

基于多普勒激光雷达的青岛地区大气物质边界层高度反演与分析

王俊博¹, 王筱晔¹, 任超², 孙康闻¹, 尹嘉萍³, 范梦奇³, 戴光耀^{1,4}, 吴松华^{1,4,5*}¹中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院, 山东 青岛 266100;²北京航空气象研究所, 北京 100085;³青岛镭测创芯科技有限公司, 山东 青岛 266100;⁴崂山实验室, 山东 青岛 266237;⁵中国海洋大学海洋高等研究院, 山东 青岛 266100

摘要 为了提升大气物质边界层高度(AMBLH)的识别准确性,基于2020年11月至2021年11月在青岛开展的大气边界层(ABL)观测实验,提出了一种基于相干多普勒激光雷达(CDL)信噪比数据的AMBLH的综合反演方法,并应用此方法反演得到了青岛地区的AMBLH,其与探空仪反演结果的相关度为0.93。分析了青岛一年内的AMBLH发展情况,发现各月份AMBLH均有日变化特征,其中6、7月特征相对较弱,推测这与夏季来自海洋的东南风盛行有关。AMBLH月均值在全年呈起伏波动趋势,在冬末至春初、夏末至秋初的阶段逐步增大。AMBLH月均中位数4月最高、6月最低,AMBLH季度发展程度由高到低的顺序为春季、冬季、秋季、夏季,其中春季和冬季高度相近。AMBLH各季度日变化中抬升趋势出现的时间为夏季早于春季,秋季与春季相近并早于冬季。

关键词 大气光学; 相干多普勒激光雷达; 大气物质边界层高度; 综合反演方法

中图分类号 TN958

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230794

1 引言

大气边界层(ABL)是对流层中最低的一层,在地-气相互作用的影响下,热量、水汽、气溶胶等与能量之间在边界层内相对混合更均匀。该层在地面与大气之间交互变化的过程中直接受到地表强迫的影响,其响应时间少于1 h^[1],通常高度范围为100~3000 m^[2]。ABL中的气象要素日变化明显,其中存在多种尺度的运动,而湍流是其主要运动形式^[3]。

ABL对人们的生产、生活等有重要影响^[4],大气边界层高度(ABLH)在气象等相关领域有着很重要的研究意义^[5-7]。ABL与空气污染密切相关^[8-10],其中湍流运动对于空气污染物具有扩散和混合的作用,ABLH与近地面污染物的质量浓度呈负相关,重污染过程往往伴随较小的ABLH^[11]。对于城市ABL来说,污染天气高颗粒物质量浓度会减少到达地表的太阳辐射,在促进温度转换的同时通过气溶胶-边界层反馈减弱ABL内湍流扩散,由此加强ABL的稳定性、减小ABLH,相应导致污染颗粒物质量浓度同步增加^[12-15]。从物质分布的角度出发,可定义大气物质边界层

(AMBL)及大气物质边界层高度(AMBLH)。AMBL作为ABL的一部分,又可称为“气溶胶聚集层”^[5],主要反映了边界层内气溶胶等物质的分布情况,但不能完全表现湍流运动特征,其高度与污染扩散关系紧密。

对ABL的传统观测手段包括无线电探空仪(探空气球)、气象塔、飞机等方式,可实现对气象要素剖面的直接观测,保证了反演的准确性和可信度。但受到成本与观测方式的限制,这类手段无法实现长时间的连续观测。伴随遥感技术的兴起及其在气象领域的应用,激光雷达、微波辐射计、云高仪、声雷达等地基遥感设备在ABL观测中显示了其优势。近年来,研究人员基于各种地基遥感仪器(包括激光雷达^[16-22]、云高仪^[23-25]等)进行了许多相关研究,可实现ABLH的连续高精度观测。

国内外研究人员利用多普勒激光雷达等多种类型激光雷达观测研究ABL已有较多案例。Boers等^[26]和Nelson等^[27]分别于1984年和1989年利用激光雷达观测ABL,并定义后向散射信号衰减程度最大处为ABLH。贺千山等^[28]于2005年使用微脉冲激光雷达观测北京气溶胶时空变化,并提出了一种基于归一化

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-15; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202201202)

通信作者: *wush@ouc.edu.cn

距离平方校正信号(RSCS)的梯度法,提升了近地ABLH的反演有效性。王治华等^[29-30]于2006—2008年期间使用Mie散射激光雷达进行ABL结构与特性的观测研究。张金业^[31]于2010年使用拉曼/米激光雷达对ABL进行观测,研究了气溶胶的分布情况。Baars等^[16]于2008年使用拉曼激光雷达和多普勒激光雷达进行探测并基于后向散射信号反演ABLH,认为小波协方差方法有着高稳定性和可靠性,并优化了对云层干扰的处理。黄春红等^[32]于2010年使用可移动式多普勒激光雷达观测ABL,通过等高线边缘检测方法优化了ABLH反演结果。Compton等^[33]于2013年使用风廓线激光雷达剖面数据与激光雷达后向散射信号进行ABLH反演,两者的结果一致性较高。丁辉^[34]于2012年利用微脉冲激光雷达对气溶胶消光系数和大气混合层高度进行了研究,微脉冲激光雷达观测得到的气溶胶消光系数和反演所得到的大气混合层高度与探空仪的对应观测数据的相似性高。张婉春等^[35]于2013年使用微脉冲激光雷达观测灰霾天气下的ABLH,发现污染天气下ABLH显著下降。王东祥等^[36]于2015年利用相干多普勒激光雷达(CDL)对黄渤海区域的ABLH进行观测研究,分析了海洋环境对ABL发展的影响。李丽美^[37]于2019年使用沙氏激光雷达观测ABL,验证了该技术在大气环境研究中的可行性及优势。于思琪等^[38-39]于2021年提出一种激光雷达反演ABLH的优化算法,并对多个城市的ABLH进行了观测与统计分析。靳翔等^[40]于2021年使用多普勒激光雷达对ABL内湍流参数进行观测研究,并与CALIPSO卫星数据进行了对比。朱黎明等^[41]于2022年将多普勒激光雷达观测风场数据与神经网络模型相结合,对海洋ABL湍流进行了研究,实现了较好的湍流廓线估算功能。

目前研究对于ABL的观测主要依赖于原位测量和遥感两种形式,但存在原位观测覆盖时间较短、遥感观测反演方法较为单一的问题。为实现ABL的长时间观测、进一步提高AMBLH反演的准确性,本文基于2020年11月7日至2021年11月30日在山东青岛进行的ABL观测实验,在多种主流反演方法的基础上,提出了一种优化的AMBLH综合反演算法。该方法通过导入当地日出日落信息,将一天中的ABL划分为白天对流边界层(CBL,又称为混合层)阶段和夜间气溶胶污染层阶段,对不同阶段针对性选择反演方法,并剔除了云层、降雨、降雪的影响,提高了AMBLH反演的准确性。

2 仪器介绍与实验设置

2.1 仪器介绍

本次实验采用中国海洋大学与青岛镭测创芯科技有限公司联合研制的Wind3D 10K三维扫描型CDL。该雷达发射波长为1550 nm的激光光束,光束与大气

中气溶胶粒子相互作用,所产生的后向散射信号经雷达采集后在平衡探测器中与本振光进行拍频,从而获得多普勒频移,经过模/数转换和傅里叶变换后,可获得距离分辨的频谱信号并实现径向风速的反演。系统的主要技术指标如表1所示。

表1 Wind3D 10K CDL技术指标
Table 1 Technical specifications of Wind3D 10K CDL

Technical specification	Value or content
Wavelength /nm	1550
Pulse repetition rate /kHz	10
Radial speed measurement range /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	-37.5-37.5
Speed measurement uncertainty /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	≤ 0.1
Direction measurement uncertainty /($^{\circ}$)	< 3
Measurement range /m	60-10000
Range resolution /m	15/30/60/150
Power consumption /W	< 300
Data refresh rate /Hz	1-10
Scanning servo accuracy /($^{\circ}$)	0.1
Scanning mode	DBS/PPI/VAD/RHI/ customization

实际观测中可对激光雷达设置不同的观测模式,如多普勒波束摆动(DBS)、位置平面显示等模式,激光光束以一定方向和角度进行扫描观测,最终实现对目标空间各个距离位置处的数据获取。综合观测期间获取的径向风速、风向和距离等扫描数据进行三维计算,可求出风场和气溶胶分布情况。

基于激光雷达方程,CDL测量的散射信号功率可表示为

$$P_s = \frac{\eta A_{\text{area}} \beta T^2}{2R^2} c E_r, \quad (1)$$

式中: P_s 为信号回波功率; η 为系统效率; A_{area} 为有效接收面积; β 为气溶胶后向散射系数; T 为大气光学透过率; c 为光速; E_r 为激光脉冲能量; R 为探测距离。通过式(1)可计算出距离激光雷达 R 处的后向散射信号功率。

不同激光雷达往往有着不同的激光源,其发射功率也存在差异,进而影响雷达的信噪比(SNR)。CDL接收到的信号包括有效的实际回波信号以及背景噪声两个部分,两者的比值即为SNR,激光发射功率的大小直接影响回波信号能量的大小,在数据处理中表现为影响SNR的大小。在光学信号检测领域,基于光电探测器的器件特征,噪声主要是由本振光(信号光和背景光)散粒噪声、光电探测器的暗电流噪声、电路热噪

声和本振光功率噪声组成。当噪声过大时,系统的 SNR 过低,其探测能力也会显著降低。为保证激光雷达观测的有效性,往往通过提高发射功率和抑制噪声两种方式来提高系统 SNR,其中前者通常为主要手段。激光雷达 SNR 的表达式如下:

$$R_{\text{SN}} = \frac{\eta\beta T^2 c E_r \pi D^2}{2h\nu BR^2} \frac{\pi D^2}{4} \left[1 + \left(\frac{\pi A_c^2 D^2}{4\lambda R} \right)^2 \times \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 + \frac{A_c^2 D^2}{2\rho_0^2} \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中: ν 为激光频率; B 为探测器带宽; D 为发射激光高

斯光束直径; A_c 为效率因子; F 为系统光学焦距; ρ_0 为湍流因子。

2.2 实验设置

ABL 长期观测实验于 2020 年 11 月 7 日至 2021 年 11 月 30 日在山东省青岛市青岛生态环境监测中心 (36.07°N, 120.34°E) 进行,雷达安装和现场观测情况如图 1(a) 所示。在实验过程中,雷达处于 DBS 观测模式,如图 1(b) 所示,该模式通过对垂直方向和东、南、西、北 4 个方向上发射激光,观测得到所需的大气参数。观测期间雷达不间断运行,实现长时间大气参数信息采集。

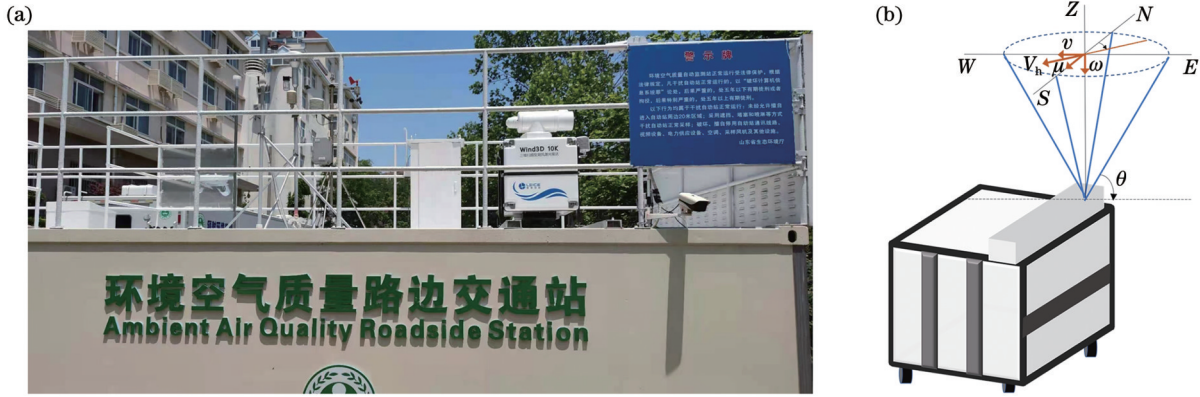


图 1 观测站点与观测模式示意图。(a) CDL 观测站点示意图; (b) DBS 观测模式示意图

Fig. 1 Diagrams of observation station and observation mode. (a) Diagram of CDL observation station; (b) diagram of DBS observation mode

为验证实验观测及反演结果的有效性,于 2022 年 2 月开展了为期一个月的激光雷达和无线电探空仪同步观测。在此期间,激光雷达保持全天时不间断的连续观测状态,无线电探空仪布放时间为每天 7:15 和 19:15,每次布放可获取一条数据廓线。无线电探空仪的采集数据主要包括各个高度下所对应的温度、相对湿度(RH)和压力等信息,经过反演可得到 ABLH。

3 ABLH 及 AMBLH 反演方法

3.1 ABLH 主流反演方法

CDL 基于观测的 SNR 数据反演 ABLH,常用的反演方法包括梯度法、小波协方差变换(WCT)法、SNR 阈值法等。

Flamant 等^[42]在 1997 年提出了一阶梯度法,该方法基于 ABL 与对流层的气溶胶质量浓度差异,对 SNR 取距离平方校正后求一阶梯度,认为梯度最小处即为 ABLH:

$$h_{\text{GM}} = h \left[\min \left(\frac{\partial S_{\text{RSC}}}{\partial R} \right) \right], \quad (3)$$

式中: h_{GM} 为一阶梯度法反演得到的 ABLH; S_{RSC} 为 RSCS,表达式为

$$S_{\text{RSC}} = P(z)z^2, \quad (4)$$

RSCS 即为各高度 z 处的后向散射信号 $P(z)$ 与该高度 z 的平方的乘积。

相应地,二阶梯度法(即拐点法)通过取 RSCS 的二阶梯度最小值,反演得到 ABLH:

$$h_{\text{IPM}} = h \left[\min \left(\frac{\partial^2 S_{\text{RSC}}}{\partial R^2} \right) \right]. \quad (5)$$

对数梯度法能够较好地减少近地 ABLH 反演的误判断,该方法通过取 RSCS 的对数,对其求一阶梯度并取其最小值处对应的高度作为 ABLH:

$$h_{\text{LGM}} = h \left[\min \left(\frac{\partial \ln S_{\text{RSC}}}{\partial R} \right) \right]. \quad (6)$$

立方根梯度法用于处理气溶胶垂直混合不均匀情况下的 ABLH 反演,对 RSCS 求立方根后取一阶梯度最小值处对应的高度作为 ABLH:

$$h_{\text{CRGM}} = h \left[\min \left(\frac{\partial S_{\text{RSC}}^{1/3}}{\partial R} \right) \right]. \quad (7)$$

WCT 法对激光雷达的 RSCS 进行 WCT,进而对信号进行分析:

$$W_i(a, b) = \frac{1}{a} \int_{z_b}^{z_i} f(z) h \left(\frac{z-b}{a} \right) dz, \quad (8)$$

式中: $f(z)$ 为激光雷达的距离平方校正后向散射信号; z_b 和 z_i 分别为激光雷达回波信号剖面的最低和最

高限制; a 为膨胀系数; b 为转换系数; h 为 Haar 函数 (即复合阶跃小波函数), 可表示为

$$h\left(\frac{z-b}{a}\right) = \begin{cases} 1, & b - \frac{a}{2} \leq z \leq b \\ -1, & b < z \leq b + \frac{a}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

Haar 函数示意图如图 2 所示, 其中膨胀系数 a 描述的是该函数的范围, 转换系数 b 决定了步长的起始位置, Δz 为距离库高度差。通过选定合适的系数 a 并根据距离库高度计算出系数 b , 得到符合分析需求的协方差小波变化结果。通过综合多个典型案例的 ABLH 进行分析, 本文选定 $a = 15\Delta z$ 。

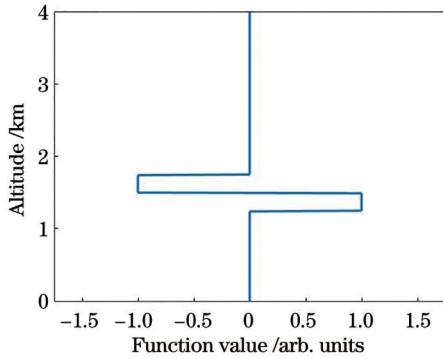


图 2 Haar 函数示意图
Fig. 2 Diagram of Haar function

变换后函数值越大, 原始信号函数值与所选择的小波函数就越相似, 原始信号的变化程度越大^[43]。通过设置合适的阈值, 将超过阈值的高度位置作为该方法反演得到的 ABLH h_{WCT} 。

SNR 阈值法能快速识别 ABL 中物质聚集层高度, 其原理是识别出 SNR 剖面数据中首次低于阈值的高度^[4], 其中物质聚集层在白天对应大气混合层高度、在夜间对应气溶胶浓度较高的气层高度^[5]。物质聚集层气溶胶较为集中, 与其上方的气层区分明显, 其顶部在距离平方校正后向散射信号中表现为强度显著降低。由于不同季节以及不同区域的气候与地形存在差异, 气溶胶分布不同, 故该方法的要点在于设置合适的 SNR 阈值。本文基于典型案例以及主流方法反演结果, 对青岛站点不同季节的数据进行针对性阈值设置, 以获取可靠的反演结果。

3.2 AMBLH 综合反演方法

本文基于第 3.1 节所述的 ABLH 主流反演方法, 结合观测数据特性与 AMBL 特征, 提出了一种 AMBLH 综合反演方法, 该方法主要包括数据预处理、复杂天气识别、针对性识别几个部分。数据预处理部分将雷达观测的原始 SNR 处理为适用于反演的 SNR 矩阵; 复杂天气识别部分针对云层以及降雨、降雪等天气进行识别与时间标记。随后通过导入日出日落时间

信息, 划分出不同边界层类型, 进行针对性识别, 其中: 白天为 CBL, 即大气混合层, 它是白天 ABL 的重要部分; 夜间通过气溶胶污染扩散识别出的污染层通常为大气稳定边界层 (SBL) 的一部分, 偶尔或达到残存层 (RL) 的高度, 因此夜间的情况比较复杂, 可称为“气溶胶污染层”, 是夜间 ABL 的一部分。最后对识别结果进行质量控制与输出。

该方法的流程图如图 3 所示, 其中数据预处理流程和复杂天气识别流程分别如图 4、5 所示。

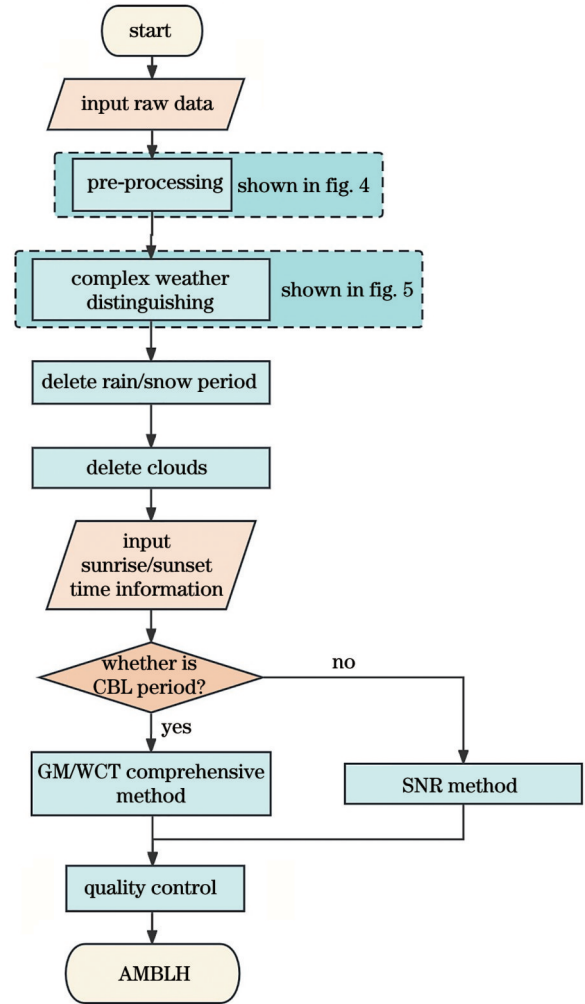


图 3 AMBLH 综合反演方法流程图
Fig. 3 Flow chart of AMBLH comprehensive retrieval method

利用激光雷达数据进行 AMBLH 反演, 需要对原始秒级数据进行预处理, 其中同一高度和时间下的数据包括 SNR、水平风速、垂直速度等数据类型。导入 SNR 数据后, 首先去除所有 Nan 数据, Nan 为“Not A Number”的缩写, 在激光雷达数据中表示无效的非数字数据; 随后将风速、垂直速度的数据质量作为参考: 若某处风速大于 20 m/s, 则剔除对应的 SNR 数据; 若某处垂直速度绝对值大于 5, 则剔除对应的 SNR 数据。随后对处理后的 SNR 数据进行归一化, 将 SNR 廓线 R_{SN} 取对数得到 $R_{SN_{log}} = 10 \ln R_{SN} - 20$, 再基于对数

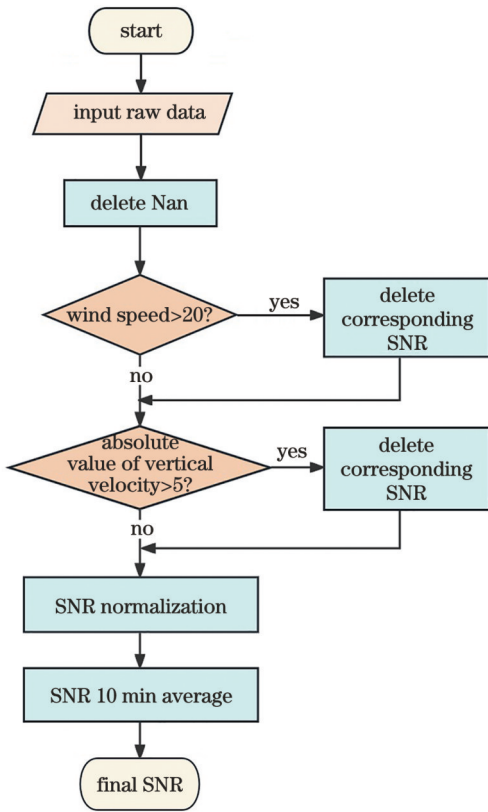


图 4 数据预处理流程图

Fig. 4 Flow chart of data pre-processing

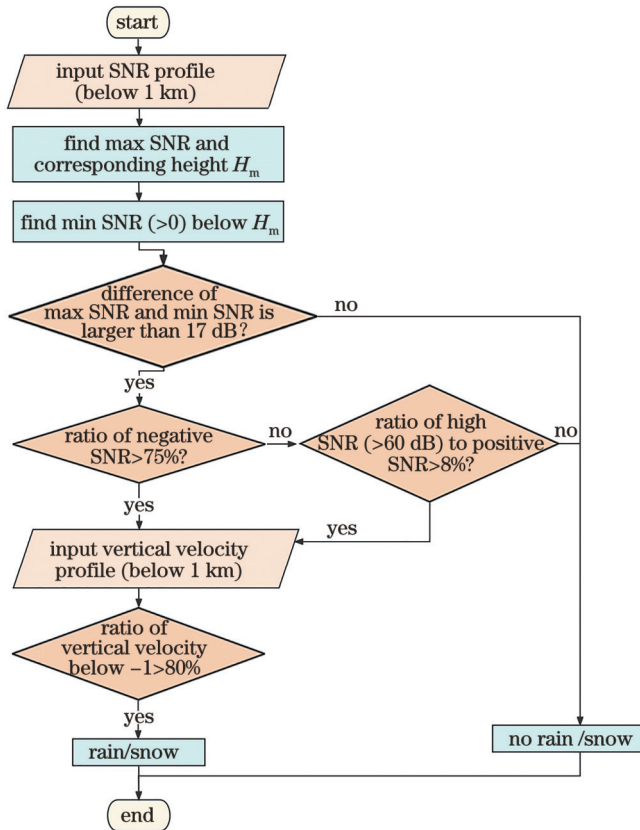


图 5 复杂天气综合特征提取方法流程图

Fig. 5 Flow chart of complex weather synthetic character extraction method

SNR 廓线中的最大值, 得到归一化的 SNR 廓线:

$$R_{SN_{normalized}} = \frac{R_{SN_{log}} - \min(R_{SN_{log}})}{\max(R_{SN_{log}}) - \min(R_{SN_{log}})}, \quad (10)$$

最后将归一化的 SNR 取为 10 min 平均数据, 完成预处理。该过程的整体流程如图 4 所示。

经过预处理的 SNR 矩阵将用于剔除复杂天气, 其中复杂天气识别流程如图 5 所示。首先取 1 km 以下的 SNR 数据, 顺时序进行 SNR 廓线分析。找到当前时刻下最大 SNR 对应的高度 H_m , 随后在高度 H_m 下找到最小的正值 SNR, 若最大 SNR 与最小 SNR 之差大于 17 dB, 则判别下一项, 否则认为当前时刻无降雨降雪。在前置判别条件为真的情况下, 若该 SNR 廓线中负值 SNR 占比超过 75%, 则判别下一项, 否则进行补充判别: 若大于 60 dB 的 SNR 在正值 SNR 中的占比超过 8%, 则判别下一项, 否则认为当前时刻无降雨降雪。在前置判别条件为真的情况下, 输入当前时刻 1 km 以下的垂直速度廓线, 若小于 -1 m/s 的垂直速度在其廓线中的占比超过 80%, 则认为该时刻存在降雨或降雪。为提高 AMBLH 识别的准确性, 识别为降雨/降雪的时间段将被标记为不可信片段并被剔除, 本文不对这些片段进行 AMBLH 反演。若不可信片段在当日的占比超过 70%, 则认为当日有效 AMBLH 片段太少, 不参与后续统计分析。图 6 展示了降雨片

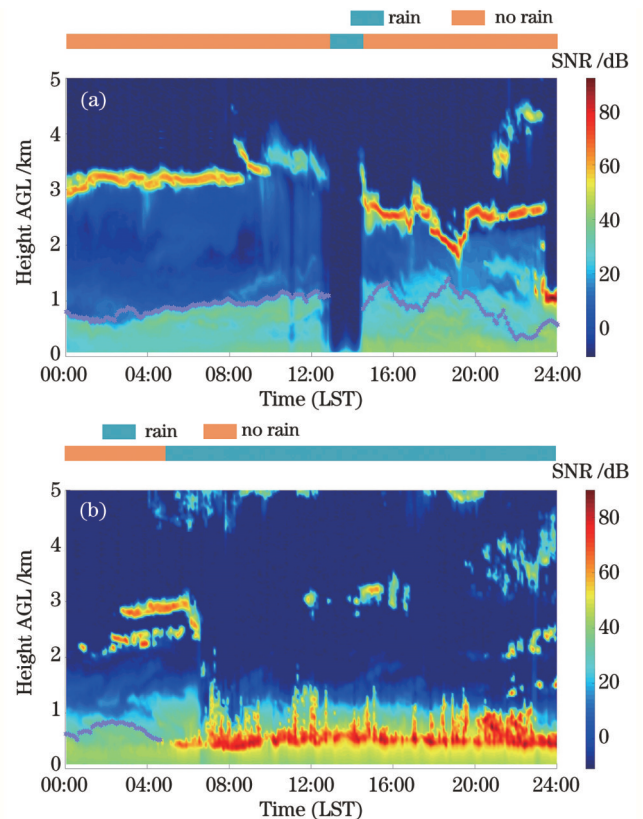


图 6 降雨片段剔除个例。(a) 2021 年 4 月 21 日; (b) 2021 年 7 月 28 日

Fig. 6 Cases of deleting rain period. (a) 21 April, 2021; (b) 28 July, 2021

段识别与剔除的部分结果,对识别为降雨的片段不进行 AMBLH 反演。

随后进行云层剔除,通过对 SNR 廓线应用 WCT 算法并设置合适的阈值,可实现对云层的识别,本文选用的云层识别阈值为 -0.1 ,即将 WCT 信号小于 -0.1 的位置识别为云层。当某时刻识别到云层后,则进行高度标记,将该时刻的 AMBLH 识别范围划定为云层

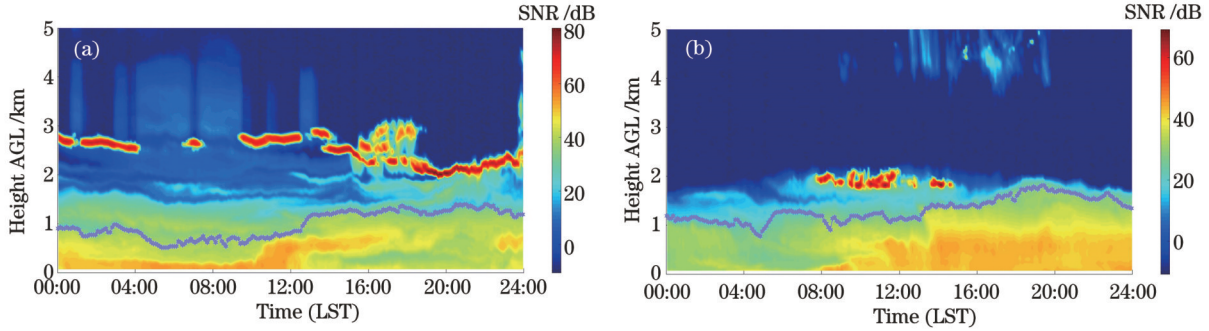


图 7 云层剔除个例。(a)2021年3月19日;(b)2021年10月24日

Fig. 7 Cases of deleting clouds. (a) 19 March, 2021; (b) 24 October, 2021

下一步进行 CBL/气溶胶污染层针对性识别,基于不同阶段边界层特性,需要采用更适用的方法进行 AMBLH 反演。太阳辐射作为一种重要的热力因素,其每天的持续时间对于 AMBLH 反演的准确性有着较大的影响。日出后太阳辐射对地面的加热驱动 SBL 向 CBL 演变,日落后逐渐降温的下垫面有助于 SBL 的形成。参考中国典型下垫面的地表温度日变化统计规律,通常需要 $1\sim 2$ h 的太阳辐射加热,地表温度才会出现较明显的变化^[44],而 ABL 受热是慢于地表的,因此需要更多时间的受热以进行演化,故取 3 h 作为 ABL 发展时间,即取日出后 3 h 作为夜间气溶胶污染层和白天 CBL 的分段时间点。夜间失去太阳辐射加热之后,下垫面迅速降温,随后较长时间范围内以较小的梯度慢慢降温,综合考虑选定日落后 2 h 左右作为白天 CBL 与夜间气溶胶污染层的分段时间点。

由于不同识别方法对不同类型的 AMBLH 识别有着各自的侧重点,针对性识别模块将梯度法/WCT 综合方法应用于 CBL 阶段、将 SNR 阈值法应用于气溶胶污染层阶段。这是由于 CBL 结构多变,通常在随时间而进行高度发展的同时,还存在云层干扰,故需要 WCT 法与梯度法相结合,完成梯度变化的跟进以及云层的识别与剔除。而气溶胶污染层定义为夜间稳定层与 RL 的一部分,该层由近地大气内聚集的气溶胶构成,其信号特征较为单一,在合理设置阈值的情况下使用阈值法能对其进行准确识别^[4]。

图 8 展示了进行日/夜分段反演与否的部分对比结果。若不进行分段针对性反演,则夜间气溶胶污染

高度以下。具体反演流程是对数据进行顺时序读取和反演。先使用 WCT 算法提取云底高度,并与前 3 个时刻反演得到的 AMBLH 均值进行对比,若云底高于该均值,则认为当前时刻云层高于 AMBL,可进行反演。经过此过程识别得到的部分结果如图 7 所示,位于较高处的云层被识别出,AMBLH 识别为云层之下的位置。

层阶段识别结果偏高,很可能直接识别到 RL 顶的高度,识别准确性较差。进行分段反演后,夜间气溶胶污染层高度可信度较高,能较好地反映夜间稳定层与 RL 中气溶胶聚集位置的高度。

最后,将针对性分段识别结果拼接为整天的 AMBLH 结果,经过质量控制后得到最终的 AMBLH 反演结果。

3.3 无线电探空仪 ABLH 反演方法

基于无线电探空仪数据,通过对温度、RH、水汽等参数的高度分布进行分析,可反演得到 ABLH,通过不同方法与数据进行反演依赖于对 ABL 的定义。目前主流的反演方法是基于位温(PT ,用变量 T_p 表示)和 RH 两种数据进行 ABLH 反演^[45]。

PT 法定义 ABLH 为对流由不稳定向稳定过渡的区域,其原理是识别 PT 在垂直梯度上的最大突变,该突变反映了从下方对流较不稳定区域向上方较稳定区域的转变。该方法基于无线电探空仪获取的对应高度 H 下温度 T 、压强 P 进行计算,求出 T_p :

$$T_p = (T + 273) \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286} \quad (11)$$

对 PT 求一阶梯度,取该梯度达到最小值的高度为 ABLH h_{PT} :

$$h_{PT} = h \left[\min \left(\frac{\partial T_p}{\partial H} \right) \right] \quad (12)$$

RH 法定义 ABL 为一个相较于上部大气层更为湿润、密度更高、反照率更高的区域,根据此信号特征,其原理是识别 RH 在垂直梯度上变化最小的位置。该方法基于探空仪采集到的 RH $H_r(\%)$ 和对应高度 H ,求其一阶梯度,取该梯度达到最大值的高度为

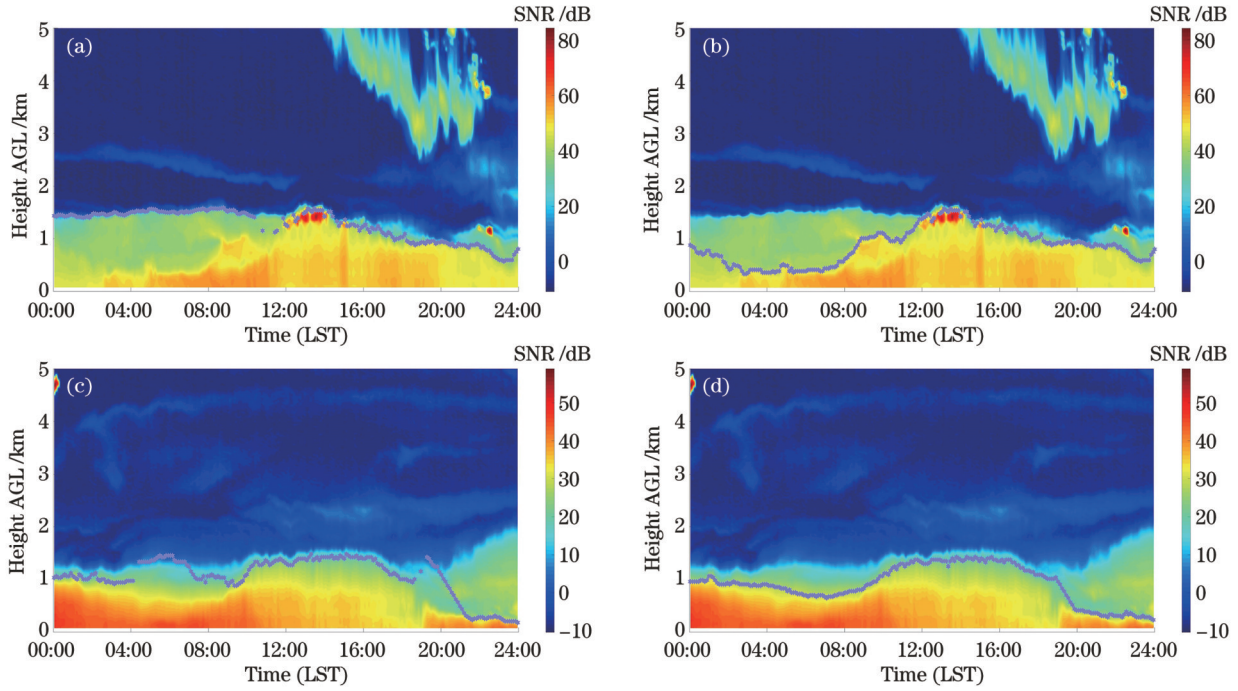


图 8 分段反演对比个例。(a)2020年11月28日,未分段反演;(b)2020年11月28日,分段反演;(c)2021年4月4日,未分段反演;(d)2021年4月4日,分段反演

Fig. 8 Comparison of cases of classifying retrieval for each segment. (a) 28 November, 2020, before classifying retrieval; (b) 28 November, 2020, after classifying retrieval; (c) 4 April, 2021, before classifying retrieval; (d) 4 April, 2021, after classifying retrieval

ABLH h_{RH} :

$$h_{RH} = h \left[\max \left(\frac{\partial H_R}{\partial H} \right) \right]. \quad (13)$$

4 结果与讨论

4.1 激光雷达与无线电探空仪结果比较

通过 PT 法与 RH 法分别反演观测时间段内的

ABLH, 每种方法在观测时间段内共有 56 组原始数据 (每天早晚各一组, 共 28 天), 由于不同变量数据质量的差别, 在经过质量控制、剔除无效数据后, PT 法和 RH 法分别反演得到 41 个和 31 个 ABLH。将这些 ABLH 结果与同时刻基于激光雷达数据、由本文提出的 AMBLH 综合反演方法的结果进行对比, 统计结果如图 9 所示。

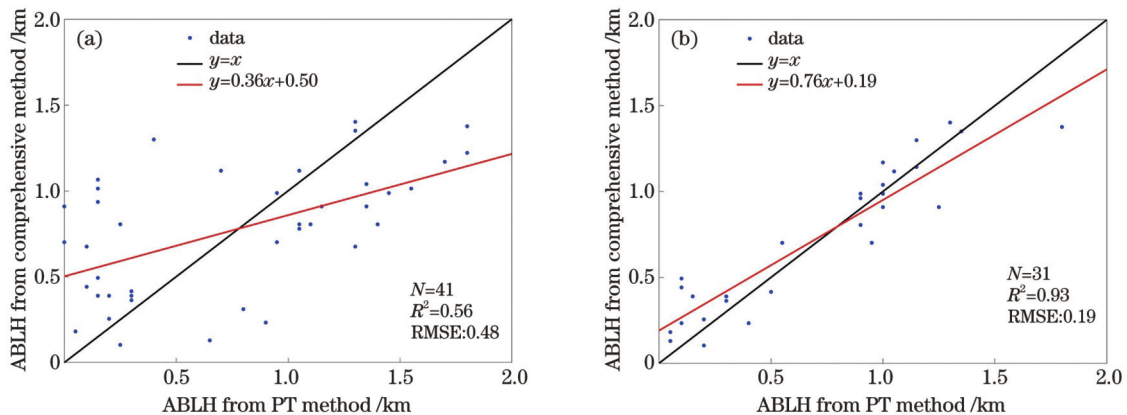


图 9 AMBLH 综合反演方法结果与探空仪不同反演方法结果对比。(a)PT 法;(b)RH 法

Fig. 9 Results comparison of AMBLH comprehensive retrieval method and radiosonde with different methods. (a) PT method; (b) RH method

PT 法是以温度变化为导向定义的 ABL, 对于大气中气溶胶颗粒的考虑较少, 而激光雷达观测的 SNR 数据能较好地反映气溶胶信息, 故基于激光雷达数据、

通过 AMBLH 综合反演方法反演得到的 AMBLH 与 PT 法反演结果的吻合程度较差, 如图 9(a) 所示, 决定系数 R^2 仅为 0.56, 均方根误差 (RMSE) 达到了 0.48。

RH法定义的ABL为气溶胶、水汽更为集中的区域,该方法反演得到的ABLH与基于激光雷达数据、通过AMBLH综合反演方法得到的AMBLH吻合度较好,如图9(b)所示,决定系数 R^2 为0.93, RMSE为0.19。

通过与无线电探空仪的比对,验证了本文提出的AMBLH综合反演方法的准确性。后续章节将基于此方法对青岛地区的长期连续观测数据进行处理,分析青岛地区AMBLH变化趋势。

4.2 青岛AMBLH个例分析

青岛位于北温带季风区域,属于半湿润温带季风气候,年平均气温不低于 0°C ,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,夏季盛行东南风,冬季盛行西北风。由于地处沿海,海洋环境直接影响市区,因此青岛具有空气湿度较大、气温年变化与日变化很小等海洋性气候特征。基于此气候环境,海洋对于ABL的发展与变化有较大影响。

青岛观测数据覆盖时间段为2020年11月7日至2021年11月30日,其中部分无效观测日期在数据筛查时已被剔除,各月份有效数据天数如表2所示。

青岛一年间AMBLH及其发展特性存在较为明显的季节差异,对各月份按照季节惯例进行划分,2020年12月至2021年2月为冬季,2021年3月至5月为春季、6月至8月为夏季、9月至11月为秋季。本节挑选各季度中AMBLH发展特征较明显的单日AMBL个例,以及多云天气的典型个例进行简要分析。

在数据覆盖时间段内的4个季节分别选择了一天

表2 青岛观测站各月份有效数据日期数量

Table 2 Numbers of days with valid data in each month at Qingdao observation station

Month	Number of days with valid data
November, 2020	7
December, 2020	28
January, 2021	23
February, 2021	23
March, 2021	28
April, 2021	18
May, 2021	19
June, 2021	9
July, 2021	5
August, 2021	5
September, 2021	9
October, 2021	17
November, 2021	20

的AMBL反演个例,如图10所示。在各个季节中,AMBL发展均表现出典型特征:1)日出后高度逐渐抬升,在午后到达峰值;2)夜间高度逐渐降低,白天高度均值大于夜间。AMBL作为ABL的一部分,其发展趋势与ABL的发展趋势有较高的相关性,上述特征反映了ABL由稳定层向混合层发展的过程,体现了太阳辐射加温、边界层风场驱动对于ABL发展的贡献。夜间ABL为稳定层,日出后受到太阳辐射加热效果的热力

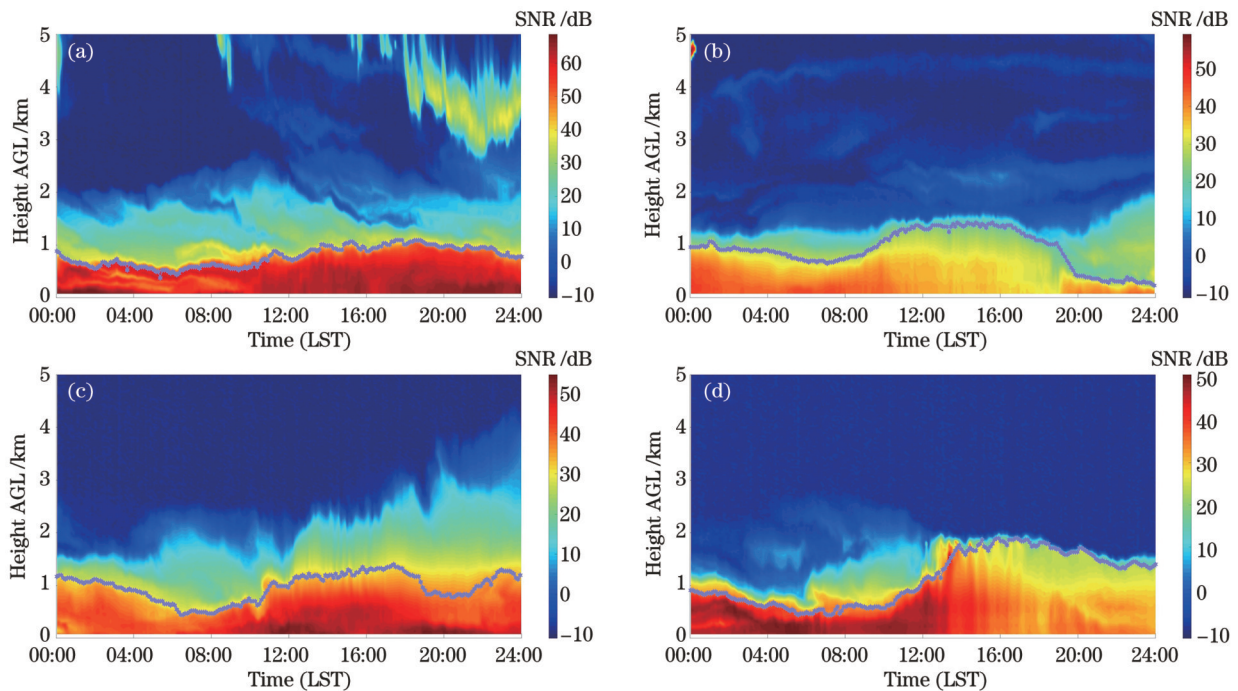


图10 AMBLH单日反演结果。(a)2020年12月12日;(b)2021年4月4日;(c)2021年6月4日;(d)2021年10月22日
Fig. 10 Single-day AMBLH retrieval results. (a) 12 December, 2020; (b) 4 April, 2021; (c) 4 June, 2021; (d) 22 October, 2021

驱动,地面开始升温并辐射至大气中,带动 ABL 逐渐升温,这提高了空气的不稳定性,促进了对流的产生,从而使得 ABLH 逐步提升。正午过后,经过了太阳垂直照射地面这个辐射量最大的时间段,ABL 受到的加热达到最大,此时空气热运动最为显著,ABLH 达到最大值。随后,太阳辐射逐渐减少,贡献的热力因素相应减少,ABLH 逐步降低并趋于稳定。

反演 AMBLH 过程中会出现云层或气溶胶层干扰的情况,需要剔除其影响以合理反演 AMBLH。出现云层或气溶胶层的情况分为两种:一种是云层在较低的位置出现,即位于 AMBL 内部,另一种是云层出现在较高的位置,即 AMBLH 与云高相近或位于云层之下。在本文的反演流程中,认为后者具有反演价值,因此跳过前者的情况不进行反演。

4.3 青岛长时间观测统计

对观测数据进行 AMBLH 反演,并分别以“月”和“季”为单位进行了统计,以分析青岛在该时间段下的 AMBL 演化特征。本文采用箱形图的形式对统计数据进行分析,这种形式能排除异常值的干扰,从而较为准确地描述 AMBLH 的离散分布情况。利用箱形图对该组数据的 6 个参量进行描述:异常值、上限、上四

分位数、中位数、下四分位数、下限,如图 11 所示。箱形图中的四分位数在 25% 的数据变化时依然具有较高的稳定性,对于数据分布的描述较为客观。其中上四分位数用于表示在数据组中大小位于前 25% 位置的数,下四分位数用于表示大小位于前 75% 位置处的数。

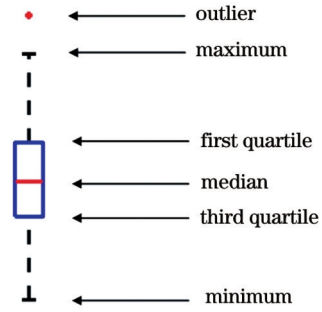
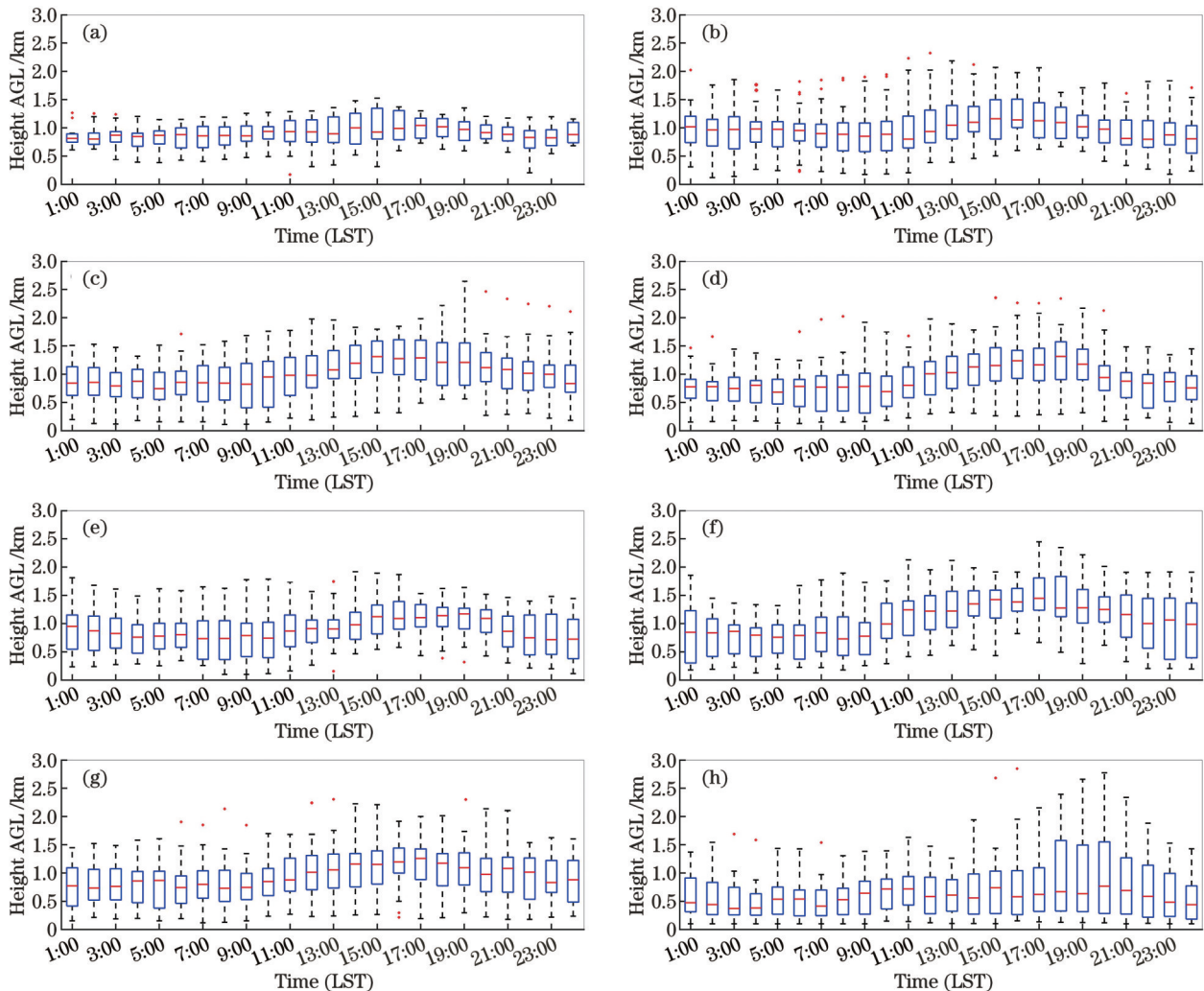


图 11 箱形图示意图

Fig. 11 Diagram of boxplot

图 12 为数据覆盖阶段共计 13 个月期间各月份的日变化箱形图,图中对每小时的 AMBLH 取了平均值,于整点时刻进行展示。部分时刻出现了异常值,用



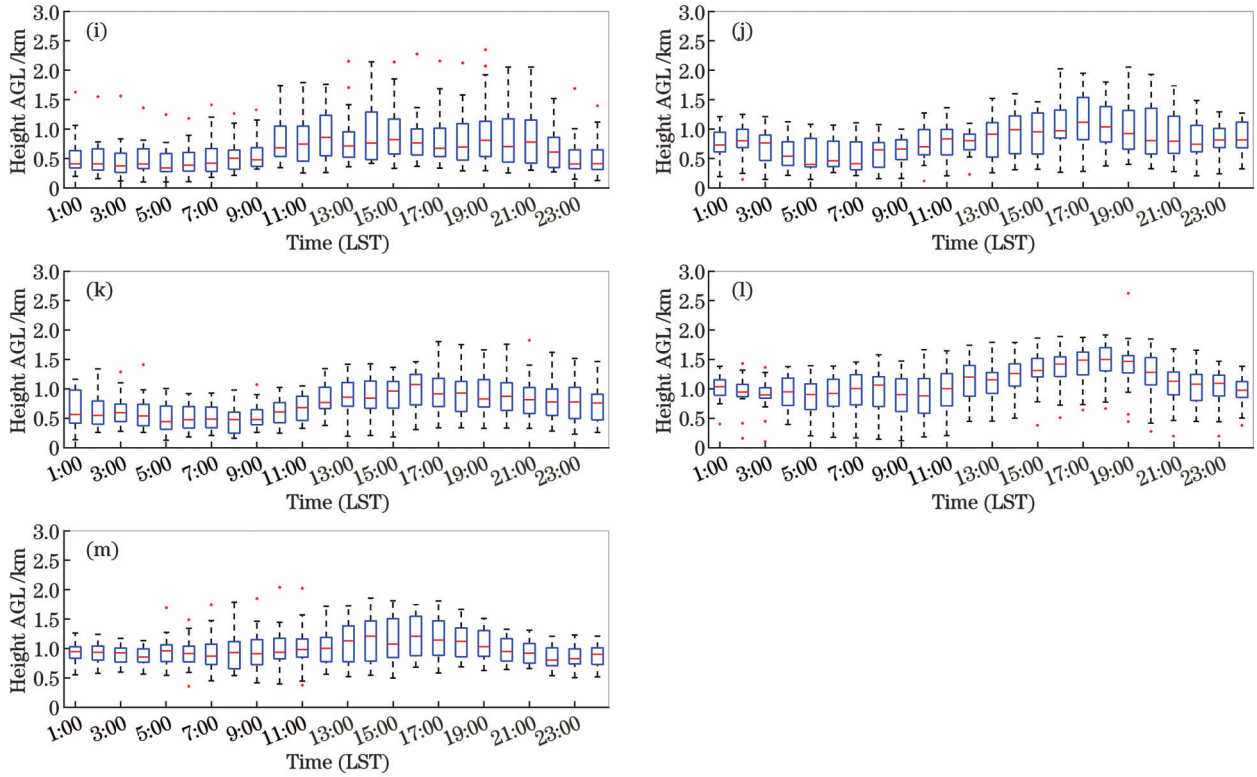


图 12 青岛 AMBLH 月际日变化箱形图。(a)2020 年 11 月;(b)2020 年 12 月;(c)2021 年 1 月;(d)2021 年 2 月;(e)2021 年 3 月;(f)2021 年 4 月;(g)2021 年 5 月;(h)2021 年 6 月;(i)2021 年 7 月;(j)2021 年 8 月;(k)2021 年 9 月;(l)2021 年 10 月;(m)2021 年 11 月

Fig. 12 Boxplots of diurnal variation of AMBLH in Qingdao for each month. (a) November, 2020; (b) December, 2020; (c) January, 2021; (d) February, 2021; (e) March, 2021; (f) April, 2021; (g) May, 2021; (h) June, 2021; (i) July, 2021; (j) August, 2021; (k) September, 2021; (l) October, 2021; (m) November, 2021

点进行表示,但箱形图的特性使其在描述数据规律时不会受到异常值的影响,故使用这种分析方式可较好地展现 AMBL 发展特征。各个月份的 AMBLH 日均值大都表现出明显的日变化趋势,但在 2021 年 6 月和 7 月,日变化趋势较不明显,且出现较多异常值。这可能与夏季降雨频繁导致较多无效数据被剔除有关,2021 年 6 月和 7 月的有效数据天数分别为 6 天和 5 天,而在这些有效天数内同样存在单日内的降雨片段。另外,考虑到青岛温带季风气候的特性,其夏季盛行风为

由海洋方向吹来的东南风,AMBL 发展受到海洋气候特征的影响较大。青岛东、南濒临黄海,而夏季的黄海在青岛附近的区域存在湾流区海表面温度锋冷中心,这些冷中心导致海表面温度较低,进而导致 AMBL 低层的稳定度增大,引起垂直方向上大气混合减弱、海表面风速减小^[46],热力因素和动力因素两方面都限制了 AMBL 的发展。

对每个月份的单日 AMBLH 取日均值,并用箱形图的形式对其进行分析,如图 13 所示。全年数据中

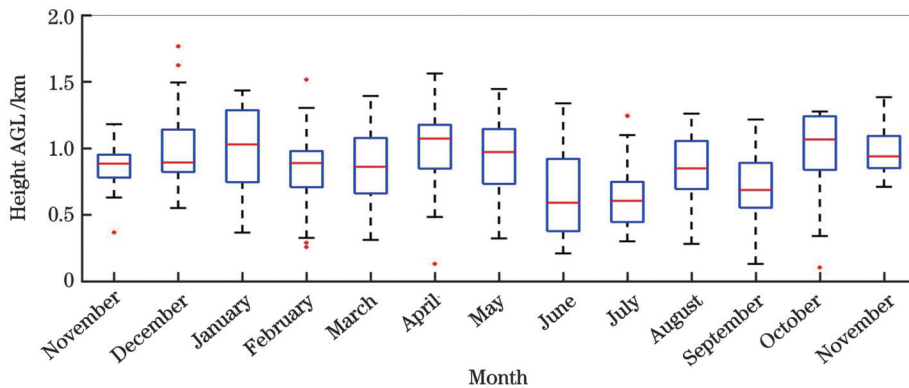


图 13 青岛 AMBLH 月际日平均变化箱形图

Fig. 13 Box-plots of daily average value variation of AMBLH in Qingdao for each month

除去 9 个异常值,其余的 AMBLH 均可用于分析其变化趋势。AMBLH 中位数在全年呈起伏波动趋势,在冬末向春初、夏末向秋初过渡阶段都逐步提高。2021 年 6 月和 7 月 AMBLH 的中位数较低,分别为 588 m 和 602 m;2021 年 1 月和 6 月的 AMBLH 波动较大,上下四分位数之间范围分别为 539.7 m 和 342.2 m;2020 年 11 月 AMBLH 波动较小,波动范围仅为 172.1 m;AMBLH 中位数最大值(2021 年 4 月,1069 m)和最小值(2021 年 6 月,588 m)之间的高度差为 481 m。

ABL 的发展与太阳辐射、湍流运动、气候、土壤、人类强迫等因素相关,为热力与动力机制共同作用的结果^[5,47-48],作为 ABL 的一部分,AMBL 的发展也受到这些因素的影响。其中太阳辐射量的热力驱动对

白天 ABL 发展起到主导作用^[49],日出后地面和近地大气受到加热后温度上升,且 ABLH 与地面温度往往有较好的相关性^[50]。由于 ABLH 的最大值往往在白天出现,热力驱动的差异使得各季节的最大高度有区别。ABL 被越大的辐射量加热,则近地面温度越高,越有利于湍流运动,从而抬高 ABLH。同时,由于青岛温带季风气候的特性,各季节盛行风存在差异,这对 ABL 发展情况也有一定影响。将 2020 年 12 月至 2021 年 2 月、2021 年 3 月至 5 月、2021 年 6 月至 8 月、2021 年 9 月至 11 月分别划分为冬季、春季、夏季和秋季。图 14 为青岛 AMBLH 季度日变化箱形图,由图 14 可见,各季节 AMBLH 发展都有日变化趋势,其中发展抬升范围为春季和冬季相近,秋季次之,夏季最小。

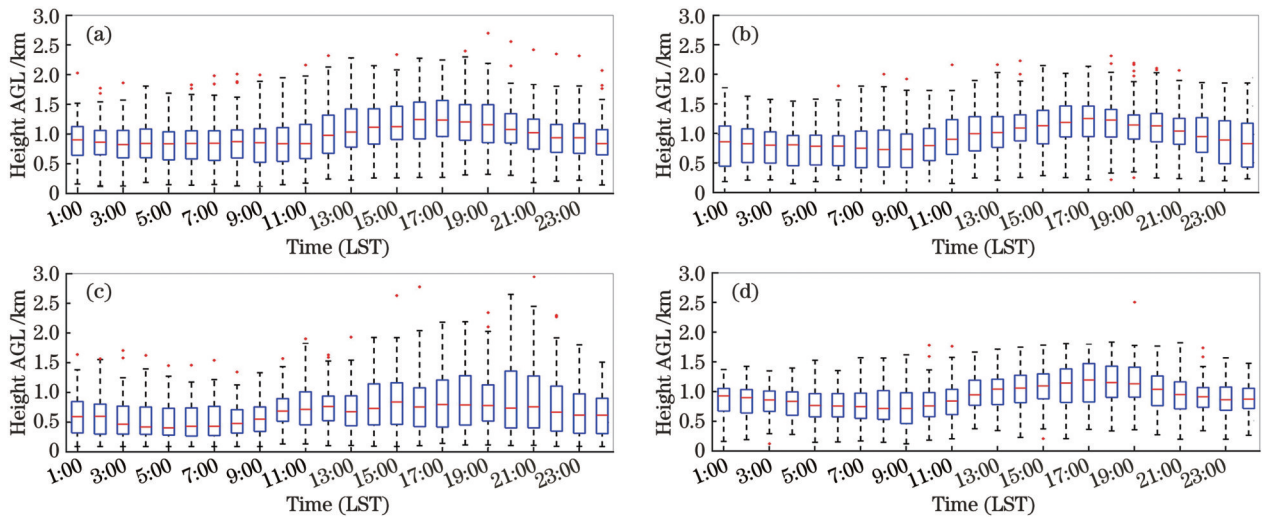


图 14 青岛 AMBLH 季度日平均变化箱形图。(a) 冬季;(b) 春季;(c) 夏季;(d) 秋季

Fig. 14 Box-plots of daily average variation of AMBLH in Qingdao for each season. (a) Winter; (b) spring; (c) summer; (d) autumn

图 15 为青岛四季的小时平均 AMBLH 变化图,从图 15 中可以清晰地看出:青岛四季的小时平均 AMBLH 整体发展程度为春季和冬季相似且大于秋季,秋季大于夏季,程度越高则表明该季节 AMBL 在日间出现抬升、降低的趋势越明显。冬、春、秋 3 个季

节的 AMBL 发展程度虽然相近,但在高度抬升时间上有一定的区别,冬季在 10:00—11:00 期间高度出现明显抬升,而春季和秋季在 9:00—10:00 期间高度开始抬升。夏季 AMBLH 虽然发展程度较低,但其高度开始抬升的时间最早,在 7:00—8:00 之间就出现升高的趋势,且 9:00 往后高度抬升幅度较大。抬升趋势出现时间与各季节特征紧密相关:在日出时间上,冬季较晚,春季和秋季相对提前,夏季最早;在气温方面,冬、春、秋 3 个季节相对较低,夏季最高。在日出时间与太阳辐射量的共同作用下,各季节 AMBL 发展情况表现出不同的特征。

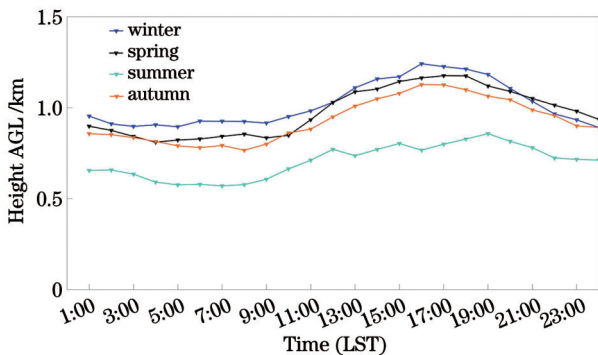


图 15 青岛四季 AMBLH 小时平均变化图

Fig. 15 Diagram of variation of AMBLH hourly-averaged value in Qingdao

AMBLH 特征随季节产生相应变化,以日为单位统计各季节 AMBLH 平均值,箱形图如图 16 所示。冬、春、秋 3 个季节的 AMBLH 中位数基本相同,分别为 918.1 m、947.0 m 和 894.8 m,夏季中位数最小,为 663.2 m。各季节 AMBLH 波动范围都较小,对应的上下四分位数变化范围较小,冬季的上下四分位数变化范围最大,也仅为 235.5 m。

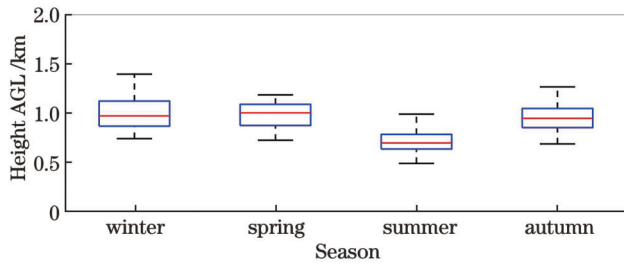


图 16 青岛 AMBLH 季节变化箱形图

Fig. 16 Box-plot of AMBLH seasonal variation in Qingdao

5 结 论

本文基于多种主流反演方法提出了一种 AMBLH 综合反演方法,对于日间/夜间的 CBL/气溶胶污染层区别进行针对性反演,有效剔除了云层和降雨/降雪等复杂天气的影响,提升了 AMBLH 反演准确性。本文方法的反演结果与探空仪同步观测结果的一致性高,决定系数 $R^2 = 0.93$ 。

利用 2020 年 11 月至 2021 年 11 月在青岛进行的 CDL 观测实验数据,反演得到青岛一年内的 AMBLH 并进行了分析。全年除了 6、7 月之外各月份都表现出明显的 AMBLH 日变化趋势,表明太阳辐射加热对 AMBL 发展影响较大。夏季两个月 AMBLH 日变化趋势不明显,推测其原因是:青岛的温带季风气候在夏季表现为来自海洋的东南风盛行,受到海洋表面温度锋冷中心的影响,AMBL 低层的稳定度增大,同时大气混合与海表风速降低,热力因素和动力因素两方面都限制了 AMBL 的发展。相应地,2021 年 6、7 月 AMBLH 中位数为全年最低的两个半月。

对各季度 AMBLH 进行统计分析,AMBLH 季度日平均变化的整体发展程度为春季与冬季相似且大于秋季,秋季大于夏季,AMBLH 日变化整体发展程度越高表明 AMBLH 日间抬升、降低特征越明显。各季节的日均 AMBLH 波动较小,春季与冬季的中位数相近,且春季的中位数大于秋季,秋季的中位数大于夏季。春、秋、冬三季的 AMBLH 日发展变化特征相近,考虑到 AMBL 发展受到太阳辐射加热的影响显著,推测该现象是由青岛全年气温日变化都较小引起的。各季度日变化中 AMBL 发展抬升趋势出现的时间有所不同,推测这是日出时间早晚以及季节气温差异共同作用下产生的结果,按时间从早到晚排列为:夏季早于春季,秋季与春季相当并且早于冬季。

参 考 文 献

[1] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
 [2] 盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
 Sheng P X. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003.
 [3] 刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 大气边界层物理研究进展[J]. 大气

科学, 2013, 37(2): 467-476.

Liu H Z, Feng J W, Wang L, et al. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 467-476.

- [4] 车军辉, 赵平, 史茜, 等. 大气边界层研究进展[J]. 地球物理学报, 2021, 64(3): 735-751.
 Che J H, Zhao P, Shi Q, et al. Research progress in atmospheric boundary layer[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 735-751.
 [5] Zhang H S, Zhang X Y, Li Q H, et al. Research progress on estimation of the atmospheric boundary layer height[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(3): 482-498.
 [6] 汪晋, 廖前锋, 闫申, 等. 大气边界层高度的确定及其在数值天气预报模式中的应用[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(5): 515-524.
 Wang J, Liao Q F, Yan S, et al. Determination of atmospheric boundary layer height and its application in numerical weather forecast model[J]. Torrential Rain and Disasters, 2022, 41(5): 515-524.
 [7] 张璐, 李倩惠, 孟露, 等. 深厚大气边界层演变与湍流运动、沙尘滞空的研究[J]. 地球科学进展, 2022, 37(10): 991-1004.
 Zhang L, Li Q H, Meng L, et al. Study on the evolution of deep atmospheric boundary layer, turbulent motion and dust stagnation[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(10): 991-1004.
 [8] 马艳, 黄容, 时晓曦, 等. 青岛冬季 $PM_{2.5}$ 持续重污染天气的大气边界层特征[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 42-52.
 Ma Y, Huang R, Shi X M, et al. Characteristics of planetary boundary layer for persistent $PM_{2.5}$ heavy pollution in winter in Qingdao city[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(1): 42-52.
 [9] 马元仓, 李岩瑛, 杨吉萍, 等. 青海中北部边界层高度与不同灾害天气的关系[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 1048-1057.
 Ma Y C, Li Y Y, Yang J P, et al. Relationships between boundary layer height and different disaster weathers in north-central Qinghai Province[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(5): 1048-1057.
 [10] 杜川利, 唐晓, 李星敏, 等. 城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J]. 高原气象, 2014, 33(5): 1383-1392.
 Du C L, Tang X, Li X M, et al. Calculations of planetary boundary layer height and its relationship with particle size concentration in Xi'an city[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(5): 1383-1392.
 [11] Qu Y W, Han Y, Wu Y H, et al. Study of PBLH and its correlation with particulate matter from one-year observation over Nanjing, southeast China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(7): 668.
 [12] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, et al. Intense atmospheric pollution modifies weather: a case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in Eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(20): 10545-10554.
 [13] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality[J]. National Science Review, 2017, 4(6): 810-833.
 [14] Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. Relative contributions of boundary-layer meteorological factors to the explosive growth of $PM_{2.5}$ during the red-alert heavy pollution episodes in Beijing in December 2016[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(5): 809-819.
 [15] Zou J, Sun J N, Ding A J, et al. Observation-based estimation of aerosol-induced reduction of planetary boundary layer height [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(9): 1057-1068.
 [16] Baars H, Ansmann A, Engelmann R, et al. Continuous monitoring of the boundary-layer top with lidar[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(23): 7281-7296.
 [17] Li H, Yang Y, Hu X M, et al. Evaluation of retrieval methods of daytime convective boundary layer height based on lidar data

- [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(8): 4578-4593.
- [18] Muñoz-Porcar C, da Silva M P A, Saeed U, et al. Variance processing for stable boundary-layer height estimation using backscatter lidar data: a discussion[C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, July 11–16, 2021, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2021: 8045-8048.
- [19] Pan Y N, Jin Z L, Tong P F, et al. Edge detection method for determining boundary layer height based on Doppler lidar[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(9): 1103.
- [20] Wang F T, Yang T, Wang Z F, et al. A comprehensive evaluation of planetary boundary layer height retrieval techniques using lidar data under different pollution scenarios[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 253: 105483.
- [21] Wang W, Gong W, Mao F Y, et al. An improved iterative fitting method to estimate nocturnal residual layer height[J]. *Atmosphere*, 2016, 7(8): 106.
- [22] Yang T, Wang Z F, Zhang W, et al. Technical note: boundary layer height determination from lidar for improving air pollution episode modeling: development of new algorithm and evaluation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(10): 6215-6225.
- [23] Eresmaa N, Karppinen A, Joffre S M, et al. Mixing height determination by ceilometer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(6): 1485-1493.
- [24] Haeffelin M, Angelini F, Morille Y, et al. Evaluation of mixing-height retrievals from automatic profiling lidars and ceilometers in view of future integrated networks in Europe[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, 143(1): 49-75.
- [25] Peng J E, Grimmond C S B, Fu X S, et al. Ceilometer-based analysis of Shanghai's boundary layer height (under rain- and fog-free conditions) [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(4): 749-764.
- [26] Boers R, Eloranta E W, Coulter R L. Lidar observations of mixed layer dynamics: tests of parameterized entrainment models of mixed layer growth rate[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 247-266.
- [27] Nelson E, Stull R, Eloranta E. A prognostic relationship for entrainment zone thickness[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(9): 885-903.
- [28] 贺千山, 毛节泰. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究[J]. *气象学报*, 2005, 63(3): 374-384.
He Q S, Mao J T. Observation and study on vertical distribution of atmospheric mixed layer and aerosol in Beijing city[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(3): 374-384.
- [29] 王治华, 王宏波, 何捷, 等. Mie 散射激光雷达研究大气边界层特性[J]. *光散射学报*, 2006, 18(2): 147-150.
Wang Z H, Wang H B, He J, et al. Study on the characteristics of atmospheric boundary layer by Mie scattering lidar[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2006, 18(2): 147-150.
- [30] 王治华, 王宏波, 何捷, 等. Mie 散射激光雷达研究成都地区大气边界层结构[J]. *激光杂志*, 2008, 29(2): 36-38.
Wang Z H, Wang H B, He J, et al. Study on the characteristics of atmospheric boundary layer by Mie scattering lidar over Chengdu[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(2): 36-38.
- [31] 张金业. 武汉上空对流层大气气溶胶 Raman/Mie 激光雷达探测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
Zhang J Y. Detection of tropospheric aerosol by raman/Mie lidar over Wuhan[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [32] 黄春红, 宋小全, 刘智深. 基于激光雷达数据大气边界层高度检测方法研究[C]//中国光学学会 2010 年光学大会论文集. 北京: 中国光学学会, 2010: 3302-3308.
Huang C H, Song X Q, Liu Z S. Research on detection method of atmospheric boundary layer height based on LiDAR data[C]//Proceedings of The 2010 Optical Conference of the Optical Society of China. Beijing: The Chinese Optical Society, 2010: 3302-3308.
- [33] Compton J C, Delgado R, Berkoff T A, et al. Determination of planetary boundary layer height on short spatial and temporal scales: a demonstration of the covariance wavelet transform in ground-based wind profiler and lidar measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(7): 1566-1575.
- [34] 丁辉. 利用微脉冲激光雷达(MPL)探测气溶胶消光系数廓线和大气混合层高度的初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
Ding H. A preliminary study on detecting aerosol extinction coefficient profile and atmospheric mixing layer height by micropulse lidar (MPL) [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [35] 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.
Zhang W C, Zhang Y, Lü Y, 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.
- [36] 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.
Wang D X, Song X Q, Feng C Z, 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.
- [37] 李丽美. 基于 Scheimpflug 激光雷达技术的大气边界层高度探测[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
Li L M. Detection of atmospheric boundary layer height based on Scheimpflug lidar technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [38] 于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 激光雷达反演大气边界层高度的优化方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0728002.
Yu S Q, Liu D, Xu J W, et al. Optimization method for planetary boundary layer height retrieval by lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0728002.
- [39] 于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 基于激光雷达探测的金华、合肥和兰州大气边界层高度及其统计分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2401002.
Yu S Q, Liu D, Xu J W, et al. Statistics and analysis of planetary boundary layer height retrieved by lidar over Jinhua, Hefei and Lanzhou[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2401002.
- [40] 靳翔, 宋小全, 刘佳鑫, 等. 基于多普勒激光雷达的边界层内湍流参数估算[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1110001.
Jin X, Song X Q, Liu J X, et al. Estimation of turbulence parameters in atmospheric boundary layer based on Doppler lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110001.
- [41] 朱黎明, 孙刚, 张汉九, 等. 利用激光风廓线雷达对海洋大气边界层高分辨率光学湍流估算模型的研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1201004.
Zhu L M, Sun G, Zhang H J, et al. Study on high-resolution optical turbulence estimation model of marine atmospheric boundary layer using laser wind profiler radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1201004.
- [42] 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 Meteorology*, 1997, 83(2): 247-284.
- [43] 魏浩, 胡明宝, 艾未华. 小波变换在风廓线雷达探测大气边界层高度中的应用研究[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(6): 811-820.
Wei H, Hu M B, Ai W H. The detection of the atmospheric boundary layer height using wind profiler in wavelet transform method[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(6): 811-820.
- [44] 王旻燕, 吕达仁. GMS5 反演中国几类典型下垫面晴空地表温度的日变化及季节变化[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 957-968.

- Wang M Y, Lü D R. Diurnal and seasonal variation of clear-sky land surface temperature of several representative land surface types in China retrieved by GMS5[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 957-968.
- [45] Hennemuth B, Lammert A. Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 120(1): 181-200.
- [46] 孟宪贵. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Meng X G. Influence of surface cold water on atmospheric boundary layer and sea fog in the Yellow Sea in summer[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [47] 张强. 极端干旱荒漠地区大气热力边界层厚度研究[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 614-620.
- Zhang Q. Study on depth of atmospheric thermal boundary layer in extreme arid desert regions[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 614-620.
- [48] 田野, 刘旭林, 于永涛, 等. 北京城区大气边界层高度的反演研究[J]. *气象科技*, 2022, 50(1): 9-20.
- Tian Y, Liu X L, Yu Y T, et al. Inversion of atmospheric boundary layer height in Beijing urban area[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2022, 50(1): 9-20.
- [49] 徐丽丽, 张镭, 杜韬, 等. 利用地基遥感资料确定大气边界层高度[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(5): 635-641, 649.
- Xu L L, Zhang L, Du T, et al. Determining the height of atmospheric boundary layer using the data from ground-based remote sensing[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2020, 56(5): 635-641, 649.
- [50] 姜杰, 郑有飞, 刘建军, 等. 南京上空大气边界层的激光雷达观测研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(1): 22-27, 80.
- Jiang J, Zheng Y F, Liu J J, et al. Observational research on planetary boundary layer by lidar over Nanjing city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(1): 22-27, 80.

Atmospheric Material Boundary Layer Height Retrieval and Analysis in Qingdao Based on Doppler Lidar

Wang Junbo¹, Wang Xiaoye¹, Ren Chao², Sun Kangwen¹, Yin Jiaping³, Fan Mengqi³,
Dai Guangyao^{1,4}, Wu Songhua^{1,4,5*}

¹*College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;*

²*Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China;*

³*Qingdao Leice Transient Technology Co., Ltd., Qingdao 266100, Shandong, China;*

⁴*Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, Shandong, China;*

⁵*Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China*

Abstract

Objective The atmospheric boundary layer (ABL) is the lowest layer in the troposphere, which is relatively more uniformly mixed under the influence of the ground-air interaction. This layer is directly affected by surface forcing during the interaction between the surface and the atmosphere, and its response time is less than one hour, usually in the range of 100–3000 m. Meteorological elements in ABLs have obvious diurnal changes, and there are multiple scales of motion, with turbulence as the main form. ABL greatly affects people's production, life, and other activities. ABL height (ABLH) has high research significance in meteorology and other related fields. A high concentration of aerosol and water vapor in ABL contrasts significantly with a free atmosphere that is above the ABL. From the perspective of substance distribution, the atmospheric material boundary layer (AMBL) and atmospheric material boundary layer height (AMBLH) can be determined. AMBL is a part of ABL, and the characteristics of AMBLH are similar to that of ABLH but they have differences. AMBLH mainly reflects the spread of atmospheric substances and pollution in ABLs, but it is not capable of representing all turbulent motion in ABLs. ABL is closely related to air pollution, in which turbulence has a diffusion and mixing effect on air pollutants. ABLH is negatively correlated with the concentration of pollutants near the ground, and heavy pollution is often accompanied by a lower ABLH. Traditional observation techniques include radiosondes, meteorological towers, airplanes, etc., which can realize direct observation of the profile of meteorological elements and ensure the accuracy and credibility of the inversion. However, limited by cost and observation methods, such means fail to achieve long-term and continuous observation. With the development of remote sensing technology and its application in the field of meteorology, ground-based remote sensing equipment such as lidar, microwave radiometer, ceilometer, and sodar has shown their advantages in ABL observation. As an efficient ground-based remote sensing instrument, coherent Doppler lidar (CDL) can realize continuous and high-precision observation of ABLs and has been used widely in recent years.

Methods A large number of retrieval methods based on lidar data have been applied, and each of them focuses on different characteristics of ABLH and has various advantages. Thus, different results may be obtained. In order to increase the accuracy of AMBLH retrieval, we proposed a novel comprehensive AMBLH retrieval method based on several mature methods, including the gradient method, wavelet covariance transform method, and signal-to-noise weight-fraction method. The comprehensive AMBLH retrieval method contains three modules for increasing retrieval accuracy. Firstly, by summarizing various characteristics of different weather, a complex weather distinguishing method was developed. Next, based on the wavelet covariance method, a cloud-deleting module was applied. Thus, complex weather conditions and clouds would be eliminated. Finally, by inputting sunrise and sunset time information, different methods can be applied for the convective boundary layer and aerosol contamination layer between the stable boundary layer and the residual layer, respectively. With the means mentioned above, the comprehensive AMBLH retrieval method can obtain AMBLH with high accuracy and efficiency.

Results and Discussions By using the CDL observation experiment data in Qingdao from November 2020 to November 2021, the AMBLH in Qingdao within one year is retrieved and analyzed. All the months of the year except June and July show a clear diurnal trend of AMBLH, indicating that solar radiation heating has a great impact on the development of AMBL. The diurnal variation trend of AMBLH is not obvious for two months in summer, and it is considered that the temperate monsoon climate in Qingdao is characterized by the prevailing southeast wind from the ocean in summer. The development of AMBLH is affected by the ocean surface temperature front cold center, which increases the stability of the lower AMBL. At the same time, atmospheric mixing and sea surface wind speed are reduced, which limits the development of AMBL in both thermal and dynamic factors. Correspondingly, the median AMBLH in June and July is the lowest throughout the year.

The statistical analysis of AMBLH in each season shows that the overall development degree of the seasonal diurnal variation of AMBLH is similar in spring and winter but more obvious in autumn, and the degree in autumn is higher than that in summer. A higher degree indicates a more obvious diurnal rise and fall of AMBLH. The daily mean AMBLH fluctuates less in each season, and the median of AMBLH in each season in descending order is spring, winter, autumn, and summer. In addition, the median of AMBLH in spring and winter is similar. It is found that the diurnal development and variation characteristics of AMBLH in spring, autumn, and winter are similar. Since the development of AMBL is significantly affected by solar radiation heating, it is believed that this phenomenon is caused by the small diurnal variation of temperature in Qingdao throughout the year. The timing of the uplifting trend of AMBL development in the diurnal variation of each season is different, which may be caused by the combined effect of sunrise time and seasonal temperature differences. The order from early to late is summer, spring, autumn, and winter.

Conclusions Based on a variety of well-developed AMBLH retrieval methods, we propose a comprehensive AMBLH retrieval method, which performs targeted retrieval for the difference between the mixed layer and aerosol contamination layer during the day and night and effectively removes the influence of clouds and complex weather such as rain and snow. Therefore, the accuracy of AMBLH retrieval is improved. Compared with the synchronous observation results of radiosondes, this method shows high consistency and good agreement (determination coefficient $R^2=0.93$). AMBLH in Qingdao in the time period of 13 months is retrieved by the comprehensive method, and the results are statistically analyzed.

Key words atmospheric optics; coherent Doppler lidar; atmospheric material boundary layer height; comprehensive retrieval method