

户外型探测臭氧和气溶胶激光雷达系统研制

张青松^{1,2,3}, 侯再红¹, 谢晨波¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 3. 安徽蓝盾光电子股份有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 激光雷达探测臭氧和气溶胶垂直廓线分布近年来在环境监测领域获得广泛应用。介绍了一套可同时用于探测臭氧和气溶胶浓度的激光雷达系统。采用 Nd:YAG 激光器, 通过二倍频器和四倍频器分别产生 532 nm 和 266 nm 激光光源, 基于受激拉曼散射原理, 在两根拉曼管中分别充有氘气和氢气, 产生拉曼频移光 289 nm, 299 nm, 通过差分吸收算法原理反演垂直空间臭氧浓度廓线, 通过米散射算法原理来反演气溶胶浓度廓线。水平扫描试验结果显示, 雷达系统的探测结果与近地面点式臭氧分析仪测量结果有较好的一致性, 相对误差小于 10%。在安徽合肥科学岛外场观测结果表明: 臭氧探测高度, 白天可以达到 3 km, 晚上可以达到 5 km, 气溶胶探测高度, 白天可以达到 10 km, 晚上可以达到 15 km。

关键词: 户外型; 激光雷达; 臭氧; 气溶胶; 拉曼效应

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0706008

Outdoor lidar system for measurement of ozone and aerosol profiles

Zhang Qingsong^{1,2,3}, Hou Zaihong¹, Xie Chenbo¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Anhui Landun Photoelectron Co., Ltd., Tongling 244000, China)

Abstract: Lidars to observe ozone and aerosol vertical profile are widely used in environment monitor area recently. A new lidar system with both functions was introduced. The 532 nm and 266 nm light beam were generated separately with second and fourth harmonic generators using Nd:YAG laser oscillator. The 289 nm and 299 nm Raman spectrums were obtained using two Raman cells based on the theory of stimulated Raman scattering, in which one was pumped with deuterium and another was pumped with hydrogen. The ozone concentration profile was retrieved by DIAL algorithm while the aerosol concentration profile was retrieved by Mie scattering algorithm. The lidar detection results agree well with that of ozone analyzer according to the horizontal scanning experiment where the maximum relative error is less than 10%. Results observed on the science island in Hefei City, Anhui province show that the detection height is 3 km in daytime and 5 km in night time for ozone while the height is 10 km in daytime and 15 km in night time for aerosol.

Key words: outdoor; lidar; ozone; aerosol; Raman effect

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504503)

作者简介: 张青松(1983-), 男, 博士生, 主要从事大气探测技术方面的研究。Email: Jason.zhangqs@foxmail.com

导师简介: 侯再红(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要从事大气探测技术方面的研究。Email: zhou@aiofm.ac.cn

0 引言

臭氧是大气中的重要痕量气体之一,高浓度的近地面臭氧会给人类健康、动植物生长和生态环境造成严重危害^[1],高空中的臭氧由于吸收太阳紫外辐射,对高层大气温度变化起着重要作用,也会造成光化学污染,因此对近地面和高空臭氧的监测具有重要意义。气溶胶是悬浮在空气中的粒径为 0.001~100 μm 的固体或液体颗粒体系,是大气边界层垂直结构和时空变化观测的天然载体,对地面气候、大气温度和气压场、风场和垂直运动场等都有明显影响^[2]。

激光雷达是传统雷达技术和现代激光技术的结合,广泛应用于大气参数探测领域,可以探测云高、风场、边界层高度、气溶胶浓度,以及痕量气体的浓度,如臭氧、二氧化硫、二氧化碳等。主要优点为:(1) 时空分辨率高;(2) 可以长期连续观测;(3) 观测成本相对较低。根据探测对象,可分为气溶胶激光雷达、测风激光雷达、臭氧激光雷达、二氧化碳激光雷达、二氧化硫激光雷达等种类。Browell 等人研究了机载测量臭氧和气溶胶激光雷达系统^[3],美国 NASA 兰利研究中心的 Russell 等人研制成功 LMOL 车载臭氧激光雷达^[4],并用于美国跨地区臭氧雷达组网观测。Langford 等人利用地基臭氧雷达和机载雷达协同观测,结合数值模式研究了平流层臭氧传输对对流层臭氧污染的影响^[5]。为了满足国家环保部门及时了解近地面和边界层臭氧、气溶胶的污染状况,迫切需要研制一款可以用于户外长期连续观测的地基臭氧-气溶胶探测激光雷达。

1 探测原理

臭氧探测采用差分吸收原理^[6],激光雷达同时向大气中发射两束非常接近的波长对,一个波长对臭氧的吸收较强,记为 λ_{on} ,另一个波长对臭氧的吸收相对较弱,记为 λ_{off} ,由于两束波长非常接近,可以近似忽略其他气体的影响,由激光雷达方程可以推导出臭氧浓度的表达式为:

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left\{ \ln \left[\frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] \right\} + B - E_a - E_m \quad (1)$$

其中,

$$B = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left\{ \ln \left[\frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right] \right\} \quad (2)$$

$$E_a = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_a(\lambda_{on}, z) - \alpha_a(\lambda_{off}, z)] \quad (3)$$

$$E_m = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_m(\lambda_{on}, z) - \alpha_m(\lambda_{off}, z)] \quad (4)$$

式中: $N(z)$ 为高度 z 处的臭氧分子数密度; $\Delta\sigma$ 为臭氧在 $\lambda_{on}, \lambda_{off}$ 两个波长的吸收截面差; $P(\lambda_{on}, z), P(\lambda_{off}, z)$ 为高度 z 处 $\lambda_{on}, \lambda_{off}$ 的激光雷达回波信号强度; B, E_a, E_m 分别为两个不同波长的大气后项散射、气溶胶消光、大气分子消光对臭氧浓度反演带来的影响因子项,统称为修正项; $\beta(\lambda_{on}, z), \beta(\lambda_{off}, z)$ 分别为两个波长的后项散射系数; $\alpha_a(\lambda_{on}, z), \alpha_a(\lambda_{off}, z)$ 分别为两个波长的气溶胶消光系数; $\alpha_m(\lambda_{on}, z), \alpha_m(\lambda_{off}, z)$ 分别为两个波长的大气分子消光系数。

气溶胶消光系数的反演算法采用比较成熟的 Fernald 方法^[7],事先假设已知某高度 z_c 处大气气溶胶粒子和空气分子消光系数,则 z_c 处以下高度的气溶胶粒子消光系数(后项积分)为:

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z) + \frac{p(z) \cdot z^2 \cdot \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z) dz \right]}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_a}{S_m} \alpha_m(z) + 2 \int_z^{z_c} p(z) \cdot z^2 \cdot \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z) dz \right]} \quad (5)$$

式中: S_a 为激光雷达气溶胶消光后项散射比,其值取决于激光波长、地理位置、气溶胶尺度谱分布和折射指数等因素,取值范围为 10~100 sr,经验值常取为 50; S_m 为大气分子的消光后项散射比,经验值常取为 $\frac{8\pi}{3}$; $\alpha_a(z_c), \alpha_m(z_c)$ 分别为参考点的气溶胶消光系数和大气分子消光系数初值, $\alpha_m(z_c)$ 可由美国标

准大气模式得到^[8]; $P(z)$ 为高度 z 处的激光雷达回波信号强度。

2 系统介绍

雷达系统由激光发射单元、光学接收单元、数据采集单元和辅助控制单元四部分组成,系统原理图

如图 1 所示,表 1 是雷达系统的主要性能参数。激光发射单元的激光器选用 Nd-YAG 高能激光,激光重复频率为 10 Hz,发射能量达到 100 mJ@266 nm,

激光器的基频为 1 064 nm, 经过二倍频和四倍频晶体分别产生 532 nm 和 266 nm 激光光束。532 nm 的激光经过分光镜分束, 然后通过角反射镜垂直发射

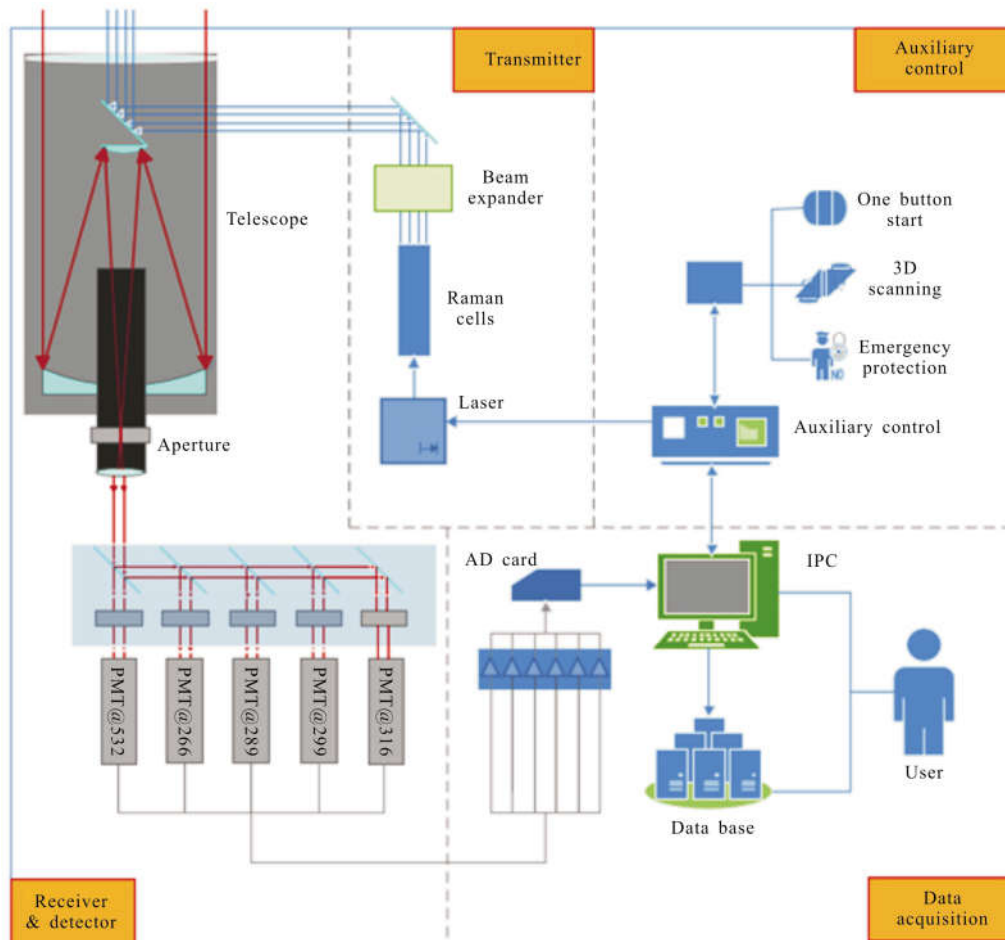


图 1 户外激光雷达系统原理图

Fig.1 Schematic of outdoor lidar system

表 1 雷达系统技术参数

Tab.1 Lidar system characteristics

Part	Specification
Transmitter	
Laser	Nd:YAG, 10 Hz repetition rate, 100 mJ@266 nm, pulse width 3-5 ns@266 nm
Wavelengths	266, 289, 299, 316, 532 nm
Raman cell	Dual cell hydrogen/deuterium
Receiver	
Telescope	Cassegrain telescope, 300 mm diameter, 0.5-6 mrad FOV
Band pass filter	FWHM<1.5 nm
PMT	Hamamatsu H10720/H10721
Data acquisition	
DAC	LICEL transient recorder(TR40-16 bit), 40 MHz frequency
IPC	ADVANTECH 610L 2.8 GHz/512 MB/80 GB

到高空,用于气溶胶消光系数的反演探测。266 nm 激光在经过分束镜分束后分别经过两根拉曼管,一根拉曼管里面充有氢气,266 nm 激光经过氢气拉曼管后会发生拉曼受激效应,产生 299 nm 的一级 Stokes 拉曼频移光谱。另外一根拉曼管里面充有氖气,同样在 266 nm 激光经过后也会发生拉曼受激效应,产生一级 Stokes 光谱 289 nm 和二级 Stokes 光谱 316 nm。两根拉曼管产生的拉曼受激光源和剩余的 266 nm 激光分别经过角反射镜发射到高空,用于臭氧的差分吸收反演探测,激光经过最后一块角反射镜与望远镜是同轴的安装方式,可减小激光雷达的接收盲区。

发射的激光与大气中的颗粒物发生米散射,与大气分子发生瑞利散射,短波段 266、289、299、316 nm 光谱位于臭氧吸收较强的区域,会与臭氧发生不同程度的吸收,其中臭氧对 266 nm 激光吸收最强,对 316 nm 波长吸收最弱。激光的后向散射回波信号被同轴安装的卡塞格林望远镜接收,经过小孔光阑进入后继分光系统,接收信号经过二向色镜组后分光,分别反射到 266、289、299、316、532P、532S 六个通道中,被相应的光电倍增管接收。光电倍增管将光信号转换成电信号,传送给 A/D 采集卡,然后传送给工控机,经过算法反演^[9],就可以得到空气中的臭氧浓度廓线和气溶胶消光系数廓线。

雷达系统中的辅助控制单元可以对雷达系统的户外方舱进行舱内温、湿度的自动控制,保证舱内温度、湿度恒定;也可以根据需要搭载 3D 扫描头进行三维立体扫描观测,全面了解区域内的臭氧分布状况。除此之外,还具有一些辅助功能,如一键启动、应急保护等,方便用户对设备的操作,提高设备的安全性。雷达系统的方舱配置有 2 000 W 的冷暖空调,具有防尘防水防雾功能,防护等级达到 IP56,可以满足户外不同地区、不同季节的昼夜连续观测需求,具有广泛的环境适应性。

3 测量结果分析和讨论

2018 年 7 月,研制成功的激光雷达系统在合肥科学岛进行观测试验,地点位于中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心的外场试验场地(北纬 N31.90°,东经 E117.17°)。激光雷达的参数设置为:每组数据采集 2 000 发激光脉冲,时间分辨率 15 min,高度分辨率 7.5 m。

3.1 臭氧探测结果分析

图 2 是 2018 年 7 月 13~15 日激光雷达臭氧监测结果,图 3 是这段时间内近地面的气象条件。13~15 日主导风向为东南风,14 日温度较其他两日高,湿度相对较低,有利于臭氧的生成,14 日臭氧浓度较高达到 70 ppb(1 ppb=10⁻⁹),夜间出现次峰,15 日臭氧浓度相对浓度高值持续时间较长。

图 2 的反演图谱显示,在白天,激光雷达的臭氧探测高度为 3 km,在夜间由于没有太阳背景光的干扰,探测高度比白天高,可以达到 5 km 或以上。从图 2、3 中还可以看出,臭氧浓度的日变化比较明显,随着温度的升高,臭氧浓度也逐渐上升,即臭氧浓度与温度呈正相关的关系^[10]。

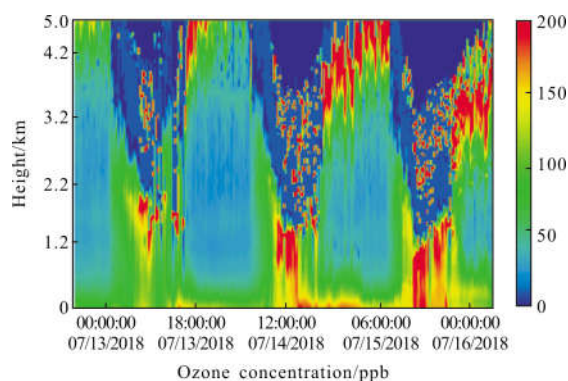


图 2 2018 年 7 月 13~15 日观测结果

Fig.2 Observation result on July 13th-15th, 2018

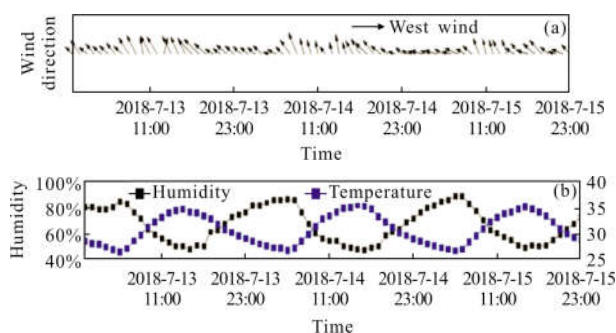


图 3 近地面气象条件

Fig.3 Weather condition in near ground

图 4 是 2018 年 7 月 13~16 日近地面臭氧浓度廓线和 300 m 高度臭氧激光雷达测量的臭氧浓度廓线对比,从两条廓线的对比结果来看,趋势基本是一致的,都是在白天中午时分臭氧浓度值较高,夜晚臭氧浓度呈现下降趋势,测量结果均出现明显的日变化特征,两者对比结果表明了雷达测量的可靠性。

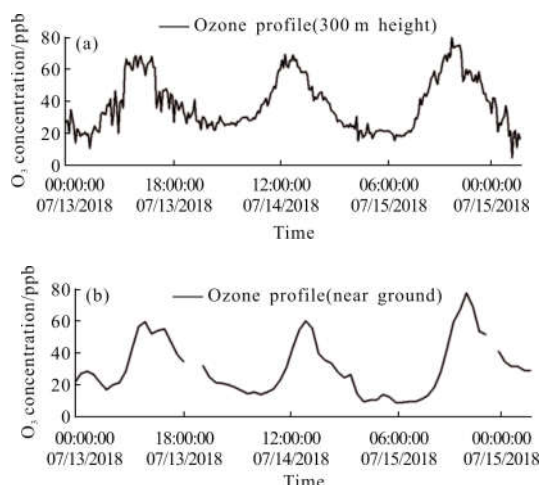


图 4 300 m 高度和近地面数据对比

Fig.4 Comparison of data between 300 m and near ground

3.2 气溶胶探测结果分析

图 5 是 2018 年 7 月 13~15 日气溶胶的消光系数反演图谱,可以看出早晚气溶胶的消光系数较大,气溶胶主要分布在 2 km 以下,白天的边界层高度较夜晚有所上升。7 月 13 日和 14 日白天气溶胶消光系数较低,空气质量较好,14 日夜间观察到有气溶胶沉降现象,结合当日气象条件,应该是外部传输所致,在 15 日上午气溶胶的含量达到高峰,污染较为严重,随着白天风速的扩散,在下午气溶胶含量又逐渐降低,天气转好。雷达在 7 月 14 日晚上探测到了 8km 处和 15km 处的双层卷云结构。从 7 月 13~15 日这三天的观测结果来看,激光雷达气溶胶白天最大探测高度可以达到 10 km 以上,晚上最大高度可以达到 15 km,满足设计指标要求。

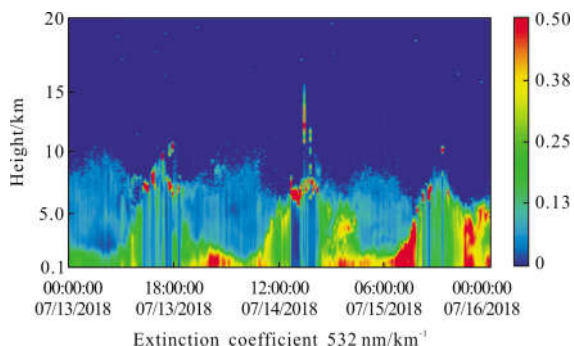


图 5 气溶胶消光系数(532 nm)

Fig.5 Aerosol extinction coefficient (532 nm)

3.3 臭氧水平探测对比试验

为了进一步验证臭氧反演结果的可靠性,在激

光雷达的发射窗口安装了一个水平扫描振镜装置,将激光雷达的垂直信号水平反射出去,来探测水平方向上的臭氧浓度。并在水平方向安装了臭氧分析仪,将臭氧分析仪测量的数据与激光雷达作比对。选用的臭氧分析仪是美国 ThermoFisher 公司的 49i 型臭氧分析仪,采用紫外光度法,最小探测精度可达 0.05 ppb,将分析仪放在距离激光雷达前方的大约 300 m 距离,并比较雷达和臭氧分析仪测量数值。

对比试验在 2018 年 8 月 2 日白天展开,当日天气晴朗,最高温度 35℃,最低温度 26℃,风向风速为东风 3~4 级,试验结果如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,雷达的测量结果与臭氧分析仪有较好的一致性,图 6(b)中的相对误差计算显示最大误差不超过 10%,表明研制的激光雷达探测数据结果准确可靠。

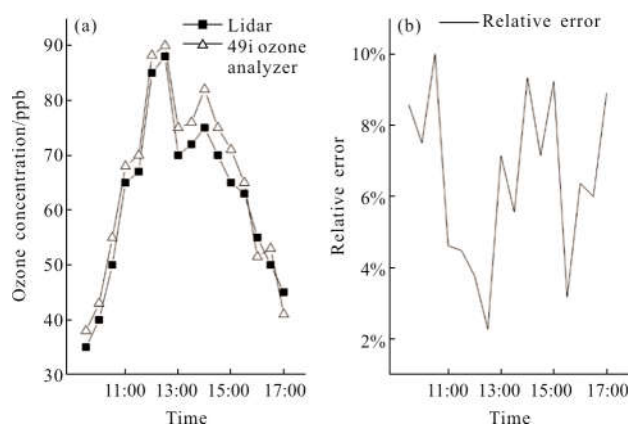


图 6 激光雷达和 49i 臭氧分析仪数据对比

Fig.6 Comparison experiment between Lidar and 49i ozone analyzer

4 结论

研制了一款可用于户外长期观测的臭氧和气溶胶探测激光雷达,观测试验表明,臭氧的探测高度白天可以达到 3 km,晚上可以达到 5 km,气溶胶的探测高度白天可以达到 10 km,晚上可以达到 15 km。雷达可以满足高空臭氧和气溶胶时空演变的长期观测需求,配置有防尘防水的恒温方舱,可以直接放置在户外工作。通过和臭氧分析仪的水平对比试验显示,臭氧浓度的最大探测误差小于 10%,具备较好的探测精度,目前该款激光雷达已经在全国多个环境监测中心站和科研院所获得了应用,取得了良好的经济效益,为当地的臭氧生成和气溶胶污染预警预报发挥重要作用。

参考文献:

- [1] Chi Xiyuan, Liu Cheng, Xie Zhouqing, et al. Observations of ozone vertical profiles and corresponding precursors in the low troposphere in Beijing, China[J]. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 224–235.
- [2] He Tingyao, Chen Yingying, Samo Stanic, et al. Properties of tropospheric aerosols observed over southwest Slovenia[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, 217: 380–387.
- [3] Browell E V, Carter A F, Shipley S T, et al. NASA multipurpose airborne DIAL system and measurements of ozone and aerosol profiles[J]. *Applied Optics*, 1983, 22 (4): 522–534.
- [4] Russell De Young, William Carrion, Rene Ganoë, et al. Langley mobile ozone lidar: ozone and aerosol atmospheric profiling for air quality research[J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (3): 721–730.
- [5] Langford A O, Alvarez II R J, Brioude J. Coordinated profiling of stratospheric intrusions and transported pollution by the Tropospheric Ozone Lidar Network (TOLNet) and NASA Alpha Jet experiment (AJAX): Observations and comparison to HYSPLIT, RAQMS, and FLEXPART [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 174: 1–14.
- [6] Proffitt M H, Langford A O. Ground-based differential absorption lidar system for day or night measurements of ozone throughout the free troposphere [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(12): 2568–2585.
- [7] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652–653.
- [8] Shi Kuang, Michael J Newchurch, John Burris, et al. Ground-based lidar for atmospheric boundary layer ozone measurements[J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (15): 3557–3566.
- [9] Immler F. A new algorithm for simultaneous ozone and aerosol retrieval from tropospheric DIAL measurements [J]. *Applied Physics B*, 2003, 76: 593–596.
- [10] Xiang Yan, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, et al. Differential absorption lidar combined with numerical model used for detecting distribution of ozone during summer in Hangzhou [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1883–1887. (in Chinese)
项衍, 刘建国, 张天舒, 等. 基于差分吸收激光雷达和数值模式探测杭州夏季臭氧分布[J]. *光学精密工程*, 2018, 26 (8): 1883–1887.