

文章编号 1004-924X(2018)08-1882-06

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

项 衍^{1,2}, 刘建国¹, 张天舒^{1*}, 范广强¹, 孙新会¹, 吕立慧^{1,2}

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要:为获取杭州市夏季臭氧浓度时空分布特征和气象要素对臭氧浓度的影响,利用臭氧差分吸收激光雷达开展观测,同时利用 WRF-Chem 模式模拟臭氧时空特征和气象要素。实验结果表明:臭氧浓度模拟结果与激光雷达的观测结果具有很好的一致性。2016 年夏季,杭州市 18 天内发生了 4 次臭氧重污染,每次持续 2 到 5 天,最高浓度达 550 nL/L。高空 1~2 km 存在较高浓度的臭氧污染层,并存在垂直和水平传输,对近地面臭氧污染有明显影响。近地面臭氧浓度平均值最低值出现在凌晨 2 时左右,为 75 nL/L;平均浓度最高值在中午 12 时左右出现,为 90 nL/L。近地面臭氧浓度的日变化明显,而高空的臭氧浓度日变化不明显。臭氧差分吸收激光雷达系统对臭氧时空分布的探测是可靠的。强太阳辐射、高温、低湿都是臭氧污染形成的有利环境条件,而强风对局地臭氧有扩散作用,降雨对臭氧有很好的消除作用。

关键词:差分吸收激光雷达;臭氧;WRF-Chem;气象要素;传输

中图分类号:TN958.98 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182608.1882

Differential absorption lidar combined with numerical model used for detecting distribution of ozone during summer in Hangzhou

XIANG Yan^{1,2}, LIU Jian-guo¹, ZHANG Tian-shu^{1*}, FAN Guang-qiang¹, SUN Xin-hui¹, LÜ Li-hui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environment Optics and Technology, 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)

* Corresponding author, E-mail: tshang@aiofm.ac.cn

Abstract: An ozone differential absorption lidar (DIAL) was used to carry out observations of the spatial and temporal distribution of summer ozone concentrations in Hangzhou, China, and to study how they are influenced by meteorological elements. The WRF-Chem model was used to simulate the characteristics of the ozone distribution, and for the analysis of meteorological factors. The simulated values for ozone concentration were in good agreement with the observed values obtained using the DIAL. In the summer of 2016, ozone pollution occurred on four occasions in 18 days, with each occasion lasting between two to five days, and with the highest concentration of 550 nL/L detected. There was

收稿日期:2018-03-26;修订日期:2018-05-23.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFC0213002, No. 2016YFC0200401);大气重污染成因与治理攻关项目(No. DDGG0102);国家科技支撑项目(No. 2014BAC21B01);国家重点基础研究发展规划项目(2014CB447900);国家自然科学基金资助项目(No. 41605020)

a highly concentrated ozone layer at an altitude of one to two km, with vertical and horizontal movement having a significant influence on the ozone pollution near the ground. The lowest mean value of ozone concentration near the ground was 75 nL/L, which occurred around 2:00 am, while the average highest value was 90 nL/L, which occurred at 12:00 am. The daily ozone concentration near ground level exhibited diurnal variation, a pattern not apparent in the upper air. The DIAL system was reliable for the detection of ozone. Conditions of strong solar radiation, high temperature, and low humidity were seen as being conducive to the formation of ozone, while strong winds and rain had a diffusing effect.

Key words: differential absorption lidar; ozone; WRF-Chem; meteorological factors; transmission

1 引 言

臭氧是地球大气层中重要的组成气体,分布在平流层和对流层中^[1]。平流层中的臭氧占臭氧总量的 90%,主要作用是吸收强烈的太阳辐射,保护地球上的动物、植物等^[2]。对流层中的臭氧占臭氧总量的 10%,作为一种重要的温室气体,通过吸收地气系统中的长波辐射来加热大气。臭氧是有利的气体,但是也会成为对地球不利的气体,高浓度的地面臭氧会引发城市光化学烟雾,给人类健康带来威胁,长时间暴露在臭氧下可能会损伤人体的呼吸道和粘膜,甚至导致癌症或其他器官的永久性损伤^[3]。臭氧的含量变化直接或间接影响人类的生活。自 20 世纪 80 年代 Paul 发现南极臭氧空洞以来,大气臭氧的变化引起了人们的广泛关注,监测臭氧的技术设备也越来越多。

作为一种主动遥感大气的监测设备,差分吸收激光雷达(Differential Absorption Lidar, DIAL)具有很高的时空分辨率,可以持续探测大气污染物时空分布特征^[4-5]。DIAL 最早在 1996 年由 Schotland 提出,最初用于开展水汽的研究,后来逐渐用于大气气态污染物的探测。范广强等人于 2012 年提出一种新的基于 DIAL 监测对流层臭氧浓度反演算法,算法可以减少气溶胶浓度对测量结果引起的误差^[6]。苑克娥等人于 2013 年利用紫外 DIAL 对北京南郊地区对流层底层臭氧垂直分布进行探测,探测结果与探空气球具有较好的一致性^[7]。Xing 等人于 2016 年 5 月利用 DIAL 对上海地区进行实时观测,结合 OMI 卫星反演发现臭氧浓度的增加主要是本地产生,传输不是主要原因^[8]。

随着计算机技术和空气质量模式的快速发展,利用数值模式开展包括臭氧在内的气态污染

物研究得到了广泛的应用,特别是以 WRF-Chem、CMAQ 等为代表的第三代空气质量模型系统。研究表明,数值模式可以很好地模拟大气污染物的传输、干湿沉降、气象化学等。Gao 等人利用 WRF-Chem 模式模拟评估 2013 年 5 月长三角地区的臭氧浓度,发现上风向污染地区会引起长三角地区发生臭氧污染,同时垂直扩散可以加快臭氧等消耗^[9]。Li 等人利用 WRF-Chem 模拟发现珠三角地区的城市化和热岛效应在臭氧的形成中起着重要作用^[10]。本文利用观测和数值模拟的方式对 2016 年夏季杭州地区的臭氧时空分布开展研究, DIAL 位于浙江省环境监测站(30.27°E, 120.129°N),观测时间从 2016 年 8 月 24 号持续到 9 月 10 号,总共 18 天。

2 实验与方法

2.1 DIAL 系统

实验采用的 DIAL 系统由中科院安光所自主研发,整个系统主要由激光发射子系统、接收子系统、数据采集控制子系统三部分组成。图 1 给出了系统的基本示意图,表 1 给出了系统主要参数。

DIAL 采用 Nd:YAG 激光器,输出 266 nm 波长的激光束,输出能量每脉冲 90 mJ,工作频率为 10 Hz。输出的 266 nm 激光束进入充满 D₂ 的拉曼管中,通过受激拉曼效应产生 289 nm 和 316 nm 的激光,加上残留的 266 nm 激光,共三个波长的激光束经过扩束镜发射到空气中。望远镜接收三个波长的后向散射光,通过小孔光阑后入射至光栅光谱仪进行分光,分离后的三个波长进入对应的光电倍增管(Photoelectric Multiple-Tube, PMT),光电转换后由数据采集系统采集得到原始信号并存储至计算机,经过差分吸收算法反演即可得到探测路径上臭氧浓度的时空分布。

表 1 DIAL 的关键参数

Tab. 1 Key technical parameters of DIAL system

Parameters	Specification
Transmitter	
Laser source	Nd:YAG(266 nm)
Wavelength/nm	266 289, 316
Beam divergence/mrad	0.3
Receiver	
Telescope type	Cassegrain
Telescope diameter/mm	400
Field of view/mrad	0.5
Detector	PMT

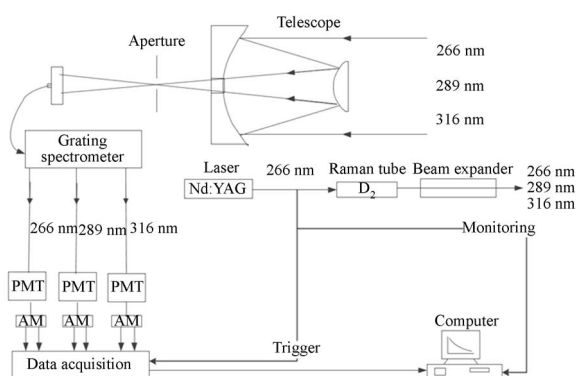


图 1 DIAL 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DIAL

2.2 WRF-Chem 模拟配置

采用 WRF-Chem3. 7. 1 (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>)对臭氧进行模拟,采用双向反馈的双重嵌套网格,水平方向采用兰勃特投影,模拟中心点为(35°E, 110°N)。如图 2 所示,第一层覆盖中国大部分地区,水平分辨率为 20 km;第二层覆盖长三角地区,水平分辨率为 4 km。垂直方向采用地形追随坐标系,共设置 41 层,为了更细致地描述边界层结果,边界层高度上下的分辨率设置得较高,3 km 以下设置了 24 层,垂直层顶气压为 50 hPa。模拟时间段为 2016 年 8 月 20 日至 9 月 10 日。模型所需的气象输入数据采用美国国家环境预测中心发布(NCEP)的 FNL 再分析数据,网格分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 6 h,人为源清单采用清华大学 2012 年 MEIC 清单,生物排放源采用 MEGAN2。其他重要参数如表 2 所示。

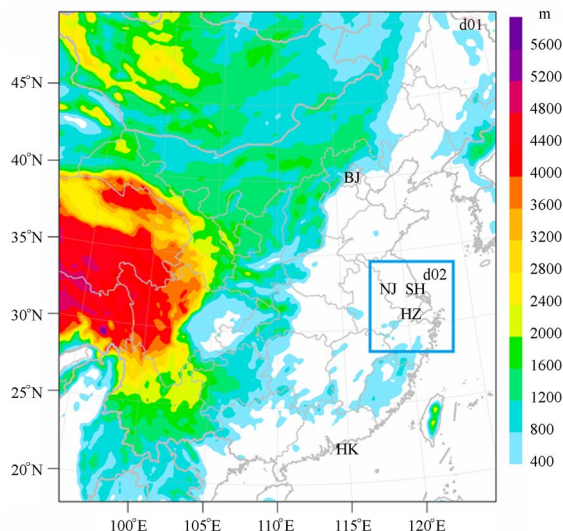


图 2 WRF-Chem 模型区域配置和地形高度(HZ、NJ、SH 分别代表杭州、南京和上海)

Fig. 2 Nesting used in WRF-Chem model with two domains and topographic height (HZ, NJ, and SH represent Hangzhou, Nanjing and Shanghai)

表 2 WRF-Chem 模型关键配置参数

Tab. 2 Key parameters of WRF-Chem model

Items	Contents
Microphysics	Lin <i>et al.</i> scheme
Longwave radiation	RRTM scheme
Shortwave radiation	RRTMG shortwave
Land surface	Noah land surface model
Boundary layer scheme	Yonsei University scheme
Cumulus parameterization	Grell-Freitas ensemble scheme
Gas-phase chemistry	Carbon Bond Mechanism version Z (CBM-Z)

3 结果与讨论

3.1 臭氧浓度分析

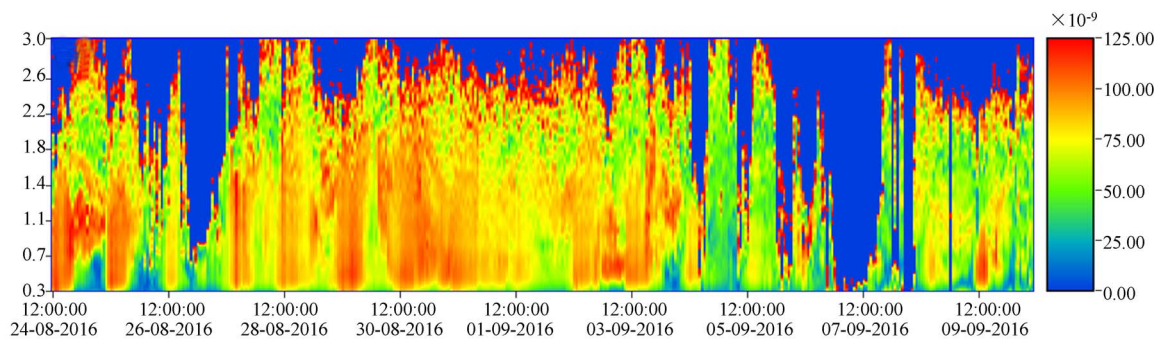
图 3 给出观测和模拟的时间-高度序列结果(彩图见期刊电子版),图 3(a)为 DIAL 观测值(图中深蓝色为信噪比低造成的无效数据),图 3(b)为 WRF-Chem 模拟值。整体上,由于太阳辐射强度原因,臭氧浓度有明显的日变化,浓度值白天高,夜间低。8 月份臭氧污染高于 9 月份。从 2016 年 8 月 24 号到 2016 年 9 月 10 号,共 18 天内,杭州共经历了 4 次不同程度的污染,其

中 3 次重度污染,1 次轻度污染。最大臭氧浓度为 550×10^{-9} 。

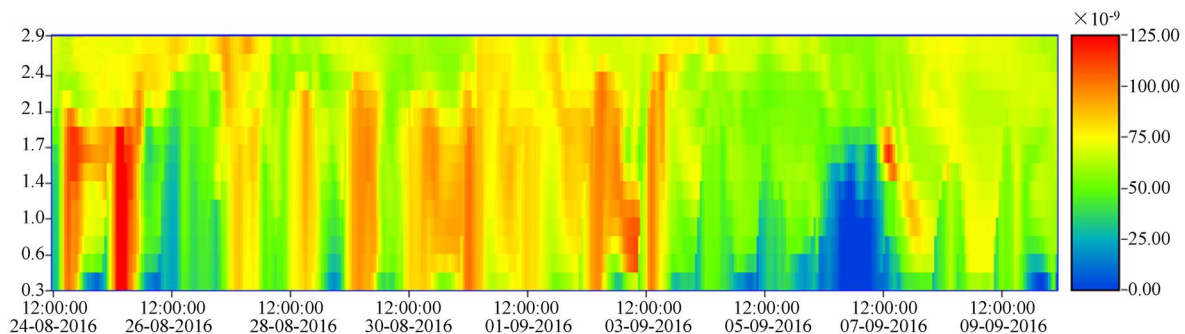
8 月 24 号到 8 月 25 号,臭氧污染程度最重,白天最大值达到 550×10^{-9} 。8 月 26 号,由于下雨,未能引起高浓度的臭氧污染,同时下雨造成激光雷达信号的信噪比下降,影响数据反演质量;而模型却不受下雨的影响,模拟的臭氧浓度相对较低,与实际情况相符合。8 月 27 号到 9 月 4 号,持续发生了高浓度的臭氧污染,在 9 月 2 号凌晨到白天高空出现了臭氧的向下传输,9 月 3 号夜间至 9 月 4 号凌晨出现了高空臭氧的向上传输。

9 月 5 号到 9 月 10 号,臭氧污染相对较小,9 月 5 号、6 号、7 号出现了不同程度的降雨,太阳辐射强度弱,气温低,臭氧浓度较小。9 月 8 号凌晨高空出现了臭氧下沉,而激光雷达由于下雨造成的信噪比下降,却没有很好地获取这一下沉过程。在 9 月 9 号,出现了短暂的臭氧污染,10 号的降雨加快了臭氧的消耗。

通过对比激光雷达反演的结果和模型模拟的结果发现,两者具有很好的一致性,同时模拟值要低于实测值,分析原因,可能是模型低估了清单初值和气象场模拟的不确定带来的误差。



(a) DIAL



(b) WRF-Chem

图 3 臭氧浓度时空分布图

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of ozone concentration

3.2 气象要素的影响

气象条件是臭氧污染的外因。高温、强太阳辐射、低云量、相对湿度较低的情况下,往往容易出现高臭氧浓度值。图 4 给出了在模拟和观测时间内,气象要素和地面臭氧的影响。对比发现,温度与臭氧浓度呈一定程度的正相关关系,在日照强度上升时,温度升高,臭氧浓度同步上升。而夜间和下雨天(如 8 月 26 号,9 月 6 号),温度较低,臭氧浓度相对较低。

相对湿度与臭氧浓度呈一定程度的反相关关

系,特别是相对湿度高于 80%,臭氧浓度基本在 30×10^{-9} 以下;而相对湿度低于 60%,空气相对较干时,臭氧浓度大多在 80×10^{-9} 左右。

风速与臭氧浓度呈一定的反相关关系,但相关性低于温度和相对湿度对臭氧的相关性,分析原因可能是由于观测时间内,在小风时臭氧浓度累积,造成臭氧浓度升高,大风时臭氧浓度扩散,造成臭氧浓度较低;但是当出现外来传输时,又会造成臭氧浓度升高,如 8 月 29 号的臭氧高空传输。

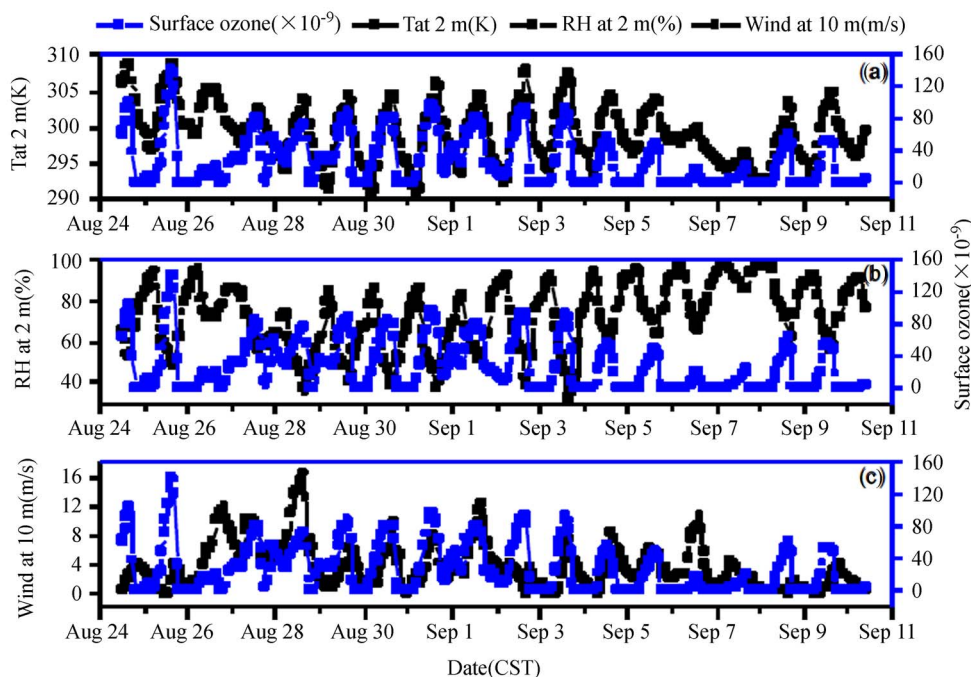


图 4 地面臭氧浓度对比图(蓝线). (a)、(b)和(c)中的黑线分别代表地面 2 m 温度、2 m 湿度和 10 m/s 风速
Fig. 4 An hour series of surface ozone concentrations (blue line), the black of (a), (b) and (c) represent the hour series of temperature at 2 m, relative humidity at 2 m and wind velocity at 10 m/s respectively

4 结 论

DIAL 可以很好地探测臭氧的污染状况,具有高时间分辨率、空间分辨率,但是在重污染天气、厚云、大雨等情况下,数据信噪比会下降,从而影响数据质量;而空气质量模型却不受天气系统的影响,但是由于计算能力限制,模型不能达到同

激光雷达一样的空间分辨率,因此可以结合两者优点来提升数据分析能力。DIAL 探测到杭州地区在 2016 年 8 月到 9 月的臭氧污染过程,发现在高空 1~2 km 出存在垂直和水平方向传输等臭氧污染层,18 天内发生了 4 次臭氧重污染,每次持续 2~5 天。强太阳辐射、高温、低湿都是臭氧污染形成的有利环境条件,而强风对局地臭氧有扩散作用,降雨对臭氧有很好的消除作用。

参考文献:

- [1] 王振亚,李海洋,周士康. 平流层中臭氧耗减化学研究进展[J]. 科学通报,2001(8):619-625.
WANG ZH Y, LI H Y, ZHOU SH K. Progress in ozone depletion chemistry in stratosphere[J]. *Chinese Scientific Bulletin*,2001(8):619-625. (in Chinese)
- [2] 张健恺. 气候变化对北半球臭氧总量变化影响的研究[D]. 兰州:兰州大学,2016.
ZHANG J K. *A Study of Climate Change Impact on Total Ozone Column Over the Northern Hemisphere* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)
- [3] 吴瑞霞. 北京市夏季污染物垂直分布特征研究[D]. 南京:南京气象学院,2004.
WU R X. *Air Pollution Characteristics of Beijing city in Summer* [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2004. (in Chinese)
- [4] 刘秋武,陈亚峰,王杰,等. 差分吸收 NO₂ 激光雷达波长漂移和能量波动对浓度反演的影响[J]. 光学精密工程,2018,26(2):253-260.
LIU Q W, CHEN Y F, WANG J, et al.. Effects of wavelength shift and energy fluctuation on inversion of NO₂ differential absorption lidar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(2):253-260. (in Chinese)
- [5] 赵志龙,吴谨,王海涛,等. 微弱回波条件下差分合成孔径激光雷达成像实验演示[J]. 光学精密工程,2018,26(2):276-283.
ZHAO ZH L, WU J, WANG H T, et al.. Experimental demonstration of differential synthetic aper-

- ture lidar imaging at very low return level[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 276-283. (in Chinese)
- [6] 范广强, 刘建国, 刘文清, 等. 基于差分吸收激光雷达的一种新的对流层臭氧浓度反演算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012(12): 3304-3308.
- FAN G Q, LIU J G, LIU W Q, *et al.*. A new retrieval method for ozone concentration at troposphere based on differential absorption lidar [J]. *Spectroscopy and Spectual Analysis*, 2012 (12): 3304-3308. (in Chinese)
- [7] 苑克斌, 张世国, 胡顺星, 等. 对流层低层臭氧的差分吸收激光雷达测量[J]. *强激光与粒子束*, 2013 (3): 553-556.
- YUAN K E, ZHANG SH G, HU SH X, *et al.*. Measurements of ozone using ultraviolet differential absorption lidar in low troposphere[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013(3): 553-556. (in Chinese)
- [8] XING C Z, LIU C, WANG S S, *et al.*. Observations of the vertical distributions of summertime atmospheric pollutants and the corresponding ozone production in Shanghai, China [J]. *Atmos Chem. Phys.*, 2017, 17(23): 14275-14289.
- [9] GAO J H, ZHU B, XIAO H, *et al.*. A case study of surface ozone source apportionment during a high concentration episode, under frequent shifting wind conditions over the Yangtze River Delta, China [J]. *Sci. Total Environ.*, 2016, 544: 853-863.
- [10] LI M M, SONG Y, MAO Z C, *et al.*. Impacts of thermal circulations induced by urbanization on ozone formation in the Pearl River Delta region, China [J]. *Atmos Environ.*, 2016, 127: 382-392.

作者简介:



项 衍(1990—),男,安徽宿松人,博士,2013年于安徽师范大学获得学士学位,2018年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事激光雷达大气探测、数值模式模拟和数据同化等方面的研究。E-mail: yxiang@aiofm. ac. cn

通讯作者:



张天舒(1977—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1999年于长春理工大学获得学士学位,2003年、2005年于中科院安光所分别获得硕士、博士学位,主要从事大气环境污染光学检测技术、目标散射特性及遥感监测技术等方面的研究。E-mail: tszhang@aiofm. ac. cn

导师简介:



刘建国(1968—),男,甘肃天水人,研究员,博士生导师,1991年于西北师范大学获得学士学位,1994年、1999年于中科院安光所分别获得硕士、博士学位,主要从事环境污染光学监测新技术、目标散射特性及遥感监测技术等方面的研究。E-mail: jgliu@aiofm. ac. cn