

大气边界层高度确定及应用研究进展*

张宏昇¹ 张小曳² 李倩惠¹ 蔡旭晖³ 范绍佳⁴ 宋宇³

胡非⁵ 车慧正² 权建农⁶ 康凌³ 朱彤³

ZHANG Hongsheng¹ ZHANG Xiaoye² LI Qianhui¹ CAI Xuhui³ FAN Shaojia⁴ SONG Yu³

HU Fei⁵ CHE Huizheng² QUAN Jiannong⁶ KANG Ling³ ZHU Tong³

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系气候与海-气实验室, 北京, 100871

2. 中国气象科学研究院中国气象局大气化学重点实验室, 北京, 100081

3. 北京大学环境科学与工程学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京, 100871

4. 中山大学大气科学学院, 广州, 510275

5. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京, 100029

6. 北京城市气象研究院, 北京, 100080

1. *Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*

2. *Key Laboratory of Atmospheric Chemistry of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

3. *State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environment Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China*

4. *School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*

5. *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

6. *Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100080, China*

2019-12-10 收稿, 2020-03-27 改回.

张宏昇, 张小曳, 李倩惠, 蔡旭晖, 范绍佳, 宋宇, 胡非, 车慧正, 权建农, 康凌, 朱彤. 2020. 大气边界层高度确定及应用研究进展. 气象学报, 78(3): 522-536

Zhang Hongsheng, Zhang Xiaoye, Li Qianhui, Cai Xuhui, Fan Shaojia, Song Yu, Hu Fei, Che Huizheng, Quan Jiannong, Kang Ling, Zhu Tong. 2020. Research progress on estimation of atmospheric boundary layer height. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3):522-536

Abstract Atmospheric boundary layer height (ABLH) is an important parameter used to depict characteristics of the planetary boundary layer (PBL) in the lower troposphere. The ABLH is strongly associated with the vertical distributions of heat, mass, and energy in the PBL, and it is a key quantity in numerical simulation of the PBL and plays an essential role in atmospheric environmental assessment. In this paper, various definitions and methods for deriving and estimating the ABLH are summarized, from the perspectives of turbulent motion, PBL dynamics and thermodynamics, and distributions of various substances in the PBL. Different methods for determining the ABLH by means of direct observation and remote sensing retrieval are reviewed, and comparisons of the advantages and disadvantages of these methods are presented. The paper also summarizes the ABLH parameterization schemes, discusses current problems in the estimation of ABLH, and finally points out the directions for possible future breakthroughs in the ABLH-related research and application.

* 资助课题: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0104、DQGG0106)、国家重点研发计划项目(2017YFC0209600、2016YFC0203300)、国家自然科学基金(91544216)。

作者简介: 张宏昇, 主要从事大气边界层与大气环境研究。E-mail: hsdq@pku.edu.cn

通信作者: 张小曳, 主要从事大气化学和大气环境研究。E-mail: xiaoye@cma.gov.cn

Key words Atmospheric boundary layer height (ABLH), Turbulent boundary layer, Aerosol accumulation layer, Remote sensing retrieval, Parameterization

摘 要 大气边界层高度是表征边界层特征的重要参量,影响边界层内水热、物质、能量的垂直分布,也是数值模拟、环境评估中的重要参数。从湍流运动、热力作用、动力作用以及物质分布等多视角总结了大气边界层高度的定义及确定方法,回顾了采用直接观测手段和遥感手段确定大气边界层高度的不同方法,对比了大气边界层高度不同获取手段的优缺点,梳理了大气边界层高度参数化方案,探讨了大气边界层高度确定中存在的问题,并提出未来相关研究和应用可能突破方向。

关键词 大气边界层高度, 湍流边界层, 物质聚集层, 遥感反演, 参数化

中图法分类号 P404

1 引 言

陆-气相互作用改变了对流层低层大气的性质,将地表的影响延伸至几百到上千米,该范围即大气边界层。或者说,大气边界层是直接受地表强迫影响,对地表强迫响应时间小于1 h的对流层低层大气(Stull, 1988)。当关注重点为生物体、海洋等特殊下垫面与大气的相互作用时,可具体称为生态边界层(王信理等, 1993)、海气边界层(高登义, 1994)等。由于地表存在摩擦拖曳、蒸发和蒸腾、热量传递等强迫过程,湍流运动是大气边界层内的主要运动形态。从湍流角度而言,大气边界层是存在各种尺度运动,湍流输送发挥重要作用,且气象要素具有明显日变化的低层大气(盛裴轩等, 2013)。湍流输送作用使大气边界层不仅是地-气热量、水分、能量和物质交换的桥梁和通道,也是大气圈、岩石圈、生物圈等多圈层相互作用的重要场所,大气边界层在天气和气候变化、水热循环等方面都扮演重要角色(刘辉志等, 2018; 杨飞跃, 2018)。

大气边界层高度是表征大气边界层特征的重要参量,是大气数值模拟和环境评估中的重要物理参数(Zhang, et al, 2011),反映了边界层内湍流混合、对流发展等物理过程,影响热量、水汽、气溶胶等物质与能量的垂直分布,在天气预报和空气质量预报模式中,被用于确定垂直扩散、污染物沉降和输送(Seibert, et al, 2000; Dai, et al, 2014)。近年来中国重污染事件频发,边界层与污染的关系受到广泛关注(Zhong, et al, 2018; Ren, et al, 2019a, 2019b; 张小曳等, 2019; Quan, et al, 2020; Wei, et al, 2020)。对中国边界层高度空间分布的研究表明,随着空气质量下降,大多数地区边界层高度呈下降趋势(Zhao, et al, 2019);中国华北、东北、四川盆地等边界层高度是导致PM_{2.5}浓度年代际变化

的主要气象参数(Gui, et al, 2019);边界层高度与近地面污染物浓度呈负相关,对流条件下二者关系可用幂函数表示(Du, et al, 2013; Quan, et al, 2013; Li, et al, 2020);重污染过程往往伴随较低的边界层高度,通常不超过1000 m(Qu, et al, 2017);气溶胶含量升高会削弱到达地表的太阳辐射,通过气溶胶-边界层反馈机制,边界层逆温增强、湍流扩散减弱,边界层高度下降,水汽与污染物进一步累积(Ding, et al, 2013; Li Z Q, et al, 2017; Zhong, et al, 2017; Zou, et al, 2017)。

根据大气边界层的热力性质和湍流特征,可分为不稳定边界层、中性边界层和稳定边界层。不稳定边界层是由于地面加热大气形成不稳定层结而成,浮力做功使湍流异常活跃,对流热泡是湍流运动的基本形态,使边界层气象要素垂直分布近乎均匀,因此又称为对流边界层或混合层。中性边界层是低层大气整层保持中性层结,浮力做功微弱几乎可忽略。夜间随着地表辐射冷却出现逆温层结而形成的为稳定边界层。通常,对流边界层在2000—3000 m以下,稳定边界层不高于500 m(Garratt, 1994; Liu, et al, 2010),但在干旱、季风气候区可出现4000—5000 m的深厚边界层(Raman, et al, 1990; Marsham, et al, 2008; 张强等, 2008; Han, et al, 2015; Zhao, et al, 2018)。地理位置、天气气候条件、下垫面差异等都增加了边界层高度研究的复杂性(Ma, et al, 2011; 李倩惠等, 2020)。

大气边界层高度无法通过常规地面气象观测获得,需要利用温度、湿度、风速等气象要素的垂直剖面进行诊断。传统观测手段是利用无线电探空气球、系留气球、气象铁塔以及飞机直接获取气象要素垂直剖面,避免了反演误差,探测数据的精度和可信度相对较高。随着遥感技术的发展,地基遥感如激光雷达、微波辐射计、云高仪、声雷达、风

廓线雷达、RASS(Radio Acoustic Sounding System)等探测手段在边界层探测中发挥重要作用,实现了大气边界层连续观测,获取高时间分辨率的数据。此外,为了解决单站观测存在的代表性问题,一些研究利用覆盖范围更广的卫星遥感,通过GPS(Global Positioning System)无线电掩星技术反演全球大气边界层高度及分布(Ratnam, et al, 2010; Ao, et al, 2012)。

文中回顾了从不同研究视角给出的大气边界层高度定义,介绍利用传统探测手段和遥感手段确定大气边界层高度的方法,对比讨论不同方法的优缺点。总结了边界层高度参数化方案,讨论边界层高度确定过程中存在的问题。最后,对合理、有效确定边界层高度进行了展望。

2 大气边界层高度的获取思路

大气边界层高度的获取思路主要有:湍流运动角度、热力作用角度、动力作用角度以及物质分布角度。

2.1 湍流运动角度

从湍流运动角度,大气边界层高度是持续存在湍流的最低气层的厚度,可将湍流能量或湍流应力接近消失的高度视为边界层顶(赵鸣等, 1991; Dai, et al, 2014)。对流边界层高度可以认为是湍流热通量符号发生改变,或湍流热通量出现负的最大值,或湍流动能散率、垂直速度方差明显减小的高度;稳定边界层高度可以视为相关湍流参数减小到近地面层数值的百分之几的高度(Beyrich, 1997; Kosović, et al, 2000; Vickers, et al, 2004)。这些参数包括:垂直方向的热量通量、动量通量、垂直速度方差或湍流动能等。此外,一些研究基于对流边界层的最大湍涡尺度与边界层高度尺度相关联的湍流理论,利用地面湍流观测,通过风速湍流能谱计算对流边界层高度(Liu, et al, 1997; 宋星灼等, 2006; Saraiva, et al, 2013)。湍流能量法理论基础扎实,但湍流量的垂直分布观测困难。在实际应用中,常通过热力作用、动力作用、物质垂直分布来反映湍流运动状况。

2.2 热力作用角度

从热力作用角度,可以将温度梯度明显不连续,或温度的日变化接近消失的高度视为大气边界层高度(赵鸣等, 1991)。白天,通常将混合层高度或

逆温顶盖所在位置视为对流边界层顶;夜间定义接地逆温层的高度为稳定边界层高度(Yamada, 1976)。热力作用角度有一定的湍流理论依据,操作简单,应用广泛。但大气边界层的形成是动力与热力机制共同作用的结果,仅仅考虑热力作用存在一定局限。常用的从热力作用角度确定边界层高度的方法有位温梯度法(Liu, et al, 2010)和Holzworth法(干绝热法、气块法)(Holzworth, 1964),后者只适用于不稳定条件,无法描述大气边界层日变化过程(Emeis, et al, 2004)。

2.3 动力作用角度

从动力作用角度,定义风速逼近地转风的高度,或出现风速极大值的高度为边界层高度(赵鸣等, 1991)。利用风速特征判断边界层顶,其前提条件是假定大气水平均匀、正压,但实际大气运动难以满足。由于夜间稳定边界层阻碍动量下传,层顶产生风速极大值,应用中常将风速极大值的高度视为稳定边界层高度(Mahrt, et al, 1979)。但一些研究(Hyun, et al, 2005)表明,风速极大值的高度可能不会随时间发展加深。为此Hyun等(2005)提出一种根据风切变(S)估算稳定边界层高度的方法,将风切变首次小于临界阈值(S_c)的高度,或在局地最大值之上首次小于 S_c 的高度定义为稳定边界层高度,若最大风切变低于临界阈值,则取最大风切变高度为稳定边界层高度。Dai等(2014)给出了临界阈值最优取值范围。

2.4 物质分布角度

从物质分布角度,可以利用水汽、气溶胶等示踪物的空间分布判断边界层高度。大气边界层内水汽、气溶胶浓度较高,自由大气内迅速降低(Stull, 1988; Emeis, et al, 2006; Shi, et al, 2019)。由此,可将湿度、气溶胶浓度梯度明显不连续的高度作为大气边界层高度。在20世纪60—70年代,已有研究进行了早期尝试,证实了从物质分布角度描绘大气运动图像、大气结构日变化的可行性(Collis, et al, 1964a, 1964b; Uthe, 1972; Russell, et al, 1974)。胡非提出(Shi, et al, 2020)将基于物质分布角度确定的边界层高度称为“物质边界层高度”,表示物质垂直扩散的最大高度。考虑到大气科学中“边界层”一词的概念源于湍流运动,属物理范畴,其边界层特征包括了气象要素的时空变化、湍流特征等。而“物质边界层”与传统意义的边界

层存在差异,因为气溶胶的分布与气象要素不同,也与水汽、CO₂等有不同。因此,为了避免混淆,文中采用“物质聚集层”,以突出低层大气的物质分布特性。

一般地,白天物质聚集层与对流边界层对应,将比湿或气溶胶浓度迅速减小的高度视为对流边界层顶;夜间湍流输送弱,将近地面比湿或气溶胶浓度较高的气层的高度作为稳定边界层顶。边界层与自由大气中物质浓度分布的差异在雷达回波信号中有显著体现,物质聚集层是许多遥感方法确定边界层高度的方法和依据(Bravo-Aranda, et al, 2017; 师宇等, 2019)。

3 遥感方法反演大气边界层高度

3.1 地基遥感

3.1.1 颗粒物激光雷达与云高仪

激光雷达和云高仪是近年来边界层观测中应用最为广泛的地基遥感设备,二者反演边界层高度的原理相同,把气溶胶等物质作为示踪物,将接收的后向散射信号的强度与大气中气溶胶的浓度及分布相关联(Emeis, et al, 2008; Tsaknakis, et al, 2011; Yin, et al, 2019)。假设没有其他的源和汇,气溶胶等物质由地面排放进入大气边界层,在湍流扩散作用下,经过充足的时间在边界层内混合均匀,形成物质聚集层。而边界层顶部的逆温顶盖层结稳定,抑制物质向自由大气输送,自由大气中的空气较为洁净(He, et al, 2006; Pearson, et al, 2010; Haeffelin, et al, 2012)。光学信号在大气中传输受水汽与气溶胶影响,因此激光雷达的后向散射信号在边界层顶衰减迅速,梯度较大,据此推断大气边界层高度(Eresmaa, et al, 2006; 沈建等, 2017)。激光在大雾、雨雪天气下衰减较强,测量精度受到较大影响,激光雷达在复杂天气下的使用受限(Caicedo, et al, 2017)。与激光雷达系统相比,云高仪采用近红外波段,对人眼更为安全;易于维护,且价格相对较低(Kotthaus, et al, 2018; Yin, et al, 2019)。

从后向散射信号中提取边界层高度常用的方法有以下6种,也可以将其组合使用(Sawyer, et al, 2013; Poltera, et al, 2017):

(1) 阈值法。确定后向散射信号的临界强度,将后向散射信号低于该阈值的高度定义为边界层高度。使用阈值法时,需要对数据进行系统校正与

平均处理,在信噪比较低时,阈值法有较高的不确定性(Melfi, et al, 1985; Menut, et al, 1999; Munkel, et al, 2004)。

(2) 梯度法。计算后向散射信号强度的变化率,将后向散射信号一阶导数最小值所在的高度视为混合层高度(Flamant, et al, 1997; Hennemuth, et al, 2006)。一些研究利用二阶导数的最小值或对数一阶导数的最小值判断边界层高度(White, et al, 1999; Sicard, et al, 2004); He 等(2006)为了过滤掉气溶胶空间分布不均匀对雷达信号的影响,提出对标准化的后向散射信号计算梯度; Yang 等(2017)考虑了重力波对大气结构的影响,提出将后向散射信号立方根梯度最小值所在高度定义为边界层高度,提高了准确性(Fan, et al, 2019)。梯度法应用简单,但稳定性略差,信号廓线的局部结构对结果影响较大,因此对数据质量有较高要求(He, et al, 2006; 王琳等, 2012; 李霞等, 2018)。

(3) 标准差法。标准差反映了后向散射信号在某高度处的离散程度,该值越大离散性越强,表明变化越剧烈。由于混合层顶部有较强的夹卷,后向散射信号在边界层顶发生突变,可将信号标准差最大值的高度视为混合层高度(Hopper, et al, 1986; 杨富燕等, 2016)。

(4) 小波协方差法。小波协方差变换是检测信号突变的方法,小波协方差函数值越大,信号函数与小波函数相似性越高,表明信号变化越大。因此,小波协方差函数取得最大值的高度为混合层高度(Davis, et al, 2000; Deng, et al, 2014)。

(5) 曲线拟合法。假定理想的后向散射廓线满足最简单的混合层特征,即混合层内后向散射信号强,强度几乎不变,混合层顶迅速减小。根据观测所得的后向散射廓线,拟合出理想廓线,拟合曲线和实测廓线均方根误差最小时对应的高度为边界层高度(Steyn, et al, 1999; Eresmaa, et al, 2006; Peng, et al, 2017)。

梯度法、标准差法以及小波协方差法确定边界层高度效果相似,均对噪声较为敏感(Haeffelin, et al, 2012; Yin, et al, 2019),曲线拟合法受廓线局部结构影响小,可在信噪比不太高时仍有较高的稳定性,但计算代价相对更高(Steyn, et al, 1999; Li H, et al, 2017)。

(6) 图像边缘检测法。边界层顶是回波信号梯

度变化最大的位置,对应回波信号图像的边缘(项衍等, 2016)。根据回波信号绘制灰度图,滤波去掉图像噪声并维持轮廓信息,然后进行双阈值操作,再通过边缘检测可直观提取边界层高度。Lewis 等(2013)将小波分析与图像边缘检测技术结合,根据时间、小波协方差函数值、邻近边界层高度等因素,利用模糊逻辑法确定最佳边界层高度,该算法不易受到云和残余层的影响,准确性较高。

激光雷达(云高仪)有较高的时间和空间分辨率,但其本质是探测气溶胶分布,即物质聚集层,不能完全代表湍流意义的边界层结构。夜间热力边界层高度的降低并不会影响高空的气溶胶分布,残余层累积的气溶胶可导致边界层高度的高估(Wang, et al, 2012; Bravo-Aranda, et al, 2017; Caicedo, et al, 2017)。在复杂的大气运动下,气溶胶在边界层内垂直分布往往不均匀,出现多层气溶胶结构,利用梯度法、小波协方差等方法可能识别出多个高度,筛选最佳高度的问题仍存在很大不确定性(Moreira, et al, 2018; Su, et al, 2020)。此外,云的存在也增加了确定边界层高度的难度(Cohn, et al, 2000; Pearson, et al, 2010; Liu, et al, 2018)。为了更准确地确定复杂条件下的边界层高度,许多研究提出了新的方法:Haefelin 等(2012)建议使用辐射和地表温度信息获取地表感热通量,辅助确定边界层高度。Su 等(2020)考虑了边界层随时间变化的热力稳定性,提出 DTDS 算法,有助于修正气溶胶残余层引起的误差。Lange 等(2014)基于扩展卡尔曼滤波法追踪边界层发展,用误差函数形状的廓线模拟边界层顶,滤波器自适应地将模型形状函数与观测数据进行拟合,并在统计意义上最小化均方根误差,可以在低信噪比条件下确定边界层高度。Saeed 等(2016)为了解决残余层对边界层高度判断的干扰,提出一种激光雷达与微波辐射计协同观测的方法,使用扩展卡尔曼滤波自适应的同化两种仪器的观测结果,从而更准确地确定稳定边界层高度。Bravo-Aranda 等(2017)提出 POLARIS 算法,将小波协方差变换应用于距离修正信号和垂直平行信号比率,基于激光雷达去极化信息估计边界层高度。Liu 等(2018)利用双波长偏振激光雷达获取气溶胶颜色比率和后向散射系数,构建差异度,提出基于粒子特征差异的最大差分算法的 MDS 算法,在弱对流条件下也可以较好地确定边界层顶。

3.1.2 微波辐射计

微波辐射计根据大气发射、散射的微波信号,可获取大气辐射亮温,利用微波辐射传输模式并结合大气背景信息,用牛顿迭代、神经网络等方法反演出不同高度的温度、相对湿度、水汽密度等信息(Hewison, 2006; 刘红燕, 2011),进而确定大气边界层高度。

微波辐射计可提供连续观测,时间分辨率高、易于维护;相比可见光与红外波段,微波对云的穿透性好,受云的干扰小,可提供不同天气条件下的大气温度、湿度结构(Kim, et al, 2015)。但微波辐射计的垂直分辨率在低空较高,高空相对较低,亦存在盲区问题,反演的水汽剖面只能代表水汽的平均变化趋势,无法揭示水汽的细微变化(杨富燕等, 2016),降水条件下反演精度明显降低(Xu, et al, 2014)。此外,微波辐射计在低层大气反演精度相对较高,但反演误差随高度增大,反演技术有待进一步完善(刘建忠等, 2010; 刘红燕, 2011; Friedrich, et al, 2012; Xu, et al, 2015)。

3.1.3 声雷达

由于大气温度分布不均匀,声波信号在大气中的散射强度不同(Emeis, et al, 2008)。在对流边界层顶,较强的温度梯度和风切变使夹卷层湍流和温度脉动增强,导致温度结构参数(C_T^2)与后向散射信号强度在边界层顶有第 2 大值(Beyrich, 1995);稳定边界层内结构参数变化较小,而在边界层顶有较强减小,据此判断稳定边界层高度。Emeis 等(2004)在 Beyrich(1997)方法的基础上引入垂直速度的方差作为限制条件,辅助判断边界层顶。

声雷达应用简单,造价较低,相比其他地基遥感设备盲区较小、垂直分辨率较高(Emeis, et al, 2004; Kallistratova, et al, 2018)。但探测高度有限,多低于 1000 m(Angevine, et al, 1994; Beyrich, 1995)。小型声雷达设备具有更高的时、空分辨率,盲区可低至 10 m(Seibert, et al, 2000)。声雷达对环境噪声敏感,且产生噪声污染,在城市中应用困难,目前声雷达在确定边界层高度方面应用较少,在研究稳定边界层低空急流、重力内波方面应用较多(Emeis, et al, 2008; Kallistratova, et al, 2018)。

3.1.4 风廓线雷达

风廓线雷达利用晴空大气中的湍流对电磁波的散射,反演水平风场、垂直速度以及大气折射率

结构常数信息(胡明宝等, 2010)。风廓线雷达接收的回波信号主要来自无线电折射指数的不均匀性, 可以由折射率结构常数(C_n^2)表征, C_n^2 主要受温度与湿度影响, 后者影响更为明显(Cohn, et al, 2000; Emeis, et al, 2008; Coen, et al, 2014)。研究(Fairall, 1991)表明, 在对流边界层顶有 C_n^2 的峰值出现, 信噪比在一定范围内与 C_n^2 成正比。因此, 可根据信噪比的峰值高度判断对流边界层顶(Angevine, et al, 1994; 戈书睿, 2017)。

边界层风廓线雷达移动性强, 时间分辨率可小于 10 min, 空间分辨率可低于 50 m, 能够提供对流边界层及夹卷层厚度等信息。但盲区较大, 难以捕捉较低的边界层(Angevine, et al, 1994); 晴空湍流对电磁波的散射回波信号通常较弱, 导致信噪比较低, 雨雪等不良天气条件、积云的存在均会干扰回波信号(胡明宝等, 2010; Coen, et al, 2014); 由于湿度对电磁信号的影响较大, 但湿度的混合程度多不及热量充分, 导致获取的边界层高度可能出现歧义(Seibert, et al, 2000)。RASS 是风廓线雷达和声雷达的组合, 可以综合获取风、 C_n^2 以及声速反演的虚温的垂直分布, 从而提高边界层高度判定的准确性。

3.1.5 多普勒测风激光雷达

大气中空气分子或颗粒物与激光雷达存在相对运动, 产生多普勒频移, 通过探测发射信号与后向散射信号间的多普勒频移可以反演风场信息(Chanin, et al, 1989; Khaykin, et al, 2016)。风速方差可作为表示湍流运动特征的代理变量, 因此许多研究主要依据多普勒测风激光雷达获取的垂直风速方差(σ_w^2)反演边界层高度(Banta, et al, 2006; Schween, et al, 2014; Shukla, et al, 2014), 也有研究(Moreira, et al, 2015; O'Connor, et al, 2010)利用低空急流、湍流能量耗散率信息反演边界层高度。

对流边界层高度可以通过阈值法确定, 不同下垫面的临界垂直速度方差(σ_w^2)不同(Tucker, et al, 2009; Pearson, et al, 2010; Barlow, et al, 2011; Huang, et al, 2017)。Schween 等(2014)发现, 25% 的阈值变化会引起边界层高度产生 7% 的偏差, 因此需要根据下垫面情况选择适合的临界阈值。夜间稳定边界层湍流运动较弱, σ_w^2 阈值取值的不确定性较大, 因此多用比例法, 即将垂直速度方差减小到近地面最大值百分之几的高度作为稳定边界层顶, 比

例通常取 0.05 或 0.1(Vickers, et al, 2004; LeMone, et al, 2014)。

多普勒激光雷达具有时间、空间分辨率高, 探测空间范围大的优点, 可以对边界层连续采样; 可以反演湍流信息, 利用垂直速度方差确定边界层高度比基于平均风速的方法更加准确(Huang, et al, 2017)。

3.2 卫星遥感

通过卫星遥感, 可利用 GPS 无线电掩星法反演边界层高度。GPS 卫星发射的信号穿过密度不均匀的地球大气发生折射, 偏折信号被地球低轨道卫星接收。对原始信号进行处理可获得偏折角序列、大气折射率剖面信息, 偏折角与折射率在边界层顶迅速减小, 可据此判断边界层顶(Seidel, et al, 2010; Ratnam, et al, 2010; Ao, et al, 2012)。根据折射率与大气热力学性质的关系也可进一步反演温度、湿度的垂直分布, 以确定边界层高度(Kursinski, et al, 1996)。

GPS 信号为微波, 不受云和降水的影响。此外, 掩星技术可以提供全天候观测, 空间覆盖范围广, 弥补了海洋、极端气候区的观测不足, 有利于校验并改进模式、提高天气和气候预测的准确性(Kursinski, et al, 1996)。但掩星观测的最低高度可能无法到达地表, 低层大气反演的准确性仍有待提高, 反演的廓线水平、垂直分辨率较低, 增加了非均匀下垫面反演的不确定性(Ao, et al, 2012)。

总的来说, 基于观测获取大气边界层高度离不开传统观测与遥感反演, 二者各有优势, 可互为补充。表 1 在 Seibert 等(2000)的基础上, 补充总结了各种观测方法的优缺点。

4 边界层高度的预报和诊断公式

大气边界层高度也可以利用参数化的方法获得, 即通过预报方程、诊断公式计算获得边界层高度。参数化的方法只需输入少量数据, 操作简便, 在缺乏大气剖面观测的地方应用价值较高。

4.1 诊断公式

稳定边界层平衡高度的诊断方程通常有两类, 一类是表面通量形式, 需要利用地表热量、动量通量; 另一类是理查森数形式, 需要利用整体层结和风切变(Vickers, et al, 2004)。

表 1 大气边界层高度观测方法对比

Table 1 Comparison of different observational methods on determining the atmospheric boundary layer height

技术手段		优点	缺点
直接观测	无线电探空	直接观测风速、温度、湿度气象要素, 避免了反演误差; 常规观测, 资料连续, 可用于气候尺度研究; 观测标准规范, 不同观测间可比性强, 可用于遥感反演结果的对比验证。	时间、空间分辨率低, 无法满足边界层研究需求; 仅能获取常规气象要素的平均廓线; 空间漂移大, 需假定大气平稳均一。
	系留气球	时间、空间分辨率可以调控; 可视为“软塔”, 可移动, 机动性强; 可搭载多种传感器, 实现气象、湍流、化学、遥感观测。	时间分辨率有限, 难以长时间连续观测; 探测的空间范围有限; 大风条件下斜距过大, 应用困难。
	气象铁塔	可长时间连续观测; 低层大气可加密观测; 可搭载多种传感器, 实现气象、湍流、化学、遥感观测。	气象塔造价较高; 无法移动; 塔高多在50—400 m, 探测空间范围有限。
	飞机	时间、空间分辨率高, 观测空间连续, 适合中小尺度研究; 可搭载多种传感器, 实现气象、湍流、化学、遥感观测。	受天气条件、航线限制, 无法长期连续观测; 需要精确测量飞行轨迹, 数据处理流程复杂。
地基遥感	颗粒物激光雷达/云高仪/多普勒测风激光雷达	时间、空间分辨率较高; 云高仪对眼安全, 易于维护, 成本更低; 均可识别气溶胶垂直分布, 多普勒测风激光雷达还可反演风场和湍流信息。	低层存在盲区问题; 需要大气有颗粒物存在; 物质聚集层与湍流边界层不等价, 云、残余层、多层气溶胶结构下边界层高度反演困难; 复杂天气下测量精度有限。
	微波辐射计	时间分辨率高; 对云的穿透力强, 受云干扰较小。	低层存在盲区问题; 垂直分辨率随高度增加而降低; 反演误差随高度增加。
	风廓线雷达	时间、空间分辨率较高; 可反演风场信息; 可移动, 机动性强。	低层存在盲区问题; 空间分辨率较为有限; 在水汽混合弱、有云、复杂天气下判断受干扰。
天基遥感	卫星遥感	全天候观测, 空间覆盖范围广; 微波波段受云和降水影响小。	低层大气反演的准确性低, 较低边界层高度反演困难; 水平、垂直分辨率较为粗糙。

4.1.1 基于表面通量的诊断公式

对于影响稳定边界层高度的因素, 如摩擦力、地球自转、地表通量、背景大气层结等, 不同研究基于不同的考量, 提出的表达形式各异 (Zilitinkevich, et al, 2007), 表 2 对基于表面通量的部分诊断公式进行了总结。但影响稳定边界层发展的物理过程 (如辐射冷却、重力波、冷泄流、惯性震荡、间歇湍流等) 复杂, 导致总体上稳定边界层的参数化准确性偏低。

4.1.2 基于理查森数的诊断公式

是否存在湍流运动, 是大气边界层和自由大气的本质区别, 可根据理查森数 (Ri) 区分湍流和非湍流。实际应用中, 常将理查森数超过临界值 (Ri_c) 的最低高度视为大气边界层高度 (Vogelezang, et al, 1996; Joffre, et al, 2001)。理查森数法综合了动力和热力作用, 对物理过程考虑更为全面, 获取平均量的梯度即可计算。但存在以下问题: 真实大气不满足平稳、均一条件; 计算气象要素的梯度时, 理查森数对垂直分辨率的选取十分敏感; Ri_c 取值存在较大的不确定性, 地球的旋转效应、Brunt-Väisälä 频率、粗糙度等也会对 Ri_c 产生影响 (Zilitinkevich, et al, 2002a; Vickers, et al, 2004; Dai, et al, 2014)。

许多研究试图确定普适的临界理查森数取值, 但 Richardson 等 (2013) 的研究表明, 临界理查森数并非常数, 而是大气整体稳定性的函数。Dai 等 (2014) 研究表明, 虽然理查森数法的物理意义明确, 但在实际应用中, 对稳定边界层高度的检出率较低, 且难以准确识别对流边界层高度, 改变临界阈值对检出率没有明显改善。

4.1.3 其他诊断公式

(1) 国标法。根据国家标准 GB/T 3840-1991 (国家技术监督局等, 1991), 可以利用地面观测的太阳高度角、云量、风速确定大气稳定度分类, 根据稳定度类型计算混合层高度 (表 2)。国标法仅需要地面观测数据, 作为全国统一标准便于实施。但若在静风条件下, 该方法会造成混合层高度估算的系统性偏低。

(2) 罗氏法。Nozaki (1973) 提出利用地面观测的温度、露点、稳定度、风速、粗糙度估计边界层高度的算法。程水源等 (1997) 在其基础上考虑了风速、大气稳定度的联合频率, 对公式进行了改进。罗氏法仅需要地面观测数据, 应用方便, 对于探空资料匮乏的地区有较大应用价值。可以描述边界层日变化过程, 但计算结果存在明显高估 (Du, et al, 2013)。

表 2 大气边界层高度的诊断公式
Table 2 Diagnostic algorithms for atmospheric boundary layer height

出处	诊断公式
Rosby等(1935)	$h = C_n \frac{u_*}{f}$
Kitaigorodskii(1960)	$h = C_s L$
Zilitinkevich(1972)	$h = C_{sr} \frac{u_*}{(-fB_s)^{1/2}}$
Pollard等(1973)	$h = C_{ir} \frac{u_*}{(fN)^{1/2}}$
Brost等(1978)	$h = 0.4(u_* L/f)^{1/2}$
Nieuwstadt(1981)	$\frac{h}{L} = \frac{0.3u_*/(fL)}{1 + 1.9h/L}$
Kitaigorodskii等(1988)	$h = C_i u_*/N$
San José等(1988)	$h = \text{Abs}(L) \left[\frac{1.3}{A(1)} \right]^{\frac{1}{A(3)}} \left[1 + \frac{3H_{0,f}}{\text{Abs}(L)} \right]^{\frac{1}{3A(3)}}$
Zilitinkevich等(1996)	$\left(\frac{fh}{C_n u_*} \right)^2 + \frac{h}{C_s L} + \frac{Nh}{C_i u_*} + \frac{h f ^{1/2}}{C_{sr}(u_* L)^{1/2}} + \frac{h Nf ^{1/2}}{C_{ir} u_*} = 1$
表面通量形式 Zilitinkevich等(2002b)	$h = \frac{C_R u_*}{ f } \left[1 + \frac{C_R^2 u_* (1 + C_{UN} NL/u_*)}{C_S^2 f L} \right]^{-\frac{1}{2}}$
Steeneveld等(2007a)	$h = L \left(\frac{\left \frac{g}{\theta} w \theta_s \right }{au_* f NL} \right)^{\frac{1}{4}}$
Steeneveld等(2007b)	$h_E = a \frac{u_*}{N}, a = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{u_*}{fL} + \frac{N}{f} \right)}}{2 \left(\frac{u_*}{NL} + 1 \right)}$
Casasanta等(2014)	$h = a Q^{\frac{1}{2}} \gamma^{-\frac{3}{4}} \beta^{-\frac{1}{4}}, Q = \frac{1}{t_m - t_s} \int_{t_s}^{t_m} (\overline{w'\theta'})_s dt$
	$h = C_R \frac{u_*}{f} \Phi, \Phi = \left(p\bar{u} + \sqrt{R + (p\bar{u})^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$ (一般情况)
Syrakov等(2015)	$h = L_N \varphi_*(\mu_*) = \frac{M}{C_{WS}} \frac{1}{1 + \left(\frac{a_1}{C_{WS}} \right) \mu_*}$ (忽略科里奥利效应, 稳定或中性层结)
	$\frac{u_*^4}{C_h K} + B_s a_1 - \frac{C_\varepsilon K^3}{h^4} - C_{WU} N^3 h^2 = 0$ (忽略科里奥利效应, 不稳定层结)
Vogelezang等(1996)	$Ri_B = \frac{g}{\theta} (z_1 - z_2) \frac{[\theta(z_1) - \theta(z_2)]}{[v(z_1) - v(z_2)]^2}$
理查森数形式 Melgarejo等(1974)	$Ri_{Bc} = \frac{1}{pr} \frac{h}{L} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - C}{\left[\ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - A \right]^2 + B^2}$
Vickers等(2004)	$Ri_{Bc} = 0.16(10^{-7} Ro)^{-0.18}, Ro = \frac{M_{10}}{f z_0}$
Richardson等(2013)	$Ri_{Bc} = a \frac{h}{L}$
国家标准GB/T 3840-1991	$h = \frac{a_s u_{10}}{f}$ (不稳定或中性层结); $h = b_s \sqrt{\frac{u_{10}}{f}}$ (稳定层结)
Nozaki(1973)	$h = \frac{121}{6} (6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(u_z + 0.257)}{12f \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$
其他 程水源等(1997)	$h = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^8 \left[(6 - P)_j (T - T_d)_j + \frac{0.169P_j (U_{zi} + 0.257)}{12f \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right] \times f(i, j)$

4.2 预报方程

边界层的演变是一个连续的大气运动过程,近地面层气象要素变化大,诊断的边界层高度并不能反映边界层连续发展的过程,因此使用预报方程更为合理。

4.2.1 对流边界层预报方程

(1) 热量平衡模式。该模式只考虑热力学作用,忽略湍流夹卷以及平流、辐射、潜热加热,认为地表向上输送的感热通量和大气吸收的热量相等,大气吸收的热量均用于混合层的抬升,由此确定混合层高度(Stull, 1988)。但该模式过于简单,只能进行粗略估计。

(2) 整体模式。又称为零阶模式、整层模式、跳跃模式、积分模式,该模式由 Ball(1960)提出,此后被不断完善(Lilly, 1968; Tennekes, 1973; Zeman, et al, 1977)。整体模式忽略了卷夹层厚度与近地面的超绝热层,假设混合层是均匀气层,位温、风速、比湿等平均量在混合层内为常值,在边界层顶跃变,通量在混合层中随高度线性变化,参数化混合层顶的热通量从而闭合方程组,得到混合层预报方程(Stull, 1988; 盛裴轩等, 2013)。该模式可以较好地预测混合层发展,计算结果与观测值符合程度较高。

(3) 一阶跃变模式。Deardorff(1979)在整体模式的基础上,考虑了夹卷层结构,发展出一阶跃变模式,为了使方程组闭合,不同研究对夹卷层厚度采用了不同的参数化方法(张霄琛等, 1990)。与整体模式相比,一阶跃变模式对混合层高度预报的准确性没有明显改善,但能够刻画夹卷层的特征,模拟的夹卷层厚度、位温跃变与实测更为相符。

(4) Batchvarova 等(1994)提出了一个适应于近中性和对流条件下的预报模型,该模型在 Batchvarova 等(1991)提出的零阶模型的基础上建立,结合了 Gryning 等(1994)提出的卷夹层厚度的参数化方案,应用中只需要摩擦速度、近地面湍流热通量和自由大气的位温梯度信息,若可以获取大尺度流场的水平辐散信息,该模型还可以考虑沉降的影响。

4.2.2 稳定边界层的预报方程

(1) Yamada(1979)基于热能方程,考虑了长波辐射造成的冷却效应,假设大气水平均一,地形平

坦,忽略水平、垂直输送项,根据观测拟合出当地稳定边界层位温廓线的经验表达式,用于简化模型,进而给出稳定边界层的预报方程。使用该预报方程时需要拟合符合当地的位温廓线表达式,重新建立适用于该地区的预报方程(刘畅等, 1985)。

(2) Nieuwstadt 等(1981)基于稳定边界层湍流动能的源汇项,用边界层中湍流动能的平均产生项和耗散项的比值定义了新的理查森数($\overline{Ri_t}$),把控制方程代入 $\overline{Ri_t}$ 的分子与分母,得到速率方程。该预报方程形式上为线性松弛方程,解趋于一个平衡值,平衡高度与大气边界层中的非地转风做功有关。弛豫过程的时间尺度大约从日落后持续 10 h,体现了稳定边界层变化缓慢的特点。但该方程仅能描述日落几小时后的稳定边界层,在大气状态极度非平稳的昼夜转换期并不适用。

(3) Zeman(1979)对动量方程积分,给出一种稳定边界层预报方程。该模型与 Brost-Wyngaard 模型有很好的 consistency,但需要某高度的风速与边界层平均风速差的资料,常规观测无法获得,因此应用受到限制。

(4) Gassmann 等(2001)基于热量守恒方程,提出了一个夜间稳定边界层预报模型。该模型需要地表冷却速率和地表垂直湍流运动热通量,适用于小风、较为晴朗的夜晚。

(5) Zilitinkevich 等(2002)考虑了稳定边界层上界的天气尺度垂直运动的影响,提出弛豫方程预报稳定边界层高度。在此基础上, Zilitinkevich 等(2002)增加了对次网格尺度的水平运动的考虑,并用修正的准稳定边界层平衡高度代替原公式中的平衡高度,进一步完善了稳定边界层高度的预报方程。

5 结论与展望

从大气湍流运动角度,大气边界层顶是湍流运动与非湍流运动的分界,边界层高度是反映这一界面位置的重要参量。但由于湍流参量的垂直分布获取困难,在实际应用中,多从反映湍流运动的热力作用、动力作用以及物质分布角度判定边界层高度。目前确定大气边界层高度的方法主要有两类:(1)基于观测的气象要素廓线分析确定边界层高度,(2)通过参数化的方法计算边界层高度。

实验观测方面,确定大气边界层高度的观测方法可以分为两类,即利用无线电探空、系留气球以

及气象铁塔、飞机等平台搭载传感器,直接观测获得温度、湿度、风速等气象要素或湍流、颗粒物廓线,从而确定边界层垂直结构;或利用遥感技术反演气象要素的垂直分布,其中,激光雷达、云高仪、微波辐射计、声雷达、风廓线雷达等地基遥感设备在边界层探测方面均得到广泛应用,卫星遥感发挥的作用也越来越大。直接观测获取的数据准确性更高,遥感技术实现了边界层连续观测,二者相辅相成,在边界层研究中不可或缺。但基于观测确定的边界层高度存在时空代表性问题,不同边界层高度的判定方法缺少系统性评估,同时缺乏确定边界层高度的统一标准规范,导致不同观测之间的可比性较低。

参数化方法只需输入少量数据,即可计算得出边界层高度,操作简便,在缺乏大气剖面观测的地方有较高的应用价值。总体来说,预报方程比诊断方程更能反映边界层的发展过程。白天边界层高度主要受地表热力湍流、机械湍流以及边界层顶的夹卷作用影响,综合考虑以上因素的预报方程可以较好地描述混合层的发展。而夜间的情况较为复杂,辐射冷却、重力波、冷泄流、惯性震荡、间歇性湍流等因素都会影响稳定边界层发展,稳定边界层的参数化准确性相对较低,需要通过加强边界层物理机制的理论研究,进而建立更为完善的参数化方案。

众所周知,湍流研究是世界性的科学难题。大气湍流理论是大气边界层研究的基础,大气边界层学科的发展离不开大气湍流研究的发展,离不开大气湍流的理论突破和方法创新。而大气湍流研究进展缓慢,极大制约了大气边界层领域的发展,也包括大气边界层高度的准确确定。为了准确确定大气边界层高度,今后需要对大气湍流理论、观测手段、分析方法等多方面进行突破。首先,应开展边界层加密观测,充分发挥遥感手段在对边界层连续观测中的优势,清晰认识不同遥感手段确定边界层高度的理论依据,给出明确的理论依据以及不同条件下的适用范围,例如利用颗粒物激光雷达确定边界层高度时,应明确区分物质聚集层与湍流意义下的边界层。其次,需要进一步提高反演技术,一方面要提高遥感手段反演的数据质量,加强遥感反演结果与传统观测结果间的对比分析,建立反演结果的修正方法;另一方面要对多种反演边界层高度

的算法进行综合评估与改进,逐步提高复杂大气条件下(如云、残余层)反演边界层高度的准确性。逐步建立不同观测手段的观测规范,建立不同方法确定边界层高度的操作规范,增强数据的可比性。此外,边界层高度的分析应综合多种观测手段、多种信息、多种方法,比如将传统手段与遥感方法配合,对遥感设备近地层盲区进行插补;从不同角度综合多种手段确定边界层高度,多种角度互为印证,例如 RASS 系统、激光雷达和微波辐射计的结合使用,可以弥补单一方法的不足与不确定性;地-气间的湍流交换与边界层发展密切相关,应把高空观测与地面的气象、湍流观测相结合,综合地面信息确定边界层高度;近年来小波分析、图像边缘检测技术、扩展卡尔曼滤波等数学工具在信号处理方面都有较好的表现,好的数学工具是助力,日后也要注重数学工具在确定边界层高度方面的应用。

参考文献

- 程水源,席德立,张宝宁等. 1997. 大气混合层高度的确定与计算方法研究. *中国环境科学*, 17(6): 512-516. Cheng S Y, Xi D L, Zhang B N, et al. 1997. Study on the determination and calculating method of atmospheric mixing layer height. *China Environ Sci*, 17(6): 512-516 (in Chinese)
- 高登义. 1994. 海气交换与海气边界层观测研究进展. *地球物理学进展*, 9(2): 111-118. Gao D Y. 1994. Advance in studying air/sea exchange and air/sea boundary layer observation. *Prog Geophys*, 9(2): 111-118 (in Chinese)
- 戈书睿. 2017. 风廓线雷达探测垂直气流和大气边界层高度方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学. Ge S R. 2017. Research on vertical air velocity and planetary boundary height detection by the wind profiler [D]. Changsha: National University of Defense Technology (in Chinese)
- 国家技术监督局, 国家环境保护局. 1991. GB/T 3840-1991 制定地方大气污染物排放标准的技术方法. 北京: 中国标准出版社. The State Bureau of Quality and Technical Supervision, State Environmental Protection Administration. 1991. GB/T 3840-1991 Technical Methods for Making Local Emission STANDARDS of Air Pollutants. Beijing: Standards Press of China (in Chinese)
- 胡明宝, 李妙英. 2010. 风廓线雷达的发展与现状. *气象科学*, 30(5): 724-729. Hu M B, Li M Y. 2010. The development and technologic status of wind profiling radar. *Scientia Meteor Sinica*, 30(5): 724-729 (in Chinese)
- 李倩惠, 张宏升, 鞠婷婷等. 2020. 华北北部半干旱地区夏季大气边界层特征实验研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 56(2): 215-222. Li Q H, Zhang H S, Ju T T, et al. 2020. Experimental research on the

- characteristics of the atmospheric boundary layer in the semi-arid north China. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 56(2): 215-222 (in Chinese)
- 李霞, 权建农, 王飞等. 2018. 激光雷达反演边界层高度方法评估及其在北京的应用. *大气科学*, 42(2): 435-446. Li X, Quan J N, Wang F, et al. 2018. Evaluation of the method for planetary boundary layer height retrieval by lidar and its application in Beijing. *Chinese J Atmos Sci*, 42(2): 435-446 (in Chinese)
- 刘畅, 李郁竹, 蒋瑞宾. 1985. 预报夜间地面逆温高度的一个简单模式. *气象*, 11(2): 31-33. Liu C, Li Y Z, Jiang R B. 1985. A simple model for predicting the inversion layer height in the stable boundary layer. *Meteor Mon*, 11(2): 31-33 (in Chinese)
- 刘红燕. 2011. 三年地基微波辐射计观测温度廓线的精度分析. *气象学报*, 69(4): 719-728. Liu H Y. 2011. The temperature profile comparison between the ground-based microwave radiometer and the other instrument for the recent three years. *Acta Meteor Sinica*, 69(4): 719-728 (in Chinese)
- 刘辉志, 王雷, 杜群. 2018. 大气边界层物理研究进展(2012-2017). *大气科学*, 42(4): 823-832. Liu H Z, Wang L, Du Q. 2018. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics (2012-2017). *Chinese J Atmos Sci*, 42(4): 823-832 (in Chinese)
- 刘建忠, 张嵩. 2010. 微波辐射计反演产品评价. *气象科技*, 38(3): 325-331. Liu J Z, Zhang Q. 2010. Evaluation and analysis of retrieval products of ground-based microwave radiometer. *Meteor Sci Technol*, 38(3): 325-331 (in Chinese)
- 沈建, 沈利洪, 韩笑等. 2017. 激光雷达与微波辐射计联合观测大气边界层高度变化. *气象科技*, 45(3): 425-429. Shen J, Shen L H, Han X, et al. 2017. Combined observation of boundary layer using lidar and microwave radiometer in Suzhou. *Meteor Sci Technol*, 45(3): 425-429 (in Chinese)
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 2013. 大气物理学. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 243-275. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. 2013. *Atmospheric Physics*. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 243-275 (in Chinese)
- 师宇, 胡非, 丁伟宸等. 2019. 气溶胶激光雷达和无线电探空观测边界层高度的对比分析. *气候与环境研究*, 24(5): 650-662. Shi Y, Hu F, Ding W C, et al. 2019. Comparative analysis of planetary-boundary-layer height based on aerosol lidar and radiosonde. *Climatic Environ Res*, 24(5): 650-662 (in Chinese)
- 宋星灼, 张宏升, 刘新建等. 2006. 青藏高原中部地区不稳定大气边界层高度的确定与分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 42(3): 328-333. Song X Z, Zhang H S, Liu X J, et al. 2006. Determination of atmospheric boundary layer height in unstable conditions over the middle Tibetan Plateau. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 42(3): 328-333 (in Chinese)
- 王琳, 谢晨波, 韩永等. 2012. 测量大气边界层高度的激光雷达数据反演方法研究. *大气与环境光学学报*, 7(4): 241-247. Wang L, Xie C B, Han Y, et al. 2012. Comparison of retrieval methods of planetary boundary layer height from lidar data. *J Atmos Environ Opt*, 7(4): 241-247 (in Chinese)
- 王信理, 熊文愈. 1993. 湍流运动与生态边界层厚度. *南京林业大学学报*, 17(1): 9-15. Wang X L, Xiong W Y. 1993. Turbulence and thickness of ecoboundary layer. *J Nanjing For Univ*, 17(1): 9-15 (in Chinese)
- 项衍, 叶擎昊, 刘建国等. 2016. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度. *中国激光*, 46(7): 0704003. Xiang Y, Ye Q H, Liu J G, et al. 2016. Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection. *Chinese J Lasers*, 46(7): 0704003 (in Chinese)
- 杨飞跃. 2018. 半干旱区边界层高度的确定方法比较及特征研究 [D]. 兰州: 兰州大学. Yang F Y. 2018. Comparison of determination methods and characteristics of boundary layer height in semi-arid area [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)
- 杨富燕, 张宁, 朱莲芳等. 2016. 基于激光雷达和微波辐射计观测确定混合层高度方法的比较. *高原气象*, 35(4): 1102-1111. Yang F Y, Zhang N, Zhu L F, et al. 2016. Comparison of the mixing layer height determination methods using lidar and microwave radiometer. *Plateau Meteor*, 35(4): 1102-1111 (in Chinese)
- 张霭琛, 孙成国, 田毅. 1990. 北京地区大气混合层的探测与预测模式的检验. *气象学报*, 48(3): 345-354. Zhang A C, Sun C G, Tian Y. 1990. The observing results of atmospheric mixed layer in Beijing district and the assessment of theoretical models. *Acta Meteor Sinica*, 48(3): 345-354 (in Chinese)
- 张强, 王胜. 2008. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征. *气象学报*, 66(4): 599-608. Zhang Q, Wang S. 2008. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in northwest China. *Acta Meteor Sinica*, 66(4): 599-608 (in Chinese)
- 张小曳, 徐祥德, 丁一汇等. 2019. 2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 PM_{2.5} 质量浓度下降的影响. *中国科学: 地球科学*, 50(4): 483-500. Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, et al. 2019. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China. *Sci China: Earth Sci*, 62(12): 1885-1902
- 赵鸣, 苗曼倩, 王彦昌. 1991. 边界层气象学教程. 北京: 气象出版社, 217-219. Zhao M, Miao M Q, Wang Y C. 1991. *Boundary-Layer Meteorology Course*. Beijing: China Meteorological Press, 217-219 (in Chinese)
- Angevine W M, White A B, Avery S K. 1994. Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler. *Bound Layer Meteor*, 68(4): 375-385
- Ao C O, Waliser D E, Chan S K, et al. 2012. Planetary boundary layer heights from GPS radio occultation refractivity and humidity profiles. *J Geophys Res: Atmos*, 117(D16): D16117
- Ball F K. 1960. Control of inversion height by surface heating. *Quart J Roy*

- Meteor Soc*, 86(370): 483-494
- Banta R M, Pichugina Y L, Brewer W A. 2006. Turbulent velocity-variance profiles in the stable boundary layer generated by a nocturnal low-level jet. *J Atmos Sci*, 63(11): 2700-2719
- Barlow J F, Dunbar T M, Nemitz E G, et al. 2011. Boundary layer dynamics over London, UK, as observed using Doppler lidar during REPARTEE-II. *Atmos Chem Phys*, 11(5): 2111-2125
- Batchvarova E, Gryning S E. 1991. Applied model for the growth of the daytime mixed layer. *Bound-Layer Meteor*, 56: 261-274
- Batchvarova E, Gryning S E. 1994. An applied model for the height of the daytime mixed layer and the entrainment zone. *Bound-Layer Meteor*, 71: 311-323
- Beyrich F. 1995. Mixing-height estimation in the convective boundary layer using sodar data. *Bound Layer Meteor*, 74(1-2): 1-18
- Beyrich F. 1997. Mixing height estimation from sodar data: A critical discussion. *Atmos Environ*, 31(23): 3941-3953
- Bravo-Aranda J A, Moreira G D A, Navas-Guzmán F J, et al. 2017. A new methodology for PBL height estimations based on lidar depolarization measurements: Analysis and comparison against MWR and WRF model-based results. *Atmos Chem Phys*, 17(11): 6839-6851
- Brost R A, Wyngaard J C. 1978. A model study of the stably stratified planetary boundary layer. *J Atmos Sci*, 35(8): 1427-1440
- Caicedo V, Rappenglück B, Lefer B, et al. 2017. Comparison of aerosol lidar retrieval methods for boundary layer height detection using ceilometer aerosol backscatter data. *Atmos Meas Tech*, 10(4): 1609-1622
- Casasanta G, Pietroni I, Petenko I, et al. 2014. Observed and modelled convective mixing-layer height at Dome C, Antarctica. *Bound-Layer Meteor*, 151: 597-608
- Chanin M L, Garnier A, Hauchecorne A, et al. 1989. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere. *Geophys Res Lett*, 16(11): 1273-1276
- Coen M C, Praz C, Haeffele A, et al. 2014. Determination and climatology of the planetary boundary layer height above the Swiss plateau by in situ and remote sensing measurements as well as by the COSMO-2 model. *Atmos Chem Phys*, 14(23): 13205-13221
- Cohn S A, Angevine W M. 2000. Boundary layer height and entrainment zone thickness measured by lidars and wind-profiling radars. *J Appl Meteor*, 39(8): 1233-1247
- Collis R T H, Fernald F G, Ligda M G H. 1964a. Laser radar echoes from a stratified clear atmosphere. *Nature*, 203(4951): 1274-1275
- Collis R T H, Ligda M G H. 1964b. Laser radar echoes from the clear atmosphere. *Nature*, 203(4944): 508
- Dai C, Wang Q, Kalogiros J A, et al. 2014. Determining boundary-layer height from aircraft measurements. *Bound Layer Meteor*, 152(3): 277-302
- Davis K J, Gamage N, Hagelberg C R, et al. 2000. An objective method for deriving atmospheric structure from airborne lidar observations. *J Atmos Oceanic Technol*, 17(11): 1455-1468
- Deardorff J W. 1979. Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure. *J Atmos Sci*, 36(3): 424-436
- Deng T, Wu D, Deng X J, et al. 2014. A vertical sounding of severe haze process in Guangzhou area. *Sci China: Earth Sci*, 57(11): 2650-2656
- Ding A J, Fu C B, Yang X Q, et al. 2013. Intense atmospheric pollution modifies weather: A case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in eastern China. *Atmos Chem Phys*, 13(20): 10545-10554
- Du C L, Liu S Y, Yu X, et al. 2013. Urban boundary layer height characteristics and relationship with particulate matter mass concentrations in Xi'an, central China. *Aerosol Air Qual Res*, 13(5): 1598-1607
- Emeis S, Türk M. 2004. Frequency distributions of the mixing height over an urban area from sodar data. *Meteor Z*, 13(5): 361-367
- Emeis S, Schäfer K. 2006. Remote sensing methods to investigate boundary-layer structures relevant to air pollution in cities. *Bound Layer Meteor*, 121(2): 377-385
- Emeis S, Schäfer K, Munkel C. 2008. Surface-based remote sensing of the mixing-layer height: A review. *Meteor Z*, 17(5): 621-630
- Eresmaa N, Karppinen A, Joffe S M, et al. 2006. Mixing height determination by ceilometer. *Atmos Chem Phys*, 6(6): 1485-1493
- Fairall C W. 1991. The humidity and temperature sensitivity of clear-air radars in the convective boundary layer. *J Appl Meteor*, 30(8): 1064-1074
- Fan S H, Gao Z Q, Kalogiros J, et al. 2019. Estimate of boundary-layer depth in Nanjing city using aerosol lidar data during 2016-2017 winter. *Atmos Environ*, 205: 67-77
- Flamant C, Pelon J, Flamant P H, et al. 1997. Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer. *Bound Layer Meteor*, 83(2): 247-284
- Friedrich K, Lundquist J K, Aitken M, et al. 2012. Stability and turbulence in the atmospheric boundary layer: A comparison of remote sensing and tower observations. *Geophys Res Lett*, 39(3): L03801
- Garratt J R. 1994. Review: The atmospheric boundary layer. *Earth-Sci Rev*, 37(1-2): 89-134
- Gassmann M I, Mazzeo N A. 2001. Nocturnal stable boundary layer height model and its application. *Atmos Res*, 57: 247-259
- Gryning S E, Batchvarova E. 1994. Parametrization of the depth of the entrainment zone above the daytime mixed layer. *Q J R Meteor Soc*, 120: 47-58
- Haefelin M, Angelini F, Morille Y, et al. 2012. Evaluation of mixing-height retrievals from automatic profiling lidars and ceilometers in view of future integrated networks in Europe. *Bound Layer Meteor*, 143(1): 49-75
- Gui K, Che H Z, Wang Y Q, et al. 2019. Satellite-derived PM_{2.5} concentration trends over eastern China from 1998 to 2016: Relationships to emissions and meteorological parameters. *Environ Pollut*, 247: 1125-1133

- Han B, Zhao C L, Lü S H, et al. 2015. A diagnostic analysis on the effect of the residual layer in convective boundary layer development near Mongolia using 20th century reanalysis data. *Adv Atmos Sci*, 32(6): 807-820
- He Q S, Mao J T, Chen J Y, et al. 2006. Observational and modeling studies of urban atmospheric boundary-layer height and its evolution mechanisms. *Atmos Environ*, 40(6): 1064-1077
- Hennemuth B, Lammert A. 2006. Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter. *Bound Layer Meteor*, 120(1): 181-200
- Hewison T J. 2006. Profiling temperature and humidity by ground-based microwave radiometers [D]. Berkshire: University of Reading
- Holzworth G C. 1964. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Mon Wea Rev*, 92(5): 235-242
- Hopper W P, Eloranta E W. 1986. Lidar measurements of wind in the planetary boundary layer: The method, accuracy and results from joint measurements with radiosonde and kytoon. *J Climate Appl Meteor*, 25(7): 990-1001
- Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. 2017. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015. *Bound Layer Meteor*, 162(3): 503-522
- Hyun Y K, Kim K E, Ha K J. 2005. A comparison of methods to estimate the height of stable boundary layer over a temperate grassland. *Agric For Meteor*, 132(1-2): 132-142
- Joffré S M, Kangas M, Heikinheimo M, et al. 2001. Variability of the stable and unstable atmospheric boundary-layer height and its scales over a boreal forest. *Bound Layer Meteor*, 99(3): 429-450
- Kallistratova M A, Petenko I V, Kouznetsov R D, et al. 2018. Sodar sounding of the atmospheric boundary layer: Review of studies at the Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. *Izv Atmos Ocean Phys*, 54(3): 242-256
- Khaykin S M, Hauchecorne A, Porteneuve J, et al. 2016. Ground-based Rayleigh-Mie Doppler lidar for wind measurements in the middle atmosphere. *EPJ Web Conf*, 119: 13005
- Kim D K, Lee D I. 2015. Atmospheric thickness and vertical structure properties in wintertime precipitation events from microwave radiometer, radiosonde and wind profiler observations. *Meteor Appl*, 22(3): 599-609
- Kitaigorodskii S A. 1960. On the computation of the thickness of the wind-mixing layer in the ocean. *Bull Acad Sci USSR Geophys Ser*, 3: 284-287
- Kitaigorodskii S A, Joffré S M. 1988. In search of a simple scaling for the height of the stratified atmospheric boundary layer. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, 40(5): 419-433
- Kosović B, Curry J A. 2000. A large eddy simulation study of a quasi-steady, stably stratified atmospheric boundary layer. *J Atmos Sci*, 57(8): 1052-1068
- Kotthaus S, Grimmond C S B. 2018. Atmospheric boundary-layer characteristics from ceilometer measurements. Part 1: A new method to track mixed layer height and classify clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(714): 1525-1538
- Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I, et al. 1996. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the global positioning system. *Science*, 271(5252): 1107-1110
- Lange D, Tiana-Alsina J, Saeed U, et al. 2014. Atmospheric boundary layer height monitoring using a Kalman filter and backscatter lidar returns. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 52(8): 4717-4728
- LeMone M A, Tewari M, Chen F, et al. 2014. Objectively determined fair-weather NBL features in ARW-WRF and their comparison to CASES-97 observations. *Mon Wea Rev*, 142(8): 2709-2732
- Lewis J R, Welton E J, Molod A M, et al. 2013. Improved boundary layer depth retrievals from MPLNET. *J Geophys Res: Atmos*, 118(17): 9870-9879
- Li H, Yang Y, Hu X M, et al. 2017. Evaluation of retrieval methods of daytime convective boundary layer height based on lidar data. *J Geophys Res: Atmos*, 122(8): 4578-4593
- Li Q H, Wu B G, Liu J L, et al. 2020. Characteristics of the atmospheric boundary layer and its relation with PM_{2.5} during haze episodes in winter in the North China Plain. *Atmos Environ*, 223: 117265
- Li Z Q, Guo J P, Ding A J, et al. 2017. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality. *Natl Sci Rev*, 4(6): 810-833
- Lilly D K. 1968. Models of cloud-topped mixed layers under a strong inversion. *Quart J Roy Meteor Soc*, 94(401): 292-309
- Liu B M, Ma Y Y, Gong W, et al. 2018. Determination of boundary layer top on the basis of the characteristics of atmospheric particles. *Atmos Environ*, 178: 140-147
- Liu S Y, Liang X Z. 2010. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. *J Climate*, 23(21): 5790-5809
- Liu X H, Ohtaki E. 1997. An independent method to determine the height of the mixed layer. *Bound Layer Meteor*, 85(3): 497-504
- Ma M J, Pu Z X, Wang S G, et al. 2011. Characteristics and numerical simulations of extremely large atmospheric boundary-layer heights over an arid region in north-west China. *Bound Layer Meteor*, 140(1): 163-176
- Mahrt L, Heald R C, Lenschow D H, et al. 1979. An observational study of the structure of the nocturnal boundary layer. *Bound Layer Meteor*, 17(2): 247-264
- Marshall J H, Parker D J, Grams C M, et al. 2008. Observations of mesoscale and boundary-layer scale circulations affecting dust transport and uplift over the Sahara. *Atmos Chem Phys*, 8(23): 6979-6993
- Melfi S H, Spinhirne J D, Chou S H, et al. 1985. Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean. *J Climate Appl Meteor*, 24(8): 806-821
- Melgarejo J W, Deardorff J W. 1974. Stability functions for the boundary-layer resistance laws based upon observed boundary-layer heights. *J Atmos Sci*, 31: 1324-1333
- Menut L, Flamant C, Pelon J, et al. 1999. Urban boundary-layer height determination from lidar measurements over the Paris area. *Appl Opt*, 38(6): 945-954
- Moreira G D A, Marques M T A, Nakaema W, et al. 2015. Planetary boundary layer height estimation from Doppler wind lidar measurements, radiosonde and hysplit model comparison. *Opt Pura Apl*, 48(3): 179-183

- Moreira G D A, Guerrero-Rascado J L, Bravo-Aranda J A, et al. 2018. Study of the planetary boundary layer by microwave radiometer, elastic Lidar and Doppler lidar estimations in Southern Iberian Peninsula. *Atmos Res*, 213: 185-195
- Münkel C, Räsänen J. 2004. New optical concept for commercial lidar ceilometers scanning the boundary layer//Proceedings Volume 5571, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere IX, Maspalomas, Canary Islands, Spain: SPIE, 5571: 364-374
- Nieuwstadt F T M. 1981. The steady-state height and resistance laws of the nocturnal boundary layer: Theory compared with cabauw observations. *Bound Layer Meteor*, 20(1): 3-17
- Nieuwstadt F T M, Tennekes H. 1981. A rate equation for the nocturnal boundary-layer height. *J Atmos Sci*, 38(7): 1418-1428
- Nozaki K Y. 1973. Mixing depth model using hourly surface observations. USAF Environmental Technical Applications Center, Report 7053
- O'Connor E J, Illingworth A J, Brooks I M, et al. 2010. A method for estimating the turbulent kinetic energy dissipation rate from a vertically pointing Doppler lidar, and independent evaluation from balloon-borne in situ measurements. *J Atmos Oceanic Technol*, 27(10): 1652-1664
- Pearson G, Davies F, Collier C. 2010. Remote sensing of the tropical rain forest boundary layer using pulsed Doppler lidar. *Atmos Chem Phys*, 10(13): 5891-5901
- Peng J, Grimmond C S B, Fu X S, et al. 2017. Ceilometer-based analysis of Shanghai's boundary layer height (under rain- and fog-free conditions). *J Atmos Oceanic Technol*, 34(4): 749-764
- Pollard R T, Rhines P B, Thompson R O R Y. 1973. The deepening of the wind-mixed layer. *Geophys Fluid Dyn*, 4(4): 381-404
- Polterra Y, Martucci G, Collaud Coen M, et al. 2017. PathfinderTURB: An automatic boundary layer algorithm. Development, validation and application to study the impact on in situ measurements at the Jungfraujoch. *Atmos Chem Phys*, 17(16): 10051-10070
- Qu Y W, Han Y, Wu Y H, et al. 2017. Study of PBLH and its correlation with particulate matter from one-year observation over Nanjing, Southeast China. *Remote Sens*, 9(7): 668
- Quan J N, Gao Y, Zhang Q, et al. 2013. Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations. *Particuology*, 11(1): 34-40
- Quan J N, Dou Y J, Zhao X J, et al. 2020. Regional atmospheric pollutant transport mechanisms over the North China Plain driven by topography and planetary boundary layer processes. *Atmos Environ*, 221: 117098
- Raman S, Templeman B, Templeman S, et al. 1990. Structure of the Indian southwesterly pre-monsoon and monsoon boundary layers: Observations and numerical simulation. *Atmos Environ*, 24(4): 723-734
- Ratnam M V, Basha S G. 2010. A robust method to determine global distribution of atmospheric boundary layer top from COSMIC GPS RO measurements. *Atmos Sci Lett*, 11(3): 216-222
- Ren Y, Zhang H S, Wei W, et al. 2019a. Effects of turbulence structure and urbanization on the heavy haze pollution process. *Atmos Chem Phys*, 19(2): 1041-1057
- Ren Y, Zhang H S, Wei W, et al. 2019b. A study on atmospheric turbulence structure and intermittency during heavy haze pollution in the Beijing area. *Science China Earth Science*, 62(12): 2058-2068
- Richardson H, Basu S, Holtslag A A M. 2013. Improving stable boundary-layer height estimation using a stability-dependent critical bulk Richardson number. *Bound-Layer Meteor*, 148: 93-109
- Rossby C G, Montgomery R B. 1935. The layer of frictional influence in wind and ocean currents//Massachusetts Institute of Technology, Woods Hole Oceanographic Institution. Papers in Physical Oceanography and Meteorology. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Woods Hole Oceanographic Institution, 3(3): 1-101
- Russell P B, Utne E E, Ludwig F L, et al. 1974. A comparison of atmospheric structure as observed with monostatic acoustic sounder and lidar techniques. *J Geophys Res: Atmos*, 79(36): 5555-5566
- Saeed U, Rocadenbosch F, Crewell S. 2016. Adaptive estimation of the stable boundary layer height using combined lidar and microwave radiometer observations. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 54(12): 6895-6906
- San José R, Casanova J. 1988. An empirical method to evaluate the height of the convective boundary layer by using small mast measurements. *Atmos Res*, 22: 265-273
- Saraiva L, Krusche N. 2013. Estimation of the boundary layer height in the southern region of Brazil. *American Journal of Environmental Engineering*, 3: 63-70
- Sawyer V, Li Z Q. 2013. Detection, variations and intercomparison of the planetary boundary layer depth from radiosonde, lidar and infrared spectrometer. *Atmos Environ*, 79: 518-528
- Schween J H, Hirsikko A, Löhnert U, et al. 2014. Mixing-layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: From case studies to long-term assessment. *Atmos Meas Tech*, 7(11): 3685-3704
- Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. 2000. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmos Environ*, 34(7): 1001-1027
- Seidel D J, Ao C O, Li K. 2010. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis. *J Geophys Res: Atmos*, 115(D16): D16113
- Shi Y, Hu F, Fan G Q, et al. 2019. Multiple technical observations of the atmospheric boundary layer structure of a red-alert haze episode in Beijing. *Atmos Meas Tech*, 12(9): 4887-4901
- Shi Y, Hu F, Xiao Z S, et al. 2020. Comparison of four different types of planetary boundary layer heights during a haze episode in Beijing. *Sci Total Environ*, 711: 134928
- Shukla K K, Phanikumar D V, Newsom R K, et al. 2014. Estimation of the mixing layer height over a high altitude site in Central Himalayan region by using Doppler Lidar. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 109: 48-53
- Sicard M, Perez C, Comeran A, et al. 2004. Determination of the mixing layer height from regular lidar measurements in the Barcelona area//Proceedings Volume 5235, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII, Barcelona: SPIE, 5235: 505-516
- Steenefeld G J, van de Wiel B J H, Holtslag A A M. 2007a. Diagnostic equations for the stable boundary layer height: Evaluation and dimensional analysis. *J Appl Meteor Climatol*, 46: 212-225

- Steenneveld G J, van de Wiel B J H, Holtslag A A M. 2007b. Comments on deriving the equilibrium height of the stable boundary layer. *Q J R Meteor Soc*, 133: 261-264
- Steyn D G, Baldi M, Hoff R M. 1999. The detection of mixed layer depth and entrainment zone thickness from Lidar backscatter profiles. *J Atmos Oceanic Technol*, 16(7): 953-959
- Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1-545
- Su T N, Li Z Q, Kahn R. 2020. A new method to retrieve the diurnal variability of planetary boundary layer height from lidar under different thermodynamic stability conditions. *Remote Sens Environ*, 237: 111519
- Syrakov E. 2015. General diagnostic equations and regime analysis for the height of the planetary boundary layer. *Q J R Meteor Soc*, 141: 2869-2879
- Tennekes H. 1973. A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. *J Atmos Sci*, 30(4): 558-567
- Tsaknakis G, Papayannis A D, Kokkalis P, et al. 2011. Inter-comparison of lidar and ceilometer retrievals for aerosol and planetary boundary layer profiling over Athens, Greece. *Atmos Meas Tech*, 4(6): 1261-1273
- Tucker S C, Senff C J, Weickmann A M, et al. 2009. Doppler lidar estimation of mixing height using turbulence, shear, and aerosol profiles. *J Atmos Oceanic Technol*, 26(4): 673-688
- Uthe E E. 1972. Lidar observations of the urban aerosol structure. *Bull Amer Meteor Soc*, 53(4): 358-360
- Vickers D, Mahrt L. 2004. Evaluating formulations of stable boundary layer height. *J Appl Meteor*, 43(11): 1736-1749
- Vogelezang D H P, Holtslag A A M. 1996. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations. *Bound Layer Meteor*, 81(3-4): 245-269
- Wang Z, Cao X, Zhang L, et al. 2012. Lidar measurement of planetary boundary layer height and comparison with microwave profiling radiometer observation. *Atmos Meas Tech*, 5(8): 1965-1972
- Wei W, Zhang H S, Cai X H, et al. 2020. Influence of intermittent turbulence on air pollution and its dispersion in winter 2016/2017 over Beijing, China. *J Meteor Res*, 34(1): 176-188
- White A B, Senff C J, Banta R M. 1999. A comparison of mixing depths observed by ground-based wind profilers and an airborne Lidar. *J Atmos Oceanic Technol*, 16(5): 584-590
- Xu G R, Ware W, Zhang W G, et al. 2014. Effect of off-zenith observations on reducing the impact of precipitation on ground-based microwave radiometer measurement accuracy. *Atmos Res*, 140-141: 85-94
- Xu G R, Xi B K, Zhang W G, et al. 2015. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings. *J Geophys Res: Atmos*, 120(19): 10313-10323
- Yamada T. 1976. On the similarity functions *A*, *B* and *C* of the planetary boundary layer. *J Atmos Sci*, 33(5): 781-793
- Yamada T. 1979. Prediction of the nocturnal surface inversion height. *J Appl Meteor*, 18(4): 526-531
- Yang T, Wang Z F, Zhang W, et al. 2017. Technical note: Boundary layer height determination from lidar for improving air pollution episode modeling: Development of new algorithm and evaluation. *Atmos Chem Phys*, 17(10): 6215-6225
- Yin J, Gao C Y, Hong J, et al. 2019. Surface meteorological conditions and boundary layer height variations during an air pollution episode in Nanjing, China. *J Geophys Res: Atmos*, 124(6): 3350-3364
- Zeman O, Tennekes H. 1977. Parameterization of the turbulent energy budget at the top of the daytime atmospheric boundary layer. *J Atmos Sci*, 34(1): 111-123
- Zhang Q, Zhang J, Qiao J, et al. 2011. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic processes at the land surface in arid regions of China. *Sci China: Earth Sci*, 54(10): 1586-1594
- Zeman O. 1979. Parameterization of the dynamics of stable boundary layers and nocturnal jets. *J Atmos Sci*, 36(5): 792-804
- Zhao H J, Che H Z, Xia X G, et al. 2019. Climatology of mixing layer height in China based on multi-year meteorological data from 2000 to 2013. *Atmos Environ*, 213: 90-103
- Zhao L, Han B, Lv S H, et al. 2018. The different influence of the residual layer on the development of the summer convective boundary layer in two deserts in northwest China. *Theor Appl Climatol*, 131(3): 877-888
- Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. 2017. 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 Meteor Res*, 31(5): 809-819
- Zhong J T, Zhang X Y, Dong Y S, et al. 2018. Feedback effects of boundary-layer meteorological factors on cumulative explosive growth of PM_{2.5} during winter heavy pollution episodes in Beijing from 2013 to 2016. *Atmos Chem Phys*, 18(1): 247-258
- Zilitinkevich S, Mironov D V. 1996. A multi-limit formulation for the equilibrium depth of a stably stratified boundary layer. *Bound Layer Meteor*, 81(3-4): 325-351
- Zilitinkevich S, Baklanov A. 2002a. Calculation of the height of the stable boundary layer in practical applications. *Bound Layer Meteor*, 105(3): 389-409
- Zilitinkevich S, Baklanov A, Rost J, et al. 2002b. Diagnostic and prognostic equations for the depth of the stably stratified Ekman boundary layer. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128(579): 25-46
- Zilitinkevich S, Esau I, Baklanov A. 2007. Further comments on the equilibrium height of neutral and stable planetary boundary layers. *Q J R Meteor Soc*, 133: 265-271
- Zilitinkevich S S. 1972. On the determination of the height of the Ekman boundary layer. *Bound Layer Meteor*, 3(2): 141-145
- Zou J, Sun J N, Ding A J, et al. 2017. Observation-based estimation of aerosol-induced reduction of planetary boundary layer height. *Adv Atmos Sci*, 34(9): 1057-1068