层中直接受地面影响的一部分, 通过湍流等过程对地球表面和自由大气间的湿度、热量、动量等物理量进行运输和交换, 根据其内部层次的不同特点主要分为混合层 (ML)、残留层 (RL) 和稳定边界层 (SBL)<sup>[1]</sup>。边界层影响辐射收支、污染物的分布和扩散等重要过程,

与气候、生态以及航天工程等密切相关, 是大气科学的重要内容。

激光雷达是观测大气中气溶胶的有效工具<sup>[2~5]</sup>, 为大气边界层的研究提供了新的技术方法。边界层内集中了地球大气层中多数的气溶胶, 而气溶胶由于容易吸附水汽并在对流和风场等作用下形成反映边界层内部动力学以及结构特征的空间分

收稿日期: 2012-12-22; 收到修改稿日期: 2013-03-01

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (201205036-5) 和城市气象科学研究基金 (UMRF201002) 资助课题。

作者简介: 闫宝东 (1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: tid\_yan@163.com

导师简介: 宋小全 (1976—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光遥感遥测方面的研究。E-mail: songxq@ouc.edu.cn

(通信联系人)

布。激光雷达接收到的气溶胶后向散射信号强度反映了气溶胶在大气中的浓度分布和大气边界层结构信息,相应的,激光雷达后向散射信号廓线和后向散射信号的梯度被用来研究边界层的性质<sup>[6-9]</sup>。

2011年3月21日至4月19日,车载多普勒测风激光雷达在北京观象台(39°48'N,116°28'E)进行了探空对比实验。为了能有效与探空资料对比,激光雷达探测时间为当地时间上午约7:00~9:00和下午约7:00~9:00,与无线电探空仪的释放时间一致,释放地点与激光雷达水平距离约30 m。根据测量数据,利用激光雷达距离平方校正回波信号(RCS,  $S_{RC}$ )对数的梯度(GS,  $S_G$ )最小值法分析边界层结构<sup>[10]</sup>,并与根据探空仪数据得到的位温梯度最大值法和相对湿度梯度最小值法分析结果进行了比较。

## 2 车载多普勒测风激光雷达介绍

车载多普勒测风激光雷达系统主要由激光发射系统、信号接收系统、信号采集和处理系统及扫描控制系统组成,整个系统集成在一辆车中,以实现可移动测量<sup>[11]</sup>。车载测风激光雷达以单纵模的532 nm脉冲激光器作为探测光源,发射的激光经扩束后经过一个通光孔径为30 cm的高精度扫描转镜反射进入大气,大气后向散射信号通过28 cm直径的卡赛格林望远镜接收,经光电倍增管(PMT)把接收到的光子转为相应的电信号送给信号处理单元。探测过程中,可以获得气溶胶的空间分布信息。车载测风激光雷达系统的主要参数指标如表1所示。

表1 车载测风激光雷达系统的主要参数指标

Table 1 Main parameters and specifications of mobile Doppler wind lidar system

Parameter	Specification
Transmitting subsystem	
Wavelength /nm	532
Repetition rate /Hz	500
Pulse energy /mJ	8
Divergence full angle / $\mu$ rad	100
Receiving subsystem	
Telescope aperture /cm	28
Field of view / $\mu$ rad	200
Range resolution /m	10
Scanner	
Azimuth/elevation scanning speed /[( $^{\circ}$ )/s]	1~10
Azimuth/elevation scanning accuracy /( $^{\circ}$ )	0.1
Scanning mode	PPI,RHI,VOL

## 3 边界层高度反演方法

### 3.1 激光雷达距离平方校正信号梯度法

激光雷达接收到的后向散射信号可以反映大气气溶胶浓度分布和光学特性。激光雷达接收到的大气后向散射光子数  $N(\lambda, h)$  表示为

$$N(\lambda, h) = \frac{C}{h^2} P_0(\lambda, 0) [\beta_m(\lambda, h) + \beta_p(\lambda, h)] \times T^2(\lambda, h) + N_b, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $\beta_m(\lambda, h)$ 、 $\beta_p(\lambda, h)$  和  $T^2(\lambda, h)$  分别是距离激光雷达高度为  $h$  处大气分子、气溶胶粒子的后向散射系数和大气双程透射率,  $C$  是激光雷达系统常数,  $P_0(\lambda, 0)$  是激光束的出射功率,  $N_b$  为掺杂在接收到的信号中的背景光噪声和电气噪声之和。根据(1)式,距离平方校正信号定义为

$$S_{RC} = [N(\lambda, h) - N_b] h^2. \quad (2)$$

激光雷达后向散射信号在时间上的累积可以提高信噪比,平滑滤波可以去除信号中大气起伏引起的噪声,进一步计算之前需要对数据进行上述处理。距离平方校正信号取自然对数的垂直梯度为

$$S_G = d \lg(S_{RC}) / dh. \quad (3)$$

由于大气双程透射率  $T^2(\lambda, h)$  是消光系数沿激光路径积分的  $e$  指数,所以 GS 的表达式中消光系数呈线性形式<sup>[9]</sup>。GS 值的正负说明气溶胶浓度随高度增加或减小,其绝对值大小表示气溶胶浓度随高度变化的快慢。在气溶胶含量垂直分布比较均匀的层次,如混合层或边界层之上的自由大气(FA),GS 接近零值。在夜间,对流减弱,并由于地面长波辐射容易形成位于边界层底部的近地面稳定边界层。混合层或稳定边界层之上的残留层中悬浮着以微小速度下沉的微粒,层顶往往对应顶盖逆温。当气溶胶浓度从高向低明显变化时 GS 在对应高度范围内出现最小值,边界层中混合层、残留层以及自由

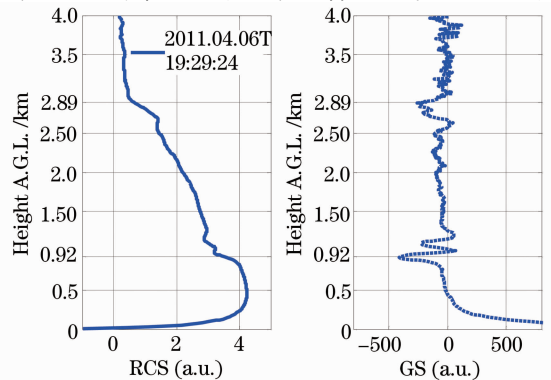


图1 2011年4月6日19:29的RCS和GS曲线

Fig. 1 RCS and GS profiles at 19:29 of April 6th, 2011

大气等层次之间过渡时会以此为特征。

图 1 是 2011 年 4 月 6 日 19:29 的 RCS 和对应的 GS 曲线,根据 GS 值在不同区域的最小值分别得到混合层层顶和残留层顶的高度分别为 0.92 km 和 2.89 km。

通过激光雷达连续观测可以了解边界层结构的时空变化情况。图 2 是 2011 年 4 月 15 日上午 6:45~7:00 的距离平方校正信号温度-湿度指数 (THI) 以及这段时间内平均的距离平方校正信号及其梯度曲线。

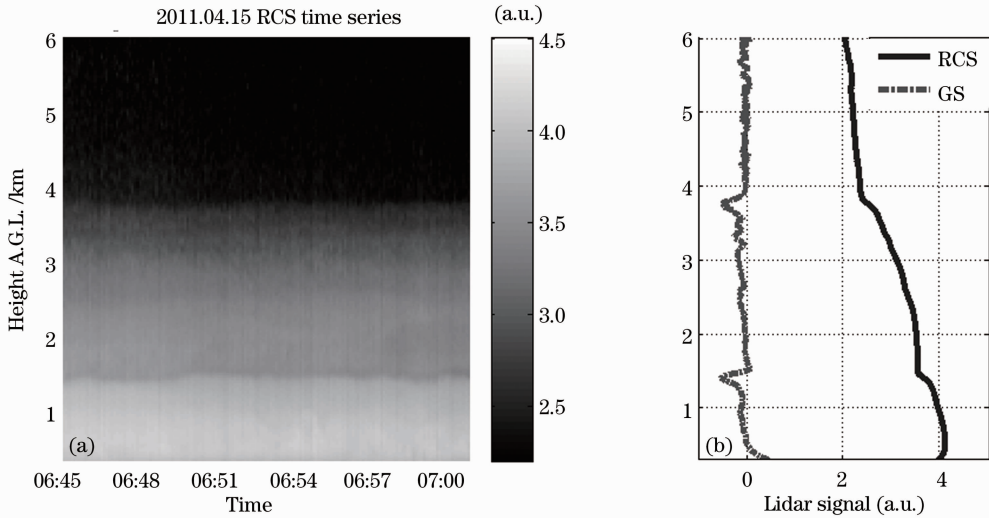


图 2 4 月 15 日距离平方校正信号 THI 图及平均 RCS 和对应 GS 曲线

Fig. 2 Lidar RCS THI and average RCS profiles versus GS profile at April 15th

距离平方校正信号 THI 图可以清晰地看出边界层不同层次的垂直分布范围,从时间分布看边界层结构在约 15 min 内变化较小。图 2 中 GS 曲线在 1.42 km 和 3.75 km 处有两个比较明显的局部最小值,参考探空数据得到的位温曲线,两个高度处的最小值分别对应混合层顶和残留层顶。

风速和风向等。位温垂直梯度(gPT)最大值对应高度表征大气从下部的不稳定区域过渡到上部较稳定区域<sup>[1]</sup>。激光雷达接收的后向散射信号强度与相对湿度(RH)密切相关<sup>[12]</sup>。相对湿度的垂直梯度(gRH)最小值对应高度也可用来分析大气边界层结构<sup>[13]</sup>。

### 3.2 激光雷达反演结果与探空数据的比较

现场同步探空数据包括温度、相对湿度、气压、

将 2011 年 3 月 31 日 19:40 的一组激光雷达数据得到的 GS 曲线,与由探空仪数据得到的 gPT、

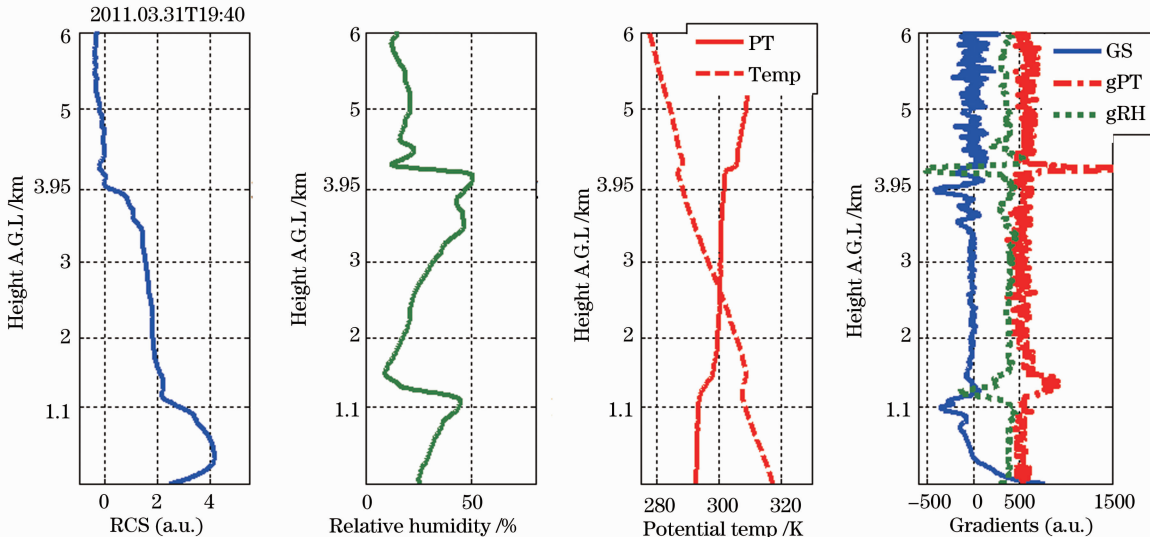


图 3 2011 年 3 月 31 日 19:40 边界层结构反演结果对比

Fig. 3 ABL structure retrieved result comparisons at 19:40 of Mar. 31th, 2011

gRH 曲线所反映的边界层结构相比较,如图 3 所示。

结果显示三种方法得到的边界层结构具有一致性。GS 曲线两个局部最小值对应 1.1 km 和 3.95 km; gPT 曲线局部最大值对应 1.38 km 和 4.21 km; gRH 曲线局部最小值对应高度 1.28 km 和 4.2 km。从位温曲线看,上述三种方法取最值的两个高度中较低的为混合层高度,较高的为残留层层顶高度即边界层高度。

车载测风激光雷达测量期间,除去 4 月 1 日全天和 9 日下午因为雨天影响没有进行测量以及因云

层较低导致数据结果无法对比等情况,共获得 45 组可用于混合层或者近地面稳定边界层高度对比分析和 44 组可用于边界层高度对比分析的有效数据。激光雷达数据使用 GS 法反演边界层结构,探空仪数据根据 gPT 和 gRH 法反演边界层结构,计算得到的混合层高度或近地面稳定边界层高度用  $h_1$  表示,边界层高度用  $h_2$  表示。得到的对比结果如图 4 和图 5 所示。

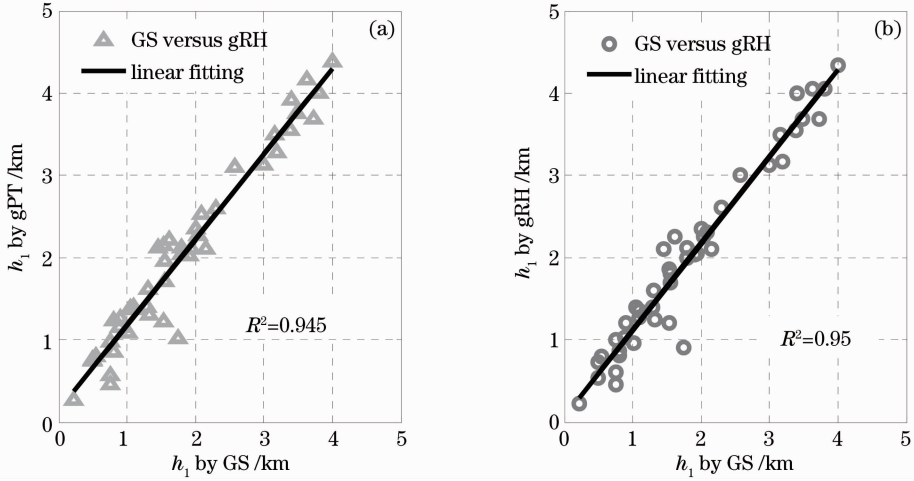


图 4  $h_1$  反演结果比较

Fig. 4 Comparison of  $h_1$  retrieved results

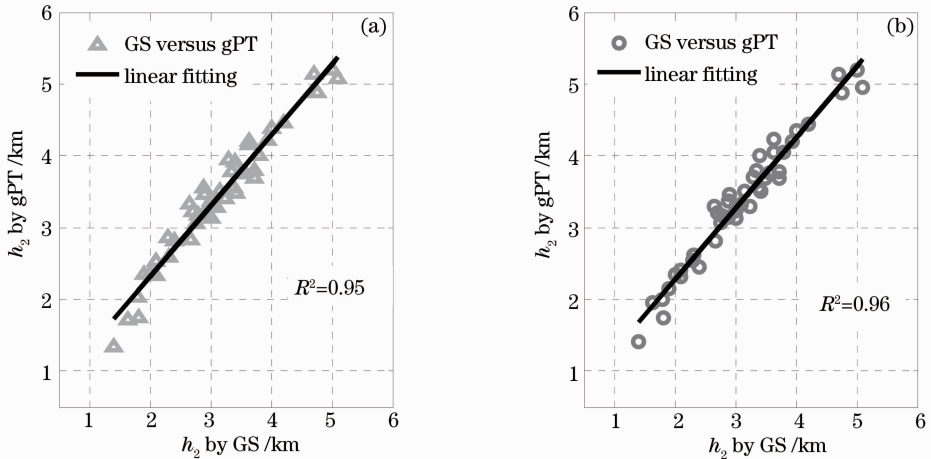


图 5  $h_2$  反演结果比较

Fig. 5 Comparison of  $h_2$  retrieved results

图中线性拟合公式为  $y = Ax + B$ , 其中  $y$  代表位温梯度(或相对湿度梯度)反演结果,  $x$  代表激光雷达数据反演结果。对应的拟合结果如表 2 所示。

上述结果表明根据激光雷达数据反演的边界层结构与探空气球数据用位温梯度和相对湿度梯度反演的结果有较好的一致性。

## 4 测量结果统计

测量期间的激光雷达数据用 GS 法对边界层结构进行统计分析,去除由于雨天影响没有进行测量和云层较低导致无法得出明确的结果等情况之外,得到的统计结果如图 6 所示。

表 2 边界层反演结果线性拟合

Table 2 Linear fitting of ABL structure retrieved by different methods for lidar data

	Retrieval method	Coefficient A&B	Fitting coefficient ( $R^2$ )	Root-mean-square error
$h_1$	GS vs. gPT	$A=1.038; B=0.14$	0.945	0.260
	GS vs. gRH	$A=1.054; B=0.06$	0.95	0.259
$h_2$	GS vs. gPT	$A=0.98; B=0.35$	0.95	0.199
	GS vs. gRH	$A=0.99; B=0.3$	0.96	0.183

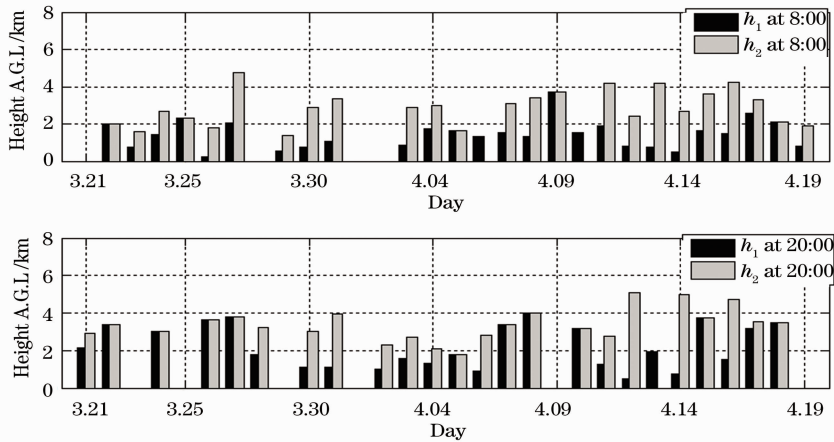


图 6 激光雷达数据 GS 法反演  $h_1$  和  $h_2$  的统计结果

Fig. 6 Statistical results of  $h_1$  and  $h_2$  retrieved with GS method

根据统计结果,测量期间早上和晚上 8:00 的平均混合层高度或近地面稳定边界层高度  $h_1$  值分别为 1.44 km(均方根误差为 0.75 km)和 2.23 km(均方根误差为 1.13 km)、平均边界层高度  $h_2$  分别为 2.88 km(均方根误差为 0.92 km)和 3.37 km(均方根误差为 0.82 km)。

## 5 结 论

利用车载测风激光雷达 2011 年 3 月至 4 月在北京南郊观象台的测量数据,通过距离平方校正信号梯度法对边界层结构进行分析,证明该方法可以反映边界层的结构信息,与探空仪数据利用位温梯度和湿度梯度法反演的结果有较好的一致性。

激光雷达数据根据距离平方校正信号梯度法反演边界层的统计结果显示,测量期间早晨和晚上 8:00 边界层高度平均值为 2.88 km 以上,混合层(或近地面稳定边界层)高度平均 1.44 km 以上。这与测量期间该地区的空气状况、大气相对湿度的垂直分布以及人们的生活规律都有关系。

## 参 考 文 献

1 Roland B. Stull. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Yang Changxin Transl.. Beijing: China Meteorological

Press, 1991. 2~19  
 罗兰, 斯塔尔. 边界层气象学导论[M]. 杨长新译. 北京: 气象出版社, 1991. 2~19  
 2 Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong *et al.*. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1214001  
 陶宗明, 吴德成, 刘东等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1214001  
 3 Shi Jianzhong, Cao Nianwen. Troposphere aerosol measurement by lidar in northern suburbs of Nanjing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(10): 100101  
 施建中, 曹念文. 南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(10): 100101  
 4 Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Equivalence of light scattering by one internal-mixed model for aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0629001  
 张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种内混合气溶胶粒子模型光散射等效性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0629001  
 5 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  
 6 P. B. Russell, E. E. Uthe, F. L. Ludwig *et al.*. A comparison of atmospheric structure as observed with monostatic acoustic sounder and lidar techniques [J]. *J. Geophys. Res.*, 1974, **79**(26): 5555~5566  
 7 R. M. Endrich, F. L. Ludwig, E. E. Uthe. An automatic method for determining the mixing depth from lidar observations [J]. *Atmos. Environ.*, 1979, **13**(7): 1051~1056  
 8 L. Menut, C. Flamant, J. Pelon *et al.*. Urban boundary-layer height determination from lidar measurements over the paris area [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(6): 945~954

- 9 J. Bosenberg, H. Linne. Laser remote sensing of the planetary boundary layer[J]. *METEOROL. Z.*, 2002, **11**(4): 233~240
- 10 G. Martucci, R. Matthey, V. Mitev *et al.*. Comparison between backscatter lidar and radiosonde measurements of the diurnal and nocturnal stratification in the lower troposphere[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2007, **24**(7): 1231~1244
- 11 Z. S. Liu, B. Y. Liu, S. H. Wu *et al.*. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1485~1487
- 12 E. Dupont, J. Pelon, C. Flamant. Study of the moist convective boundary layer structure by backscattering lidar[J]. *Boundary Layer Meteorol.*, 1994, **69**(1-2): 1~25
- 13 D. J. Seidel, C. O. Ao, K. Li. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: comparison of methods and uncertainty analysis[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(D16): D116113

栏目编辑: 王晓球