

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2011.02.002

利用米散射激光雷达获取湍流信息的方法研究

崔朝龙^{1,2}, 黄宏华¹, 梅海平¹, 倪志波^{1,2}, 汪少林^{1,2}, 曹开法^{1,2}, 方欣³, 饶瑞中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 100039;

3 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 介绍了采用米散射激光雷达测量湍流信息的理论原理, 分析了现有 AML-2 米散射激光雷达进行实验探测的可行性, 并于 2009 年 3 月 15 日在水平方向上开展了初步实验。从回波信号曲线及数据分析结果来看, AML-2 激光雷达探测湍流的有效距离为 300~820 m; 归一化光强起伏方差即闪烁指数数值在 0.001~0.1 之间, 且随距离增加而不断增大, 闪烁饱和现象不太明显; 大气折射率结构常数数值基本在 $1.0 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 左右, 在水平方向上基本保持均匀性。总体上, 闪烁指数和折射率结构常数随路径的变化趋势多数符合理论结果。

关键词: 米散射激光雷达; 湍流; 闪烁指数; 折射率结构常数; 闪烁仪

中图分类号: P427.1

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2011)02-0089-06

Measurement of Turbulence Information Using Mie Scattering Lidar

CUI Chao-long^{1,2}, HUANG Hong-hua¹, MEI Hai-ping¹, NI Zhi-bo^{1,2}, WANG Shao-lin^{1,2},
CAO Kai-fa^{1,2}, FANG Xin³, RAO Rui-zhong¹

(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 School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China;

3 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A theory of measuring turbulence information using Mie scattering lidar is introduced. The feasibility of measuring turbulence with existing AML-2 Mie scattering lidar is analyzed and some experiments are performed in the horizontal direction on March 15, 2009. The echo signal curve and results of data analysis show that, the effective range of measuring turbulence with AML-2 Mie scattering lidar is about 300~820 m. The value of normalized variance of the irradiance fluctuations, called scintillation index, is between 0.001 and 0.1. It increases with the increment of propagation distance, and the phenomenon of scintillation saturation is not obvious. The value of atmospheric refractive index structure constant is about $1.0 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$, and

收稿日期: 2010-04-21; 修改日期: 2010-07-13

基金项目: 国家 863 计划项目资助

E-mail: ady_longer@yahoo.com.cn

basically maintains homogenous in the horizontal direction. On the whole, the tendencies of scintillation index and refractive index structure constant with propagation distance are almost similar to the theoretical results.

Key words: Mie scattering lidar; turbulence; scintillation index; refractive index structure constant; scintillometer

1 引言

作为大气湍流强度的表征, 大气折射率结构常数 C_n^2 垂直廓线和水平分布的测量在湍流大气光传播研究中具有重要意义。为此, 已经有多种光学测量方法用于大气湍流强度的实际探测, 如闪烁测量法^[1-4]、相位起伏测量法^[4]、差分像运动法^[5-6]、光纤干涉测量技术^[7]等。但是这些方法具有或原理较为复杂、或系统造价昂贵、或应用范围较窄、或反演精度较低等局限性, 使用受到一定限制。激光雷达是一种主动式的现代光学遥感设备, 具有实时快速、高时空分辨率等特点, 适合用于大气的探测和研究。而当激光在大气介质中传播时, 激光雷达的后向散射信号会受到大气湍流的影响, 即激光雷达回波信号中存在着湍流信息, 这就为采用激光雷达测量湍流提供了新的研究点。正因为如此, Belen'kii 等人在激光雷达测量湍流的理论上进行了深入的探讨, 其模拟结果也证实了理论的可行性^[8]。倪志波等利用该原理方法分析了 MPL-A1 型微脉冲激光雷达测量湍流的可行性并进行了初步实验, 结果表明 MPL-A1 型微脉冲激光雷达回波信号中是含有湍流信息的^[9]。

本文基于 Belen'kii 等人提出的理论, 介绍了从激光雷达后向散射回波信号中提取湍流信息的方法。2009年3月15日在水平方向上, 利用 AML-2 米散射激光雷达开展了初步实验, 确定了该激光雷达测量湍流的有效距离, 分析了回波信号归一化光强起伏方差和折射率结构常数随传播距离和在某一距离随时间的变化趋势, 并与大口径闪烁仪在一定传播距离上的结果进行了对比, 其结果证明了该原理和方法的可行性, 同时指出了一些问题和不足。

2 理论基础

按照光在大气中的传播理论, 当接收孔径 D 大于光强起伏的空间相关尺度 $l_l = \sqrt{\lambda L}$ 时, 由于孔径平均效应^[10], 光强起伏现象就会消失。Belen'kii 提出了残余湍流闪烁 (residual turbulent scintillation) 理论^[8]: 如果散射体的半径 a_R 小于 l_l , 则即使接收望远镜口径 D 大于 l_l , 后向散射光强起伏也不会被完全平滑掉。

当满足以下四个条件: 1) 单次散射近似, 且气溶胶粒子粒径均匀, 路径长度 L 、气溶胶粒子平均半径 \bar{a} 与入射光波长 λ 满足: $L \gg \bar{a}^2/\lambda$; 2) 大气光学厚度 $\tau \ll 1$; 3) 径向光强相关尺度 $l_{rr} (l_{rr} \sim L)$ 远大于散射体尺度 (scattering volume length) $c\tau_1/2$, 且散射体尺度远大于激光波长: $L \gg c\tau_1/2 \gg \lambda$ (其中 c 为光速、 τ_1 为脉冲宽度); 4) 在弱起伏条件 ($\sigma_I^2 \leq 0.6$) 下, 望远镜接收孔径 D 、平面波的湍流相干长度 ρ_0 、 l_l 和 ρ_{cv} 满足 $D \gg \rho_0 \gg l_l \gg \rho_{cv}$ (其中 σ_I^2 为对数光强闪烁方差, $\rho_{cv} = 2L/ka_{ef}$ 由 Van-Cittert-Zernike 定理给出, a_{ef} 是距离光源 L 处光束的有效尺寸, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数) 时, 后向散射光的光强闪烁具有两个光斑尺度: 受气溶胶影响的气溶胶散斑尺度 $l_a = \lambda F/D$ 和受湍流影响的光斑尺度 $l_t = Fl_l/L$, 其中 F 为望远镜的焦距。因为 $l_t/l_a = D/\sqrt{\lambda L}$, 而对于实际的大口径接收系统一般有 $D \gg \sqrt{\lambda L}$, 所以一般总能满足 $l_t \gg l_a$ 。

由于闪烁光斑具有两种大小完全不同的空间尺度, 通过改变望远镜视场光阑 d_0 的大小可以获得后向散射光强起伏的三种不同表达形式

$$\sigma_p^2 = 1 + 2\sigma_I^2, d_0 \ll l_a, \quad (1)$$

$$\sigma_p^2 = \sigma_I^2, l_a \ll d_0 \ll l_t, \quad (2)$$

$$\sigma_p^2 = O(\sigma_I^2/(d_0/F\sqrt{\lambda/L})^{7/3}), l_t \ll d_0, \quad (3)$$

其中, σ_p^2 为通过光阑的后向散射光强起伏方差, σ_1^2 为探测光束的光强起伏方差。

上面三式中, 式 (1) 表明光强起伏方差包含了气溶胶散斑起伏和湍流起伏, 式 (2) 说明光阑平滑了气溶胶散斑起伏, 但包含了湍流起伏, 式 (3) 表示气溶胶和湍流起伏都被光阑平滑了, 总接收能量没有起伏。

3 实验方法和条件

实验中采用中科院大气成分与光学重点实验室的 AML-2 米散射激光雷达^[11] 在 2009 年 3 月 15 日进行了水平方向上的测量。该激光雷达用于气溶胶探测时波长 532 nm, 频率 20 Hz, 望远镜口径 300 mm, 焦距 750 mm, 光阑分七档, 大小约为: 0.15 mm, 0.25 mm, 0.40 mm, 0.53 mm, 0.75 mm, 1.12 mm, 1.5 mm。

按以上参数进行计算, 气溶胶散斑尺度 $l_a = 0.0013$ mm, 当传播距离为 1000 m 时, $l_l = 23$ mm, $l_t = 0.017$ mm; 3000 m 时, $l_l = 40$ mm, $l_t = 0.01$ mm; 6000 m 时, $l_l = 56$ mm, $l_t = 0.007$ mm, 所以, $l_t \gg l_a$ 的条件是满足的。另外, 依黄印博等对合肥地区气溶胶数浓度谱的测量^[12], 可知合肥地区春季气溶胶粒子尺度主要在 $d_0 = 0.65 \mu\text{m}$ 左右, 所以 $a_R \ll l_l$ 的条件也能满足。虽然此时有 $d_0 > l_t$, 但仍应可以从回波信号中提取未被平滑掉的湍流信息。

表 1 各实验时段与光阑大小的关系

Table 1 Relationship between experimental times and diaphragm sizes

实验时间	光阑大小
07:20~10:55	0.53 mm
12:15~15:13	0.40 mm
16:03~19:45	0.25 mm
20:05~20:46	0.15 mm

实验时, 激光器出口单脉冲能量设为 15~20 mJ, 功率 0.3~0.4 W 左右。为尽量避免大尺寸光阑对湍流测量的平滑影响, 及实验不同大小光阑对

湍流测量的作用, 选取了最小的四个光阑即 0.53 mm, 0.4 mm, 0.25 mm, 0.15 mm 做对比实验。同时选取湍流研究几个关键时段分时分光阑进行测量, 各时段与光阑大小的关系如表 1 所示。

为验证实验结果, 采用中科院大气成分与光学重点实验室研制的大口径激光闪烁仪^[3] 进行了同步测量, 实验在 1000 m 的水平路径上展开。

4 实验结果

4.1 激光雷达回波信号及信噪比分析

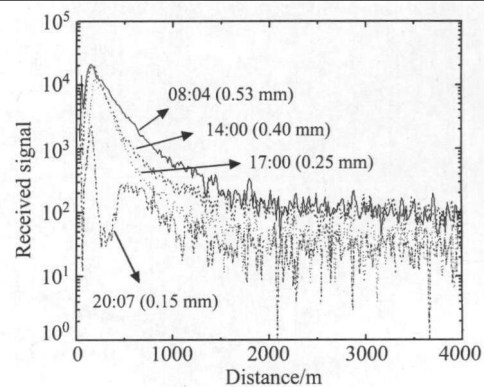


图 1 不同光阑下激光雷达回波光子数与距离的关系

Fig.1 Relationship of lidar echo photons with propagation distance under different diaphragms

图 1 是不同光阑下 4 个不同时刻上的激光雷达回波信号随距离的变化趋势图。可以看出, 多数光阑下回波信号只有一个波峰, 且大致在 2000 m 左右趋于平缓。而 0.15 mm 光阑异于其他光阑, 在近距离 (400 m) 内信号陡降再上升再下降, 出现一个额外波峰, 分析后认为与信号较弱、光阑较小和光束漂移等有关。

图 2 所示信噪比随距离变化趋势中, (a) 图为 0.53 mm 和 0.4 mm 光阑, (b) 图为 0.25 mm 和 0.15 mm 光阑。信噪比基本随距离呈对数线性下降, 若以信噪比大于 2 (在图中均以虚线标示出来) 为有效信号, 则 0.53 mm 光阑有效探测距离 1200 m 左右, 0.4 mm 光阑为 825 m, 0.25 mm 光阑为 855 m, 而 0.15 mm 光阑下信噪比趋势不同于其他光阑, 变化复杂, 应该是 0.15 mm 光阑下近距离回波信号异常 (图 1 所示) 的结果, 所以认为 0.15

mm 光阑下回波信号不太真实, 后续分析中不予考虑。最后, 考虑到近距离内光强接收不稳定的

经验, 综合来看, AML-2 激光雷达的有效测量距离为 300~820 m。

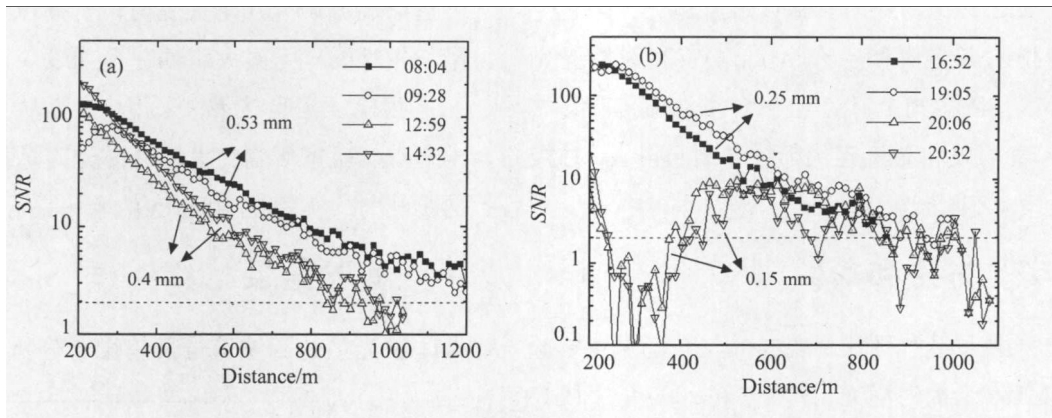


图 2 不同光阑下信噪比与距离的关系

Fig.2 Relation between SNR and propagation distance under different diaphragms

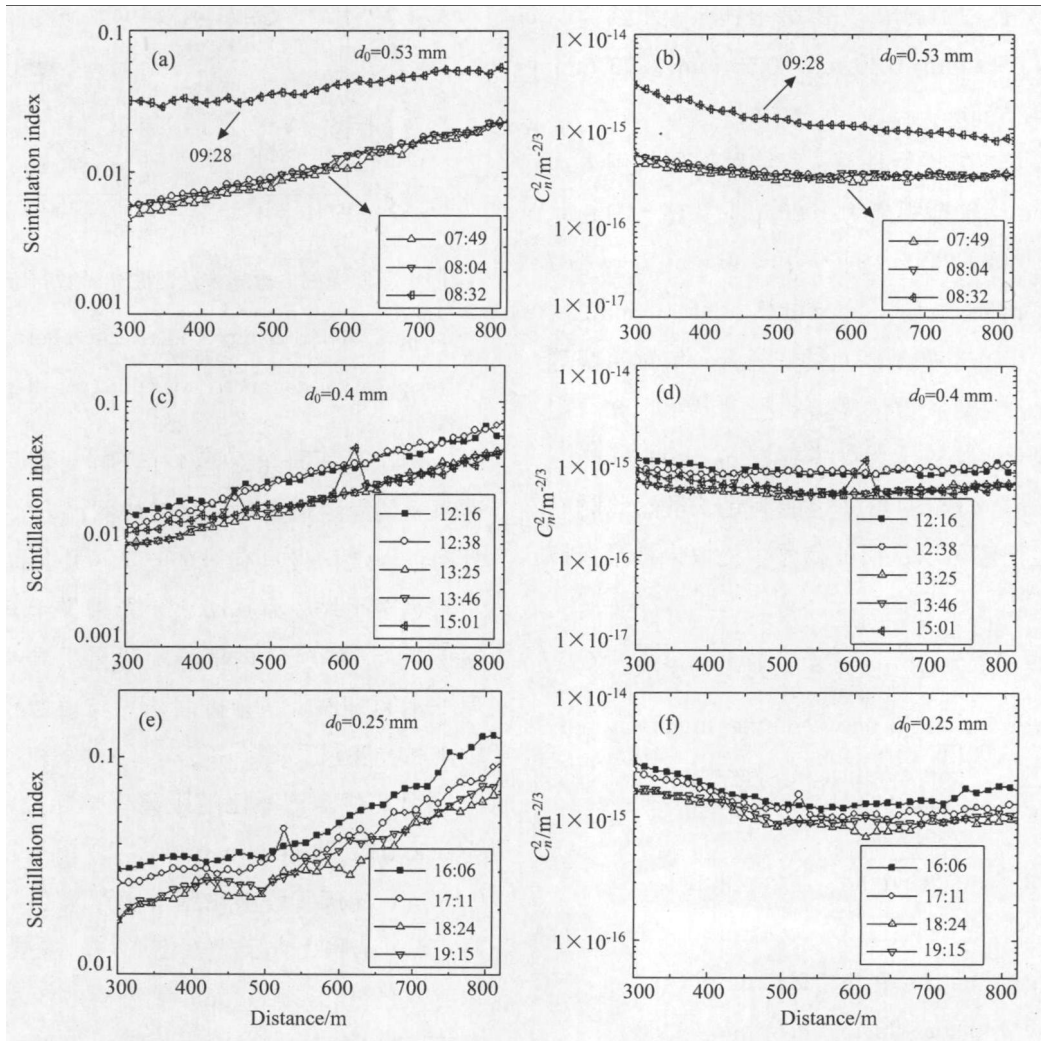


图 3 0.53 mm, 0.4 mm 及 0.25 mm 光阑下闪烁指数和折射率结构常数随距离的变化趋势

Fig.3 Variances of scintillation index and refractive index structure constant with propagation distance under 0.53 mm, 0.4 mm and 0.25 mm

4.2 湍流信息提取及分析

根据闪烁指数 β_I^2 的计算公式^[3]

$$\beta_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (4)$$

可以计算出回波信号各距离处的闪烁指数 (I 表示光强), 由闪烁指数与折射率结构常数 C_n^2 之间的关系^[10]

$$\sigma_x^2 = 0.124k^{7/6}L^{11/6}C_n^2, \quad (5)$$

$$\beta_I^2 = \exp(4\sigma_x^2) - 1, \quad (6)$$

可算出 C_n^2 的大小, 这里波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长, L 为探测光束传播距离。从而得到某一时刻 β_I^2 和 C_n^2 随路径的变化趋势, 及某一距离上 β_I^2 和 C_n^2 随时间的变化规律, 其中 C_n^2 值为各段传播距离的平均结果。

图 3 中左边一列 (图 (a)、(c)、(e)) 均为为闪烁指数随距离的变化趋势, 右边一列 (图 (b)、(d)、(f)) 是对应时刻的折射率结构常数 C_n^2 的变化趋势, 各图均已标示光阑的大小。总体上看:

1) 闪烁指数随距离增加而增大, C_n^2 基本保持水平均匀性; 2) 闪烁指数范围为 0.001~0.1, C_n^2 数值在 $1 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 左右, 结果偏小。这可能是因为这里 $d_0 > l_t$, 已经有部分湍流信息被光阑平滑了的缘故; 3) 就水平均匀假设来说, 0.4 mm 测量结果优于 0.53 mm, 与理论相符; 而 0.25 mm 相对 0.4 mm 较差, 与理论相符程度不太明显。这可能是光束漂移、及较小光阑下信号较弱等原因造成的。而饱和现象不明显的原因是, 模拟情况下, 在设置湍流强度为 $1 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 时, 到 3000 m 左右才能达到饱和, 而这里测得湍流强度平均在 $5 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 左右, 湍流越小越不容易饱和, 所以 820 m 时是不太可能达到饱和状态的。

另外需要指出的是: 图 3(a)、(b) 中, 某些时刻比如 09:28 等时刻的变化呈下降趋势, 出现这种现象的原因有待进一步深入分析; 图 3(c)、(d) 中, 某些距离处出现数据突变, 分析认为与光电倍增管的散粒噪声等有关。

4.3 激光雷达与闪烁仪测量结果的对比

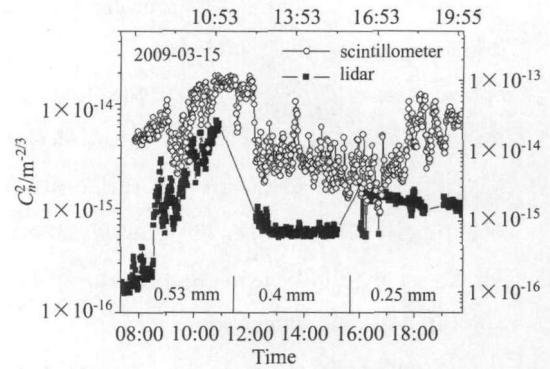


图 4 激光雷达测量结果与闪烁仪的对比

Fig.4 Comparison of scintillometer and lidar measurement

图 4 所示为 07:20~19:45 时间段激光雷达与闪烁仪测量的折射率结构常数 C_n^2 的比较。其中, 闪烁仪是水平 1000 m 传输距离的结果, 激光雷达固有效测量距离不到 1000 m 而选择 800 m 作测量对比。可以看出激光雷达上午是一个明显的上升趋势, 中午也形成了“凸起”, 与闪烁仪测量结果有较大相似性。此外, 两者在 12:00 左右同时有一个数值突降, 闪烁仪方面可能与当时天空出现云团, 遮住太阳造成湍流变化有关, 激光雷达方面可能与光阑改变等有关。另外, 激光雷达测量结果在 0.4 mm 光阑下几乎没有起伏变化, 其原因有待进一步分析。

5 总结

本文基于激光雷达后向散射回波信号中提取湍流信息的理论和方法, 利用 AML-2 米散射激光雷达在水平方向上开展了初步实验, 得出如下结论: 1) 闪烁指数随距离呈递增趋势; 2) 折射率结构常数 C_n^2 在 300~820 m 路径上随距离的变化趋势基本符合水平均匀性假设; 3) β_I^2 和 C_n^2 随时间的变化趋势与理论有一定相符。激光雷达与闪烁仪两者测量结果有一定符合, 基本可以认为激光雷达后向散射回波信号中含有湍流信息, 以后会对实验结果中出现的问题做进一步研究。

参考文献:

- [1] Neyman C R., Stribling B E. Scintillation detection and ranging (SCIDAR) at the air force maui optical station [C]. *SPIE*, 1999, **3763**: 259-267.
- [2] Kornilov V, Tokovinin A A, Vozyakova O, et al. MASS: a monitor of the vertical turbulence distribution [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4839**: 837-845.
- [3] Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, **35**(6): 898-902(in Chinese).
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径激光闪烁仪 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 898-902.
- [4] Yuan Ke'e, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Simultaneous measurements on scintillation and phase fluctuation of light propagation through atmospheric turbulence by shack-hartmann wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1659-1663(in Chinese).
苑克娥, 朱文越, 饶瑞中. Shack-Hartmann 传感器用于闪烁和相位起伏效的同时测量 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1659-1663.
- [5] Gimmestad G G, Roberts D W, Stewart J M, et al. A new type of lidar for atmospheric optical turbulence [J]. *IEEE*, 2007: 5268-5271.
- [6] Hou Zaihong, Wu Yi, Zhang Shouchuan, et al. Development of turbulence profile lidar [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10):1602-1604(in Chinese).
侯再红, 吴毅, 张守川, 等. 湍流廓线激光雷达的研制 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1602-1604.
- [7] Mei Haiping, Huang Honglian, Rao Ruizhong. Fiber microlens collimation and coupling optical path in measuring atmospheric optical turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6): 910-913(in Chinese).
梅海平, 黄红莲, 饶瑞中. 用光纤准直耦合光路测量大气光学湍流 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(6): 910-913.
- [8] Belen'kii M S. Effect of residual turbulent scintillation and a remote-sensing technique for simultaneous determination of turbulence and scattering parameters of the atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(3): 1150-1158.
- [9] Ni Z B, Huang H H, Mei H P, et al. Extracting turbulence information from echo signal of micro-pulse lidar [J]. *Proc. SPIE*, 2009, **7382**: 73822L-1-73822L-7.
- [10] Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Press, 2005: 180-190(in Chinese).
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 180-190.
- [11] Wang Shaolin, Xie Pinhua, Hu Shunxing, et al. Measurement of atmospheric boundary layer pollutants by mobile lidar in Beijing [J]. *Environment Science*, 2008, **29**(3): 562-568(in Chinese).
汪少林, 谢品华, 胡顺星, 等. 车载激光雷达对北京地区边界层污染监测研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 562-568.
- [12] Huang Yinbo, Huang Honglian, Han Yong, et al. Measurement and model analysis of the aerosol optical properties in the region of Hefei and southeast coast [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(6): 423-433(in Chinese).
黄印博, 黄红莲, 韩永, 等. 合肥、东南沿海地区气溶胶光学特性测量及模式分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(6): 423-433.

作者简介: 崔朝龙 (1983-), 男, 湖南南县人, 博士研究生, 主要从事湍流大气光学特性研究。