

基于图像边缘检测法反演大气边界层高度

项 衍^{1,2} 叶擎昊³ 刘建国¹ 张天舒^{1*} 范广强¹ 周培松¹ 吕立慧^{1,2} 刘 洋^{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 230027

³上海卫星工程研究所, 上海 200240

摘要 梯度法、标准偏差法只能反演单一时刻的大气边界层高度, 为此, 提出了一种可以反演一段时间内大气边界层高度的图像边缘检测法。通过对常规方法的介绍和分析, 说明研究图像边缘检测法的必要性。利用自主研发的激光雷达实测数据进行反演分析了一个昼夜和 4 种不同天气背景下的大气边界层高度, 图像边缘检测方法与传统方法和标准偏差法反演大气边界层高度的均方根误差最小值为 9.4 m 和 11.4 m。实验结果表明, 该方法简单可靠、准确性高、不需要选取初始值, 与传统常规方法相比具有更低的敏感性和更强的自适应性。

关键词 大气光学; 大气边界层高度; 边缘检测; 激光雷达; 数学形态学

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0704003

Retrieve of Planetary Boundary Layer Height Based on Image Edge Detection

Xiang Yan^{1,2} Ye Qinghao³ Liu Jianguo¹ Zhang Tianshu¹ Fan Guangqiang¹
Zhou Peisong¹ Lü Lihui^{1,2} Liu Yang^{1,2}

¹Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

³Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

Abstract The gradient method and standard deviation method are only the inversion of the atmospheric boundary layer height of the single moment. For this issue, an image edge detection method is presented using retrieve the height of atmospheric boundary layer over a period of time. Through the introduction and analysis of the conventional method, the necessity of the research on image edge detection is illustrated. The atmospheric boundary layer height of a day and night and four kinds of different weather backgrounds are analyzed by using the independent research and development lidar to measure real-time data. The minimum root mean square errors of the image edge detection method with the gradient method and the standard deviation method for the inversion of the atmospheric boundary layer height are 9.4 m and 11.4 m, respectively. Experimental results show that the proposed algorithm is simple, reliable and high accuracy, and there is no need to choose the initial value, which has lower sensitivity and stronger adaptability than the traditional methods.

Key words atmospheric optics; planetary boundary layer height; edge detection; lidar; mathematical morphology

OCIS codes 010.1290; 110.2970; 010.3640; 080.2720; 280.1350

1 引 言

大气边界层(PBL)是贴近地球表面并受之直接作用的气层,是人类活动和各项生态环境过程发生和发

收稿日期: 2015-12-21; 收到修改稿日期: 2016-03-11

基金项目: 国家 863 计划(2014AA06A512)、国家自然科学基金青年基金(41305126)

作者简介: 项 衍(1990—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: yxiang@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968—),男,博士,研究员,主要从事环境污染光学检测技术等方面研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn

展的主要气层^[1]。与上层自由大气交界处存在的逆温层所对应高度被定义为大气边界层高度(PBLH)。边界层高度是用来描述边界层结构特征的一个基本参数变量,在边界层参数化、污染物扩散以及边界层结构等问题中都是一个重要的参数^[2]。它除了受大气层结影响外,还受到下垫面状况的影响。

目前无法直接测量大气边界层高度,只能依赖于其他资料^[3]。求解大气边界层高度方法众多,但每种求解方法都有各自的适用性和局限性。本文提出采用图像边缘检测方法中的数学形态学算法来提取激光雷达雷达灰度图像的边缘,再结合大气边界层高度的物理意义所给出的限制条件来获取大气边界层高度。

2 激光雷达系统

激光雷达是探测对流层大气的一种有效手段,被广泛应用于大气气溶胶、大气成分和对云的研究中^[4-7]。激光雷达具有很高的时间和空间分辨率,可长时间连续不间断的自动工作,因此可以更好地实时、连续测量大气边界层结构的时空分布^[8]。

2015年1月至3月,中国科学院安徽光学精密机械研究所自行研制的大气细粒子激光雷达在北京琉璃河绿岛生态园区(E115.9951, N39.603063)进行了为期一个季度的观测实验。雷达系统主要由激光发射单元、接收光学单元、后继光学单元和信号采集控制单元组成。表1给出了该激光雷达系统的关键参数。

表1 激光雷达系统关键参数
Table 1 Key parameters of lidar system

Parameter	Description
Laser source	Nd:YAG
Wavelength	532 nm
Resolution	7.5 m
Detect height	8 km at daytime and 12 km at nighttime

3 利用激光雷达数据反演大气边界层高度计算方法介绍

由于大气边界层与上部的自由大气层之间覆盖逆温的作用,大量的大气气溶胶粒子富集在大气边界层内,而逆温层上部的自由大气中气溶胶浓度则非常低。也就是说大气边界层到自由大气之间气溶胶的浓度减小的非常快。

对激光雷达接收到的米散射回波信号处理得到激光雷达距离平方校正回波信号(PRR)为

$$P(R)R^2 = CY(R)\beta(R, \lambda)T(R, \lambda), \quad (1)$$

式中 R 为探测高度, C 为激光雷达的系统因子, $Y(R)$ 为与探测高度 R 相关的几何因子, λ 为激光波长, $\beta(R, \lambda)$ 为探测高度 R 处的大气后向散射系数, $T(R, \lambda)$ 为大气透射率。PRR 廓线强度对应于相应高度大气气溶胶浓度的大小, PRR 廓线梯度变化代表着大气气溶胶浓度的变化, 这个梯度变化最大的位置就是大气边界层的高度^[9]。

3.1 梯度法

梯度法^[10]是根据回波信号随高度衰减速率大小作为判断大气边界层高度的依据。定义 PRR 梯度为

$$D(R) = d[P(R)R^2] / d(R), \quad (2)$$

这个梯度函数反映了 PRR 在不同高度 R 处的衰减变化情况。大气边界层高度对应于 PRR 衰减最快的位置, 也就是(2)式取最小值时所对应的高度值。梯度法适用于信噪比较高且边界层变化较明显的情况, 若边界层变化缓慢或者在边界层上方有低云存在的情况下, 反演得到的结果不够准确。

3.2 标准偏差法

标准偏差法^[11]是利用一定高度内 PRR 测量数据的离散程度来提取大气边界层高度, 定义 PRR 的标准偏差为

$$S_{\text{STD}}(R) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P(R)_i R_i^2 - \overline{P(R)R^2}]^2 \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

式中 N 表示求取偏差的点数,标准偏差 $S_{STD}(R)$ 反映了高度 R 处 PRR 离散情况,标准偏差越大表示 PRR 离散性越大,即变化越剧烈,因此可将 $S_{STD}(R)$ 取得最大值的高度作为大气边界层高度。标准偏差法易受到 PRR 数据自身噪声和气溶胶结构的干扰,并且 N 的选取也会影响到结果的求取。

4 基于激光雷达图像检测大气边界层高度方法

4.1 边缘检测原理

大气边界层高度是 PRR 廓线梯度变化最大的位置,而反映到图像上面,这个梯度变化最大的位置也就是图像的边缘部分。因此本文的研究重点是通过获取激光雷达灰度图像的边缘来确定大气边界层高度。

4.2 边缘检测提取步骤

边缘检测是基于物体和背景间灰度或纹理特性上某种不连续或突变性的一种检测^[12-13]。传统的边缘检测对噪声都较为敏感,而且在检测边缘的同时会对噪声进行加强。近年来数学形态学理论的不完善与发展使其在检测图像边缘的连续性及各向同性方面都优于传统方法,主要表现为对边缘方向不敏感、能在很大程度上抑制噪声和探测真正的边缘,既能有效地滤除噪声,又可以保留图像中的原有细节信息^[14-16]。图 1 给出了基于数学形态学的图像边缘检测方法反演大气边界层高度的主要步骤。

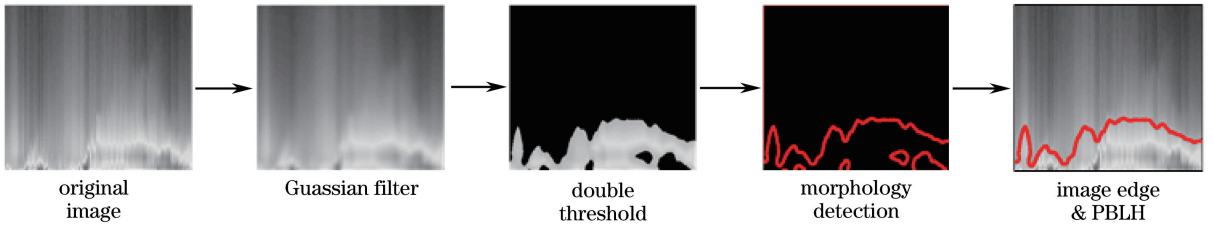


图 1 图像边缘检测方法反演 PBLH 步骤

Fig. 1 Image edge detection algorithm to retrieve PBLH steps

1) 绘制原始图像:利用激光雷达的原始数据计算反演得到距离较正后的回波信号,将回波信号 2 km 以下的数值均匀地对应到 256 阶的灰度颜色条,绘制出回波信号的灰度图像,将此图像作为形态学边缘检测的原始图像。

2) 高斯滤波:对灰度图像进行高斯滤波,根据待滤波的像元点及其邻域点的灰度值按一定的参数规则进行加权平均,可以有效滤去理想图像中叠加的噪声同时也能很好地保持图像轮廓信息。本文采用的方法是将输入图像和二维高斯核进行一次卷积,将卷积和当作输出像素值,从而可以得到高斯滤波后的输出图像。

3) 双阈值操作:根据图像中要提取的目标区域与其背景在灰度特性上的差异,把图像看作具有不同灰度级的两类区域(目标区域和背景区域)的组合,选取两个阈值确定一个阈值区间,在这个阈值范围内的像元点属于目标区域,而不在这个阈值范围内的像元点属于背景区域,从而产生相应的二值图像^[17]。将二值图像与原始图像作“与”操作,保留原始图像在二值图像中对应灰度为 1 的像元点区域,而丢弃对应灰度为 0 的区域,将“与”操作所得到的图像作为下一步的输入。

4) 形态学边缘检测:基于数学形态学的图像边缘处理是用具有一定形态的结构元素去提取图像中对应形状,腐蚀和膨胀是数学形态学中最基本的两个形态运算^[18]。腐蚀是删除图像边界某些像元,使得图像朝灰度值变小的方向收缩。而膨胀是添加图像边界某些像元,使得图像朝灰度值变大的方向延伸。腐蚀和膨胀两种操作对边缘点所引起的变化最大,正是基于这点,将腐蚀和膨胀以后的图像与原图像作差,就可以得到局部变化最大的点,即为边缘点,连接这些边缘点可以得到图像的边缘^[19]。

5) 提取边界层高度:大气边界层高度基本在 2 km 以下,因此为了使检测结果更准确以及更快地收敛,限制检测高度仅在 2 km 以下,而不是在整个探测高度上面检测。此外在大气稳定的情况下,大气边界层高度是连续变化的,很短时间间隔内边界层高度不会出现突变,而是缓慢变化。基于这点可以剔除一些孤立的、非连通的边缘。将目标边缘在图像中所在的位置坐标继续进行简单的运算处理就可以得到边界层高度的实际数值。

5 实验结果分析

5.1 昼夜边界层高度

选取两个时间段的数据来反演分析白天和夜间边界层高度的变化,并且与传统梯度法进行结果对比验证。白天时间段选取的是2015年2月1日早7点至中午11点连续的4h数据,当天空气质量级别为轻度污染、气温 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、微风、无持续风向。夜间时间段选取的是2015年1月23日19时至21时连续的4h数据。当天空气质量级别为重度污染、气温 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、微风、无持续风向。

如图2(a)所示,图中黑线、蓝线和红线分别代表梯度法、标准偏差法和图像边缘检测法反演的白天数据结果,图2(b)是每组回波信号梯度的叠加图。从图中可知,图像边缘检测法与梯度法和标准偏差法所求得的结果非常接近,均方根误差分别为23.0和44.6 m,并且回波信号梯度也是连续变化的,随着时间变化呈逐渐升高的趋势。对此给出的解释是此时间段内随着太阳升起,太阳辐射加强,地表温度逐渐升高,水汽散去,人类及工业活动加强,气溶胶和污染物增多及抬升,造成大气边界层变得不稳定,大气边界层高度逐渐抬升,由起初的770 m逐渐升高到1002 m。

同样地,图2(c)和(d)是夜间的反演结果,由图2(c)可知,图像边缘检测法与梯度法和标准偏差法所求得的结果非常接近,均方根误差分别为9.4和11.4 m,与白天相比所选取的时间段内大气边界层高度区域基本稳定不变,稳定在 $(300\pm 15)\text{ m}$ 左右,图2(d)所示的各条回波信号梯度廓线也基本没有什么变化。对此给出的解释是当时夜间大气对流相对较弱,趋于稳定,从而造成边界层没有明显地变化。

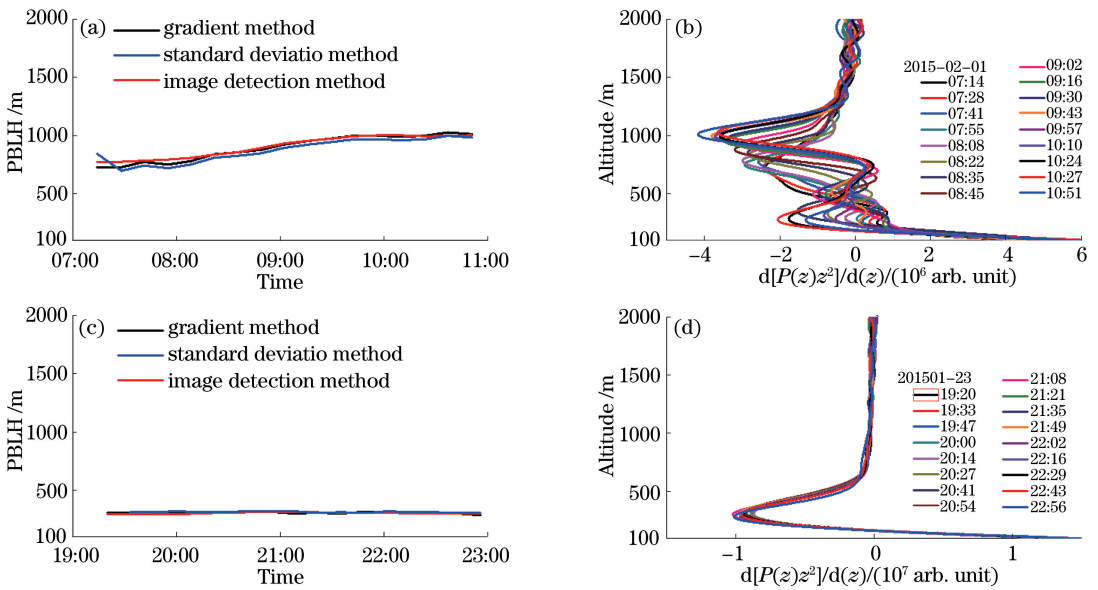


图2 昼夜边界层的PBLH。(a) 2015年2月1日白天的PBLH;(b) 2015年2月1日白天回波信号梯度;
(c) 2015年1月23日夜间的PBLH;(d) 2015年1月23日夜间回波信号梯度

Fig. 2 PBLH of day and night (a) PBLH in the daytime on February 1st, 2015; (b) gradient echo signal in the daytime on February 1st, 2015; (c) PBLH in the nighttime on January 23rd, 2015;

(d) gradient echo signal in the nighttime on January 23rd, 2015

5.2 不同天气背景下的边界层高度

选取了4个不同天气背景(有云的天气、晴天、轻度灰霾天、重度灰霾天)下的数据来反演分析边界层高度变化,并同梯度法进行结果对比验证。图3给出了4种天气下边界层高度反演结果。通过两种方法反演的结果对比分析可知,在有云的情况下,梯度法将云层高度作为边界层高度,而图像边缘检测可以检测出实际的边界层高度。另外三种天气情况下的两种方法结果基本一致。

图3(a)为2015年1月12日18点至21点连续观测的回波信号绘制而成的灰度图,这个图也就是图像边缘检测的原始图(不包含图中黑色和红色两条曲线)。图中横坐标为时间,纵坐标为高度(单位为m),图的右侧为颜色条,不同颜色代表不同的回波信号强度。图中黑色曲线为梯度法求解的结果,而红色为图像边

缘检测的结果,可以看出,梯度法求解的结果 1700~1800 m,而图像边缘检测反演的结果却只有 400~500 m。图 4 给出了该时刻段的回波信号梯度廓线,图 4(a)是 18 时 03 分时刻的单条廓线图,可以看出图中蓝色虚线为回波信号梯度最小值,即所对应的高度为梯度法给出的大气边界层高度,实际上检测到的高度为云层高度,这是由于云的后向散射微分截面远大于气溶胶的后向散射微分截面,所以当激光在大气中传输遇到云时,激光雷达回波信号会迅速增大,出现一个或多个突变的信号。云层的回波信号强度与周围的气溶胶回波信号有着显著的区别:云层回波信号强度大、脉冲宽度宽,在峰值信号两侧,回波信号单调变化;有些云层内部信号有所减弱,出现多个峰值,但这些峰值信号相距较近,仍然属于同一层云^[20]。根据图 4(a)廓线图可以判断此时梯度法检测到的并非实际的大气边界层高度,故把此时梯度极小值作为边界层高度显然是不合理的,所以 18 时 03 分的边界层高度应该取图中红色虚线所对应的高度 475 m 作为边界层高度。其他时刻的回波信号梯度如图 4(b)所示,该时间段内都出现图 4(a)的问题,因此这种情况下,图像边缘检测法的结果更加符合实际情况。

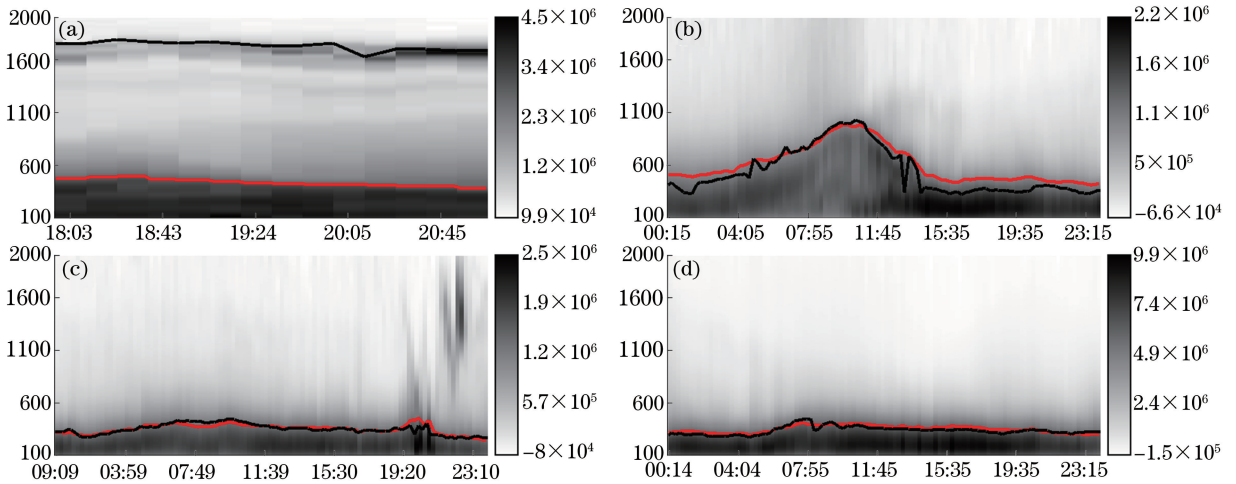


图 3 不同天气下的 PBLH。(a) 云; (b) 晴天; (c) 轻度灰霾天; (d) 重度灰霾天

Fig. 3 PBLH in various kinds of weather. (a) Cloud day; (b) clear day; (c) weak haze day; (d) heavy haze day

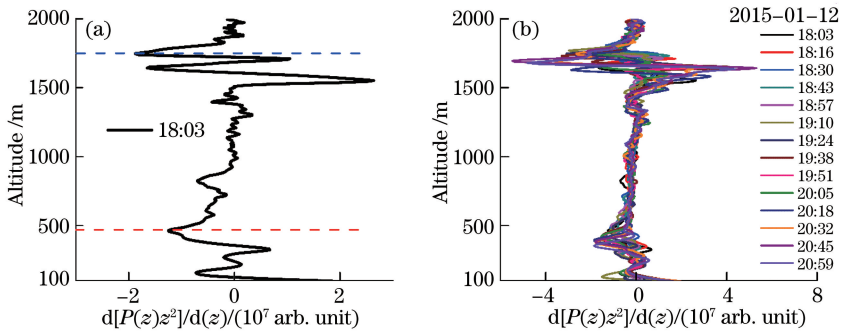


图 4 有云情况下的回波信号梯度。(a) 单条观测廓线; (b) 连续观测廓线

Fig. 4 Echo signal gradient under the clouds weather. (a) Single observation profile; (b) sequence observation profile

图 3(b)为 2015 年 2 月 1 日 24 h 连续观测的结果图,可以看出两种反演结果较为接近,边界层有明显的日变化趋势,早晚都较低,而白天逐渐升高,在中午左右达到最高,随后又开始下降,当天早晚边界层大约为 400 m 时,白天变化范围在 400~1000 m。

图 3(c)和(d)给出了两个灰霾天的观测结果图,按照空气质量指数(AQI)对灰霾天气分级,空气质量指数大于 100 且小于 200 时为轻度灰霾天气,大于 200 为严重灰霾天气^[21]。图 3(c)图观测时间为 2015 年 2 月 2 日 AQI 为 188,属于轻度灰霾天气,梯度法反演边界层高度最高为 442.5 m,最低为 255 m,日平均高度为 347.5 m,而图像边缘检测方法反演边界层高度最高为 446.4 m,最低为 246.4 m,日平均高度为 353.8 m。两种反演方法反演结果均方根误差为 29.4 m。图 3(d)的观测时间为 2015 年 3 月 6 日, AQI 为 251,属于严

重灰霾天气,梯度法反演边界层高度最高为 450 m,最低为 270 m,日平均高度为 332.9 m,而图像边缘检测方法反演边界层高度最高为 410.7 m,最低为 296.4 m,日平均高度为 350.1 m。两种反演方法反演结果均方根误差为 26.8 m。可以看出,相对于晴天,在灰霾天大气边界层呈明显的下降趋势,并且灰霾天下昼夜边界层无明显变化,且持续在 250~450 m 左右。

6 结 论

提出基于图像边缘检测方法来反演大气边界层高度的检测方法,该方法不仅适用于晴朗天气,还适用于灰霾天气和有云等复杂天气环境下大气边界层高度的检测。实验对比结果表明,利用激光雷达图像边缘检测法和梯度法来反演大气边界层高度两者结果具有较好的一致性。传统的梯度检测算法在边界层变化缓慢或者在边界层上方有低云存在的条件下反演得到的结果不够准确,并且是基于单条数据的检测,而图像边缘检测法是基于连续多条、整体的检测。相比较其他方法,边缘检测法具有直观、准确并且可以观测大气边界层高度变化趋势的优点,使大气污染浓度观测和趋势分析更加便利快捷,在大气科学研究和气象预报等方面发挥重要作用。

参 考 文 献

- 1 Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- 2 Tennekes H. A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1973, 30(4): 558-567.
- 3 Eresmann N, Karppinen A, Joffe S M, *et al.*. Mixing height determination by ceilometer[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(6): 1485-1493.
- 4 Wang Dongxiang, Song Xiaoquan, Feng Changzhong, *et al.*. Coherent Doppler lidar observations of marine atmospheric boundary layer height in the Bohai and yellow sea[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s101001.
王东祥, 宋小全, 冯长中, 等. 相干多普勒激光雷达观测渤海海洋大气边界层高度研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s101001.
- 5 Sèze G, Pelon J, Derrien M, *et al.*. Evaluation against CALIPSO lidar observations of the multi-geostationary cloud cover and type data set assembled in the framework of the MEGHA-TROPIQUES mission[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141(688): 774-797.
- 6 Fan Guangqiang, Zhang Tianshu, Fu Yibin, *et al.*. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014003.
范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014003.
- 7 Li Ting, Chen Siying, Zhang Yinchao, *et al.*. Simulation of water vapor multiple wavelengths lidar echo signals and error analysis[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0213001.
李 婷, 陈思颖, 张寅超, 等. 多波长水汽探测激光雷达回波仿真及误差分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0213001.
- 8 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin, *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014002.
伯广宇, 刘 东, 王邦新, 等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014002.
- 9 Wang Lin, Xie Chenbo, Wang Zhenzhu, *et al.*. Application of gradient method to detect height distribution of atmospheric boundary layer with lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(3): 161-167.
王 琳, 谢晨波, 王珍珠, 等. 激光雷达探测大气边界层高度分布的梯度法应用研究[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(3): 161-167.
- 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.
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.
- 11 Hooper W P, Eloranta E W. Lidar measurements of wind in the planetary boundary layer: The method, accuracy and results from joint measurements with radiosonde and kytoon[J]. Journal of Applied Meteorology, 1986, 25(7): 990-1001.
- 12 Gao Chaoyang, Zhang Taifa, Qu Yanan. Advances in research on edge detection of images[J]. Science & Technology

Review, 2010, 28(20): 112-117.

高朝阳, 张太发, 曲亚男. 图像边缘检测研究进展[J]. 科技导报, 2010, 28(20): 112-117.

- 13 Hui Xiaowei, Chang Zhengying, Lin Sen, *et al.*. Image edge extraction combined with Predator-Prey-AACO algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051001.
惠晓威, 常正英, 林 森, 等. 结合 Predator-Prey-AACO 的图像边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051001.
- 14 Feng Junping, Zhao Zhuanping, Xu Tao. Morphological edge detection technology in digital image processing [J]. Aeronautical Computer Technique, 2004, 34(3): 53-56.
冯俊萍, 赵转萍, 徐 涛. 基于数学形态学的图像边缘检测技术[J]. 航空计算技术, 2004, 34(3): 53-56.
- 15 Chen Hu, Wang Shouzun, Zhou Zhaohui. Research based on mathematics morphology image edge examination method [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004, 2: 12-115.
陈 虎, 王守尊, 周朝辉. 基于数学形态学的图像边缘检测方法研究[J]. 工程图学学报, 2004, 2: 112-115.
- 16 Miao Qiguang, Guo Xue, Song Jianfeng, *et al.*. LiDAR point cloud data with morphological filter algorithm based on region prediction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011003.
苗启广, 郭 雪, 宋建锋, 等. 基于区域预测的 LiDAR 点云数据形态学滤波算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011003.
- 17 Li Kangshun, Ruan Dandan, Zhang Wensheng. Research on image binarization algorithm based on evolutionary algorithms[J]. Application Research of Computes, 2012, 29(1): 348-351.
李康顺, 阮丹丹, 张文生. 基于演化算法的图像二值化算法研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 348-351.
- 18 Yan Haixia, Liu Yanjun. Edge detection method based on adaptive order morphology filter[J]. Application Research of Computes, 2011, 28(5): 1978-1980.
闫海霞, 刘岩俊. 基于顺序形态学自适应边缘检测方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1978-1980.
- 19 Cai Jianhua, Hu Weiwen, Wang Xianchun. Edge detection of image using empirical mode decomposition and morphology [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(31): 196-198.
蔡剑华, 胡惟文, 王先春. 经验模态分解和形态学在图像边缘检测中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(31): 196-198.
- 20 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, *et al.*. A cloud elimination algorithm based on differential absorption lidar [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(10): 1135-1139.
范广强, 刘建国, 张天舒, 等. 基于差分吸收激光雷达的云消除算法研究[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1135-1139.
- 21 Zhang Wanchun, Zhang Ying, Lü Yang, *et al.*. Observation of atmospheric boundary layer height by ground-based lidar during haze days[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(4): 981-992.
张婉春, 张 莹, 吕 阳, 等. 利用激光雷达探测灰霾天气大气边界层高度[J]. 遥感学报, 2013, 17(4): 981-992.