

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2012.03.001

大气光学

激光雷达探测大气边界层高度分布的 梯度法应用研究

王琳^{1,2}, 谢晨波¹, 王珍珠¹, 伯广宇¹, 刘东¹, 魏合理¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了研究合肥地区大气边界层结构变化特征, 利用偏振拉曼-米散射激光雷达进行了连续探测。首先介绍利用激光雷达回波信号提取大气边界层高度的梯度法, 并分析该方法的优缺点。然后对梯度法进行修正, 给出具体的实例分析及对比结果。最后利用修正后的梯度法对激光雷达连续测量数据进行大气边界层高度提取, 得到合肥地区观测站上空大气边界层的高度分布及时间变化特征。结果表明, 实验期间合肥地区的大气边界层高度主要分布在 1~1.5 km 范围内, 平均高度约为 (1.28 ± 0.2) km。

关键词: 激光雷达; 大气边界层; 梯度法

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2012)03-0161-07

Application of Gradient Method to Detect Height Distribution of Atmospheric Boundary Layer with Lidar

WANG Lin^{1,2}, XIE Chen-bo¹, WANG Zhen-zhu¹, BO Guang-yu¹, LIU Dong¹, WEI He-li¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the changes of the atmospheric boundary layer's structure in Hefei, the polarization-Raman-Mie scattering lidar system is operated automatically and continuously. The gradient method used to extract the height of atmospheric boundary layer from lidar data is introduced and analyzed. The modified gradient method is used to obtain the temporal characteristics of the height of atmospheric

收稿日期: 2011-11-03; 修改日期: 2011-12-14

基金项目: 国家自然科学基金 (41005014)、中国科学院知识创新工程青年人才领域专项前沿项目、中国科学院大气成分与光学重点实验室开放课题基金项目资助

E-mail: cbxie@aiofm.ac.cn

boundary layer in Hefei. The results show that the height of atmospheric boundary layer in Hefei ranges from 1 km to 1.5 km, and the average height is about (1.28 ± 0.2) km during the experiment.

Key words: lidar; atmospheric boundary layer; gradient method

1 引言

大气边界层 (atmospheric boundary layer 或 planetary boundary layer, 简称 ABL 或 PBL) 是指直接受地面影响的对流层部分, 响应地面作用的时间尺度为一个小时或更短^[1]。它主要是通过摩擦阻力、蒸发和蒸腾、热量输送、污染物排放以及影响气流变化的地形等与地面作用。大气边界层是与人类关系最密切的一层, 是由人类活动和各项生态环境构成的主要气层。由于热力作用导致的强烈日变化是大气边界层的一个重要特征。边界层高度随地表特征、季节和天气背景的不同而不同, 变化幅度在几百米到几千米之间。

激光雷达是探测对流层大气的一种有效工具, 广泛应用于大气气溶胶、空气污染物、大气成分以及云的研究。大量实验验证激光雷达探测边界层高度的可行性, 这些实验主要是对森林、峡谷和海洋等远城区进行边界层探测^[2-4]。随着激光雷达探测能力的增强以及对城市污染问题的日趋重视, 激光雷达开始应用于城区边界层的探测^[5-7]。

通常, 在大气边界层与上部自由大气的交界处存在一个逆温层^[8]。该逆温层将大量气溶胶粒子束缚在逆温层下部的大气边界层内。同时, 由于边界层里的空气对流混合充分, 因此, 随着高度的增加, 层内气溶胶粒子的浓度减少得不是十分显著。而在逆温层上部的自由大气中, 气溶胶浓度很低。因此在大气边界层与自由大气交界处, 随着高度的增加气溶胶浓度减少得非常快, 反映在激光雷达回波信号上, 就是回波信号的快速衰减。由此, 可以得到大气边界层的高度。

目前, 国内外使用激光雷达探测大气边界层的提取方法最简单实用的即梯度法。梯度法利用激光雷达距离平方校正回波信号的梯度变化情况

来查找边界层的高度, 简便易用, 但是该方法也存在缺陷。本文利用自行研制的偏振拉曼-米散射激光雷达在合肥西郊对大气边界层进行了连续探测, 利用这些数据对梯度法提取大气边界层的过程进行了详细分析, 并给出了典型天气情况下的提取结果。最后, 结合激光雷达连续测量数据资料, 分析了合肥地区大气边界层的统计结果。

2 激光雷达系统

图 1 给出了偏振拉曼-米散射激光雷达系统结构示意图。该系统采用 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 线偏振激光作为探测光源。后继光学与探测单元由三个探测通道组成, 其中拉曼探测通道用于测量 532 nm 出射激光与大气中氮气分子

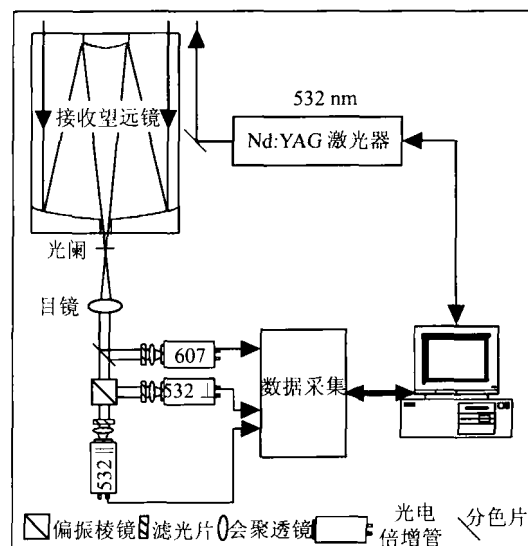


图 1 偏振拉曼米散射激光雷达系统结构示意图

Fig.1 Diagram of the polarization-Raman-Mie scattering lidar

作用产生的 607 nm 拉曼散射回波信号, 垂直探测通道用于测量 532 nm 出射激光与大气中粒子作用产生的米散射信号垂直分量, 水平探测通道用于测量 532 nm 出射激光与大气中粒子作用产生

的米散射信号水平分量。利用三个探测通道的测量数据可以反演得到对流层气溶胶和云光学参数垂直分布特征^[9]。该激光雷达系统现长期安置在

北京市为中国气象科学研究院提供常规测量。本文中用于提取大气边界层高度的数据仅仅是该激光雷达测量的 532 nm 米散射平行分量信号。

表 1 偏振拉曼 - 米散射激光雷达系统的主要参数、性能指标和测量内容

Table 1 The main specifications of polarization-Raman-Mie scattering lidar

主要参数			
激光波长	532 nm	激光重复频率	10 Hz
激光单脉冲能量	150 mJ	接收望远镜直径	220 mm
接收视场角	0.5~2 mrad(可调)		
性能指标			
有效测量范围	0~15 km(晴空大气)		
空间分辨率	7.5 m		
工作方式	手动、自动和网络控制		
探测内容			
水平测量	大气水平能见度 气溶胶水平分布		
垂直测量	气溶胶边界层结构 对流层气溶胶和云结构、形态等		

表 1 中列出了偏振拉曼 - 米散射激光雷达系统的主要参数、性能指标和测量内容。

3 梯度法

激光雷达接收到的米散射回波信号可以用式(1)所示激光雷达方程表示

$$P(z) = P_0CY(z)z^{-2}[\beta_a(z) + \beta_m(z)]T_a^2(z)T_m^2(z), \tag{1}$$

式中: $P(z)$ 是激光雷达接收到距离 z 处气溶胶粒子和空气分子的后向散射回波信号; P_0 是激光发射功率; C 是激光雷达系统常数; $Y(z)$ 是几何因子; $\beta_a(z)$ 和 $\beta_m(z)$ 分别是大气气溶胶粒子和大气分子后向散射系数, $T_a(z) = \exp[-\int_0^z \alpha_a(z')dz']$ 和 $T_m(z) = \exp[-\int_0^z \alpha_m(z')dz']$ 分别是大气气溶胶粒子与大气分子透射率; $\alpha_a(z)$ 和 $\alpha_m(z)$ 分别为大气气溶胶粒子和大气分子消光系数。

由 (1) 式可得

$$P(z)z^2 = P_0CY(z)[\beta_a(z) + \beta_m(z)]T_a^2(z)T_m^2(z). \tag{2}$$

激光雷达距离平方校正回波信号 $P(z)z^2$ 在一定程度上反映了大气气溶胶浓度随探测高度变化的情况。由于覆盖逆温的作用, 大量的大气气溶胶粒子富集在大气边界层以内, 这样, 大气边界层到自由大气层之间大气气溶胶的浓度就会发生变化。 $P(z)z^2$ 的梯度 $D(z)$ 的变化即代表着大气气溶胶浓度梯度的变化^[10]。

$D(z)$ 定义为

$$D(z) = d[P(z)z^2]/dz, \tag{3}$$

该梯度变化最大的位置就是大气边界层的高度。

4 个例分析

如图 2(a) 所示, 是 2010 年 8 月 11 日 23:30

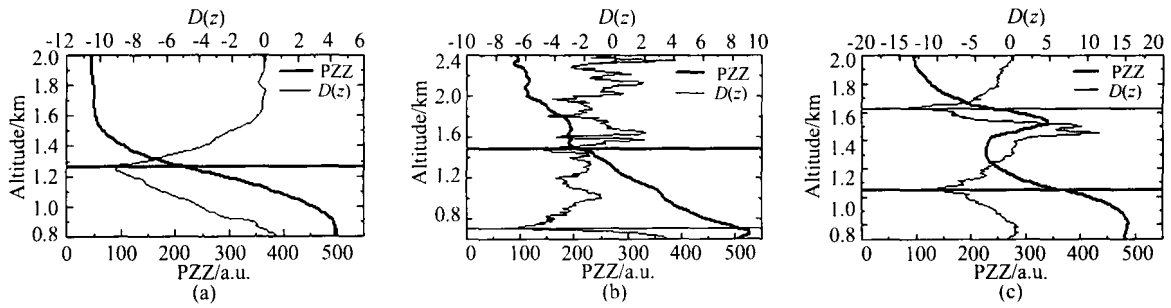


图2 个例分析, (a) 理想情况, (b) 缓慢变化的情况, (c) 存在低云的情况

Fig.2 Case Studies, (a) ideal case, (b) slowly change case and (c) low cloud case

的实测结果。在这种理想情况下, $P(z)z^2$ (图中黑色粗曲线 PZZ 所示) 在大气边界层高度附近急剧下降, 反映在梯度 $D(z)$ 上, 就是 $D(z)$ 取得最小值, 那么该时刻的大气边界层高度值就是 $D(z)$ 取得最小值的高度, 如图中水平横线所示, 边界层高度为 1.26 km。对于这种比较典型的情况, 利用求解 $P(z)z^2$ 梯度 $D(z)$ 最小值的方法可以很准确的找到此时的大气边界层高度。

然而, 实际的探测结果却是十分复杂的。如图 2(b) 所示是边界层变化缓慢的情况, 该图为 2010 年 8 月 11 日 23:30 的实测结果。利用梯度法, 查找 $D(z)$ 的最小值所在高度 0.71 km, 即该时刻大气边界层的高度, 如图中细水平直线所示。但实际上, 此时, $P(z)z^2$ 刚刚经过最大值点, 并缓慢下降, 其值从 525 缓慢降至 100, 如果把 $P(z)z^2 = 505$ 的 0.71 km 高度作为此时的边界层高度, 显然不合理。这说明在这种情况下梯度法存在一定的缺陷。为了得到准确的边界层高度, 本文对 $P(z)z^2$ 的取值做了约束, 将其限制在 150~350 (该约束条件由系统探测的统计分析结果而定) 之间, 以修正由于边界层变化缓慢所导致的错误提取结果。这样一来, 位于 1.47 km 高度处的 $D(z)$ 的第二个极小值点, 满足约束条件, 由此确定为此时边界层高度, 如图中粗水平直线所示。

如图 2(c) 所示是边界层上方有低云的情况, 该图为 2010 年 8 月 12 日 01:30 的实测结果。此

时, 利用梯度法, 查找 $D(z)$ 的最小值所在高度 1.63 km 即该时刻大气边界层的高度, 如图中细水平直线所示。但实际上, $D(z)$ 在 1.63 km 处的最小值, 是处在 1.4~1.7 km 处的低云信号造成的, 而不是真正的大气边界层的高度。这说明在这种情况下梯度法存在一定的缺陷。为了剔除低云的干扰, 本文根据云的特征曲线, 对梯度法提取结果进行了修正。如图 2(c) 所示, 云的回波信号对应的 $D(z)$ 有类似于正余弦的曲线形状, 即最小负值附近总对应着一个最大正值, 二者的绝对值相近。于是, 可以利用这个特性, 通过程序自动查找低云结构, 并将其剔除。如此, 将低云剔除后, 该时刻的边界层应该在 1.05 km 处, 如图中粗水平直线所示。

综上所述, 梯度法虽然简便、易行, 但是并不能普遍适用于较复杂的天气情况。梯度法仅对大气边界层边界变化比较明显的情况能够得到比较准的结果, 但在实际测量中, 大气边界层的分布情况十分复杂, 如大气边界层变化缓慢, 或者在大气边界层上方有低云存在的情况下, 用梯度法则不能十分准确地查找得到大气边界层的高度。因此, 本文根据大气边界层变化缓慢及云的激光雷达回波信号的特征, 对梯度法进行了修正, 可以有效地修正大气边界层变化缓慢的情况, 剔除低云对大气边界层的干扰。

5 连续探测结果分析

5.1 单日连续探测结果分析

图 3 是单日连续观测的结果。其中, 图 3 (a) 是 2010 年 8 月 10 日 09:00~21:30 的提取结果, 这一天为晴朗无云的天气, 大气边界层变化明显, 接近理想情况, 采用梯度法查找的大气边界层分布十分准确。图 3(b) 是修正后的提取结果。对于这种较理想的天气, 两种结果差异很小。

图 3(c) 是 2010 年 8 月 13 日 00:00~23:30 的提取结果, 这一天天气晴好, 大气边界层分布较为稳定且变化缓慢, 偶尔有低云出现, 利用梯度法提取得到的大气边界层的分布情况上下波动比较

厉害。图 3(d) 是修正后的提取结果, 有效地修正了大气边界层变化缓慢及有低云存在的情况, 明显优于修正前的提取结果。

图 3(e) 是 2010 年 8 月 14 日 00:00~18:30 的提取结果, 这一天由于低云的作用, 大气边界层附近的气溶胶分布情况比较复杂, 使用梯度法查找到的大气边界层不很理想。图 3(f) 是修正后的提取结果, 有效地剔除了低云对大气边界层的干扰。相比修正前的提取结果, 有了很大的改进。

5.2 连日连续探测结果分析

图 4 是自 2010 年 8 月 10 日 09:00 至 2010 年 8 月 15 日 23:00 连日连续观测的结果。

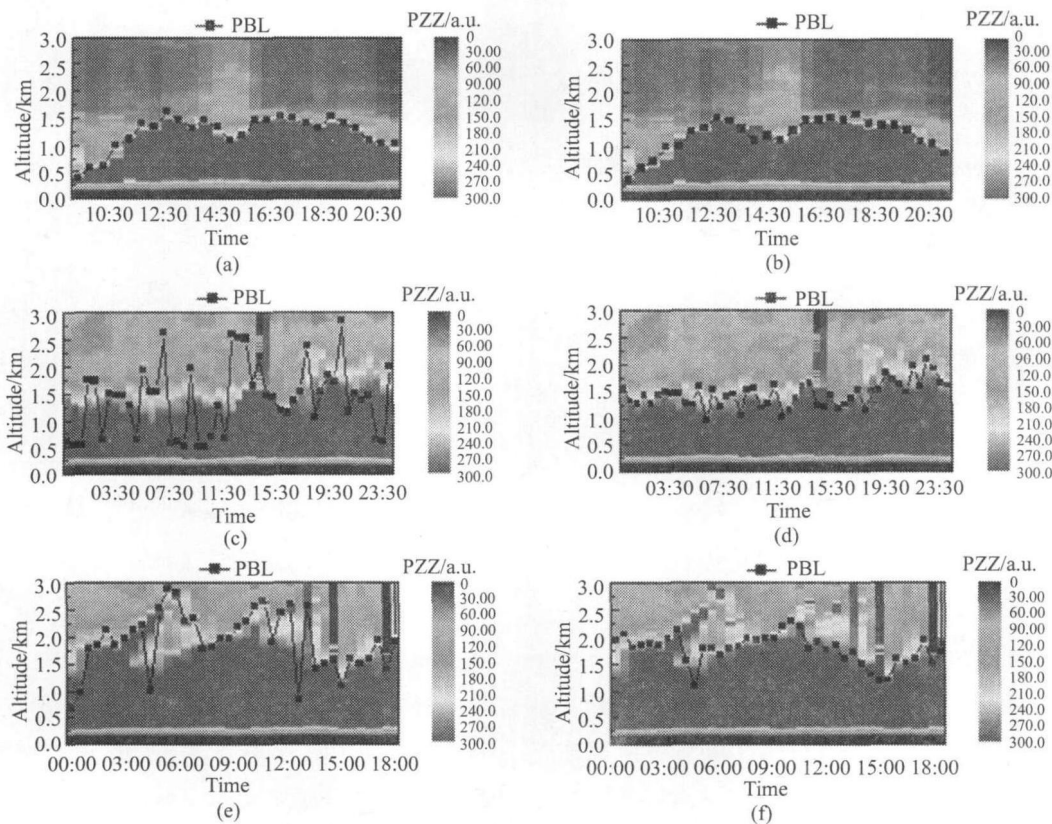


图 3 修正前后单日连续观测结果, (a) 2010 年 8 月 10 日修正前提取结果, (b) 2010 年 8 月 10 日修正后提取结果, (c) 2010 年 8 月 13 日修正前提取结果, (d) 2010 年 8 月 13 日修正后提取结果, (e) 2010 年 8 月 14 日修正前提取结果, (f) 2010 年 8 月 14 日修正后提取结果

Fig.3 Continuous observation in one day before and after modification, (a) results on 10 August 2010 before modification, (b) results on 10 August 2010 after modification, (c) results on 13 August 2010 before modification, (d) results on 13 August 2010 after modification, (e) results on 14 August 2010 before modification, (f) results on 14 August 2010 after modification

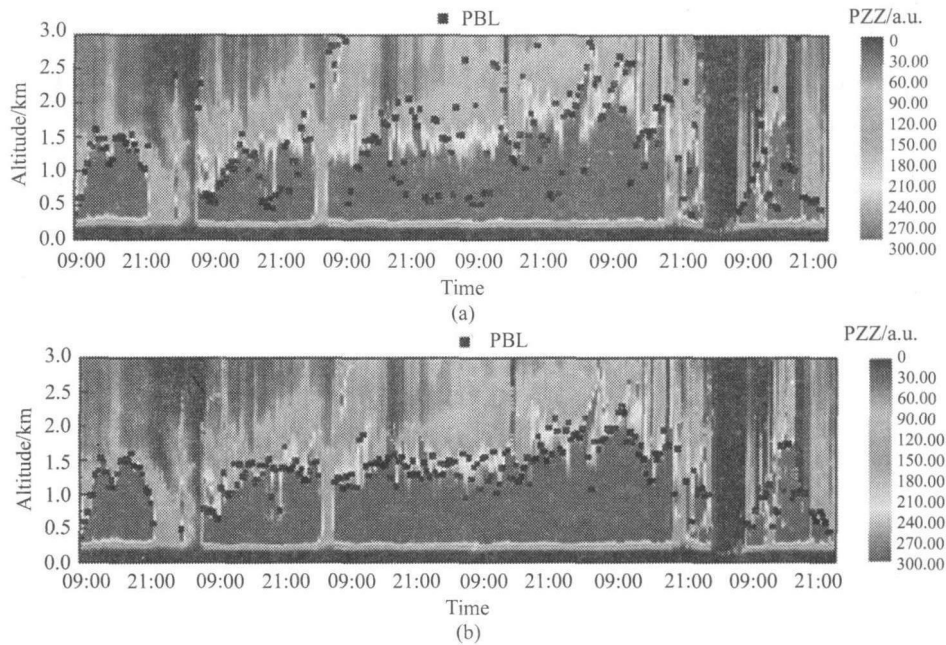


图 4 修正前后多日连续观测结果, (a) 修正前多日连续提取结果, (b) 修正后多日连续提取结果

Fig.4 Continuous observation in many days before and after modification, (a) results in continuous days before modification, (b) results in continuous days after modification

图 4(a) 是直接用梯度法提取得到的结果。由图可知, 此时提取得到的大气边界层的高度分布上下波动严重, 不能准确地反映大气边界层的实际分布情况。

图 4(b) 是利用修正后的梯度法提取得到的结果。由图可知, 此时提取得到的大气边界层的高度分布比较稳定, 明显优于修正前的结果, 能够较准确地反映大气边界层的实际分布情况。

根据提取的大气边界层高度统计结果显示, 测量期间合肥地区的大气边界层高度分布范围为 0.4~2.4 km, 大部分分布在 1~1.5 km 高度, 其平均数值为 (1.28 ± 0.2) km。

6 总 论

本文利用偏振拉曼-米散射激光雷达系统的连续测量数据, 介绍了梯度法提取大气边界层高度的具体过程, 通过三种典型天气状况个例详细分析了梯度法存在的不足, 并给出了相应的解决

方法。单日和多日连续测量数据比对显示修正后的梯度法提取结果明显优于修正前的提取结果, 能够较为准确地反映出大气边界层的高度分布情况。对修正后梯度法提取的数据统计分析表明, 测量期间合肥地区的大气边界层高度分布范围为 0.4~2.4 km, 大部分分布在 1~1.5 km 高度, 其平均数值为 (1.28 ± 0.2) km。

虽然修正后梯度法的提取结果较为理想, 能够比较准确地提取大气边界层的高度分布, 但由于气象条件和人为因素的影响, 大气气溶胶的空间分布非常复杂, 要准确无误地提取出各种复杂天气情况下大气边界层的高度分布, 今后还需要对方法进行进一步的验证和改进。

此外, 由于单点式地基激光雷达探测在空间上存在一定的局限性, 我们计划研制扫描式激光雷达来弥补此缺陷, 用于进一步研究大气边界层的时空分布情况。

参考文献:

- [1] Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* [M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [2] 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 [J]. *Boundary Layer Meteorol*, 1997, **83**(2): 247-284.
- [3] Steyn D G, Bottenheim J W, Thomson R B. Overview of tropospheric ozone in the lower Fraser valley and the Pacific 93 field study [J]. *J. Atmos. Environ.*, 1997, **31**: 2025-2035.
- [4] Davis K J, Len Schow D H, Oncley S P, *et al.* Role of entrainment in surface-atmosphere interaction over the boreal forest [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D24): 29219-29230.
- [5] 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 [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(25): 4273-4280.
- [6] Menut L, Flamant C, Pelon J, *et al.* Urban boundary-layer height determination from lidar measurements over the Paris area [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(6): 945-954.
- [7] Mok T M, Rudowicz C Z. A lidar study of the atmospheric entrainment zone and mixed layer over Hung Kong [J]. *Atmospheric Research*, 2004, **69**: 147-163.
- [8] Kunkel K E, Eloranta E W, Shipley S T. Lidar observations of the convection boundary layer [J]. *Appl. Meteorol.*, 1977, **16**: 1306-1311.
- [9] Xie C B, Nishizawa T, Sugimoto N, *et al.* Characteristics of aerosol optical properties in pollution and Asian dust episodes over Beijing, China [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4945-4951.
- [10] Wang Zhenzhu, Li Ju, Zhong Zhiqing, *et al.* LIDAR exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(1): 96-100(in Chinese).
- 王珍珠, 李 炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层 [J]. *应用光学*, 2008, **29**(1): 96-100.

作者简介: 王 琳 (1986-), 女, 河北人, 研究生, 主要从事激光雷达大气探测技术应用研究。