

天基、地基资料反演边界层高度比较

李红, 杨毅, 党蕊君

兰州大学大气科学学院甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000

摘要 以兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)为研究站点,利用该站微波辐射计资料、地基微脉冲激光雷达资料以及对应的星载 CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)激光雷达(天基)资料反演边界层高度。微波辐射计温度资料采用气块法,微脉冲激光雷达后向散射信号资料采用曲线拟合法和小波变换法(Haar 小波变换法与 Mexican Hat 小波变换法),CALIPSO Level 1 散射廓线采用最大方差法与 Mexican Hat 小波变换法,同时利用 Level 2 气溶胶层产品获得边界层高度。相比于应用于微脉冲激光雷达资料,小波变换法在应用于 CALIPSO Level 1 资料时对小波振幅的初值更加敏感。对比三种资料反演的边界层高度,微波辐射计资料与微脉冲激光雷达资料的结果更加相近,且显示出明显的季节变化,夏季达到最大值,这也与 CALIPSO Level 2 的结果一致。但是利用 CALIPSO Level 1 资料得到的边界层高度随季节的变化不明显。

关键词 遥感; 边界层高度; 激光雷达; 微波辐射计

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.062801

Comparison of Boundary Layer Heights Retrieved by Space-Based and Ground-Based Data

Li Hong, Yang Yi, Dang Ruijun

Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract This study aims to calculate the boundary layer height retrieved by ground-based micro-pulse lidar data, microwave radiometer data and lidar data (space-based) of corresponding space-borne CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) from the semi-arid climate observatory and laboratory of Lanzhou University (SACOL). Microwave radiometer data with parcel method, micro-pulse lidar backscatter data with curve fitting method and wavelet transform method (Haar wavelet transform method and Mexican Hat wavelet transform method), CALIPSO Level 1 scattering profile with maximum variance method and Mexican Hat wavelet transform method, and Level 2 aerosol layer product are used to calculate boundary layer height. When the wavelet transform method is used, the boundary layer height retrieved from CALIPSO Level 1 data is more sensitive to the initial value of wavelet amplitude than that from micro-pulse lidar data. For the retrieved boundary layer height, microwave radiometer data and micro-pulse lidar data are very close. The result shows apparent seasonal variation, and the boundary layer height reaches its maximum in summer. Which is the same as the retrieved result of CALIPSO Level 2 product. But the seasonal variation in boundary layer height retrieved by CALIPSO Level 1 data is not apparent.

Key words remote sensing; boundary layer height; lidar; microwave radiometer

OCIS codes 280.5600; 010.0280; 010.3640; 010.1110

收稿日期: 2017-01-19; **收到修改稿日期:** 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(41375109)

作者简介: 李红(1992—),女,硕士研究生,主要从事边界层高度反演方面的研究。E-mail: lih2010@lzu.edu.cn

导师简介: 杨毅(1980—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事资料同化、多普勒雷达资料反演和中小尺度数值模拟方面的研究。E-mail: yangyi@lzu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

大气边界层,又称为行星边界层,是直接受地表影响的大气最底层气层,通过湍流输送实现地面与大气之间的动量、热量以及水汽的交换,响应地表作用的时间在1 h以内^[1]。自由对流时,上下空气强烈混合,使物理属性在除近地层以外的区域上下趋于均匀化,当对流强烈发展时,这一均匀混合层可延伸至1~2 km,混合层之上就是一个稳定层,物理属性在均匀混合层与稳定层的交界处发生跃变。边界层内的物理过程直接影响了人类的生活和生产活动,因此对边界层的高度分布研究具有重要的现实意义^[1-2]。边界层高度(BLH)表征污染物在垂直方向可以被热力湍流稀释的范围^[3],且与大气的热力变量显示明显相关^[4],在空气污染模式以及数值模式中是一个重要的参数,在气候模式中也常被用来诊断模式中的物理与动力包是否准确^[5-6]。

利用地面资料计算边界层高度近年来逐步发展成熟,其中激光雷达可实现对对流层大气的实时监测^[7-9],其对大气气溶胶的连续监测可实现对对流边界层(CBL)高度的反演计算,但不同的反演算法可能得到不同的边界层高度^[10-11]。此外,微波辐射计作为一种被动遥感工具,接收大气在微波波段发射的电磁辐射从而获得连续的温度、相对湿度、水汽等垂直廓线。利用温度廓线资料再采用气块法(PM)可获得边界层高度。CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)卫星搭载的激光雷达可以以一定的周期实现对大气气溶胶的大范围观测^[12],从而实现大范围内边界层高度的反演。Jordan等^[5]首次在全球尺度比较了美国国家航天航空局(NASA)使用的第五代Goddard地球观测系统(GEOS-5)的模式输出边界层高度和由CALIPSO卫星资料得到的边界层高度;之后McGrath-Spangler等^[13]以及Liu等^[14]也针对不同的区域做了相似的研究。也有研究选取个例^[14-16]比较地基、天基资料得到的边界层高度,以验证CALIPSO卫星的结果。

由于不同的观测仪器测量了不同的大气参数以及考虑到观测的不确定性,不同类型的观测资料可能得到不同的边界层结构。同时,对同种观测资料采用不同的反演算法可能产生不同的边界层高度。基于此,本文将分别利用地基激光雷达、微波辐射计资料以及天基激光雷达资料采用不同的方法反演得到边界层高度,比较不同方法在同种资料下的反演差异。其次,比较不同资料反演得到的边界层高度的异同,尤其比较由地基资料反演的边界层高度与天基资料得到的边界层高度。

2 资料说明

CALIPSO卫星是NASA下午星系列的一颗太阳同步极轨卫星,卫星轨道高度为705 km。CALIPSO卫星包括:正交极化的云-气溶胶雷达(CALIOP)、红外成像辐射仪(IIR)、宽视角相机(WFC)。CALIOP能扩展地基激光雷达的覆盖范围,提供全球不同地区、不同地表的观测数据,并具有很高的时空分辨率和覆盖范围,平均16天为一个周期。CALIPSO卫星提供最详细、准确的云及气溶胶的性质,可探测并描述光学厚度小于等于0.01的弱气溶胶层与薄云^[17]。本研究用到的Level 1消光系数资料垂直方向0~8 km以内分辨率为30 m,水平分辨率为0.33 km^[18],Level 2气溶胶层产品提供存在的气溶胶层的顶高和底高,水平分辨率为5 km。

本文的研究站点为兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL),站点地理位置为(35.94°N, 104.137°E),该站设有微波辐射计(TP/WVP3000型)^[19]和微脉冲激光雷达(MPL-4型)^[20],微波辐射计提供地面至高空10 km的温度廓线,其中1 km以下的分辨率为100 m,1~10 km的分辨率为250 m。微脉冲激光雷达提供地面至高空20多千米的归一化后向散射信号(NRB)廓线,垂直分辨率为75 m(2007年和2008年)或30 m(2009年和2010年)。

CALIPSO卫星作为一颗下午星,经过SACOL站时的当地时间为14:23左右,综合考虑到地基资料的时间覆盖区,下载CALIPSO卫星2007年4月~2008年12月以及2009年9月~2010年12月的Level 1B 532 nm总体消光系数数据与Level 2气溶胶层数据,每16天得到一条消光系数廓线。同理,微波辐射计温度廓线与地基激光雷达后向散射系数廓线也是16天取一条,且取当地时间14:23的,但对14:23时刻前后各5 min的地基雷达后向散射信号进行平均来增加信噪比将廓线在垂直方向进行拉格朗日线性插值使垂直

分辨率为 15 m。同样地, CALIPSO Level 1B 532 nm 总体消光系数廓线在水平范围内取 17 km 的滑动平均来增大信噪比^[13], 并进行地形高度订正^[17]; 经过上述筛选, 得到 CALIPSO Level 1 总体消光系数廓线共 65 条, 可用于反演边界层高度的 Level 2 气溶胶层产品共 35 天。可用地基激光雷达后向散射系数廓线共 24 条, 微波辐射计温度廓线 34 条。选取的不同资料的时间分布表如表 1 所示。

表 1 不同资料可用的时间分布表

Table 1 Available time distribution for different data

Month	Microwave radiometer data	Ground-based lidar data	CALIPSO Level 1 532 nm total attenuated backscatter data	CALIPSO Level 2 aerosol layer product
January	4	2	4	3
February	3	1	3	1
March	3	1	4	2
April	1	2	5	4
May	3	3	6	2
June	2	3	5	5
July	1	1	5	2
August	1	2	5	5
September	4	0	8	4
October	4	0	8	3
November	5	4	7	2
December	3	5	5	2
Total	34	24	65	35

3 不同资料不同反演方法得到的边界层高度比较

3.1 微波辐射计温度廓线

微波辐射计作为一种被动遥感工具, 可以接收大气在微波波段发射的电磁辐射从而获得连续的温度、相对湿度、水汽等垂直廓线。其中, 利用温度廓线资料并采用气块法可以获得边界层高度^[21]。利用气块法获得边界层高度是以寻找上覆逆温层作为估计湍流所到达的高度为依据的。

如果大气温度的垂直分布是已知的, 那么气块法总是被认为是白天对流边界层高度反演的最佳方法。气块法^[21-22]定义边界层高度为: 具有环境地表温度的气块由于对流运动从地面干绝热上升到达的高度, 也就是层结曲线与干绝热线(从地表温度出发)的交点。如图 1(温度廓线是利用微波辐射计在 SACOL 站于 2007 年 6 月 30 日当地时间 14:23 观测得到的)所示, 2007 年 6 月 30 日 SACOL 站在当地时间 14:23 的温度廓线与干绝热线相交于 1.83 km 的高度, 则该高度被认为是边界层高度。

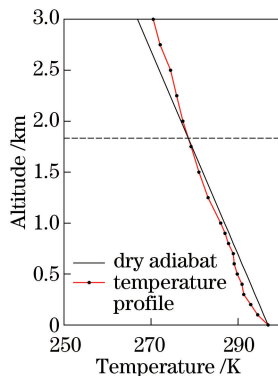


图 1 基于温度廓线反演边界层高度

Fig. 1 Retrieved boundary layer height based on temperature profile

利用气块法反演得到 34 天的边界层高度, 结果如图 2 所示, 图中第 1~7 天为春季天数, 第 8~11 天为夏季天数, 第 12~24 天为秋季天数, 第 25~34 天为冬季天数。可见由气块法反演的边界层高度大多在

0.3~0.9 km 之间,若按照春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12~2月)划分,那么各季节由气块法得到的平均边界层高度为春季 0.74 km,夏季 1.01 km,秋季 0.48 km,冬季 0.51 km。夏季边界层高度最高,而秋季、冬季边界层高度较低。

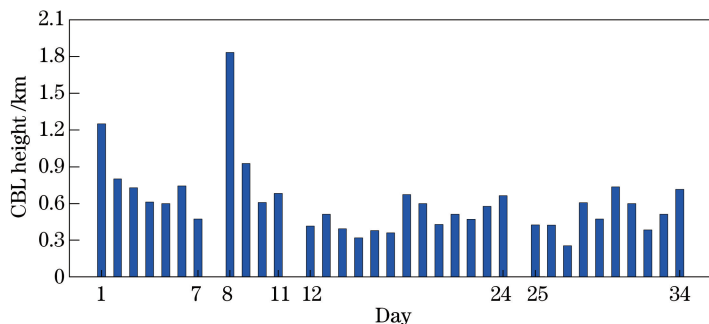


图 2 采用气块法反演得到的 34 天的边界层高度

Fig. 2 Obtained BLHs retrieved by PM for 34 days

3.2 地基激光雷达 NRB 系数廓线

通常在对流情况下,边界层内气层是强不稳定层结,大气边界层与上部自由大气的交界处存在一个逆温层。此时的大气边界层又被称为对流边界层,它的主要结构分为三个部分,从下往上依次为近地层、混合层及夹卷层。逆温层的存在使大量气溶胶粒子被束缚在逆温层以下的边界层内。而在混合层,由于白天强烈的湍流混合作用,气溶胶粒子在垂直方向尽可能混合均匀,浓度接近于常数。综合作用的结果导致气溶胶浓度在边界层顶至自由大气的过渡处突然减小,反映在激光雷达散射回波信号上就是信号的快速衰减^[23],由气溶胶的这一特性可以得到边界层高度^[24-27]。

3.2.1 梯度法

梯度法(GM)是依据激光雷达 NRB 信号 $B_0(z)$ 的衰减快慢定义的,最早由 Hayden 等^[28]于 1997 年提出,定义梯度为

$$g(z) = \frac{dB_0(z)}{dz}, \quad (1)$$

式中 dz 为资料的垂直分辨率,梯度 $g(z)$ 表征了在高度 z 处信号衰减的快慢, $g(z)$ 越小,表示信号衰减得越快。由于边界层顶过渡到自由大气时,气溶胶粒子的浓度存在突然减小,对应 $B_0(z)$ 衰减最快,即 $g(z)$ 取得最小值,为边界层高度。该方法的示例如图 3(a)和(b)所示。图 3(a)为 2007 年 5 月 13 日当地时间 14:23 SACOL 站的激光雷达信号图,图 3(b)为对应的梯度廓线,通过梯度法得到的边界层高度为 1.725 km。

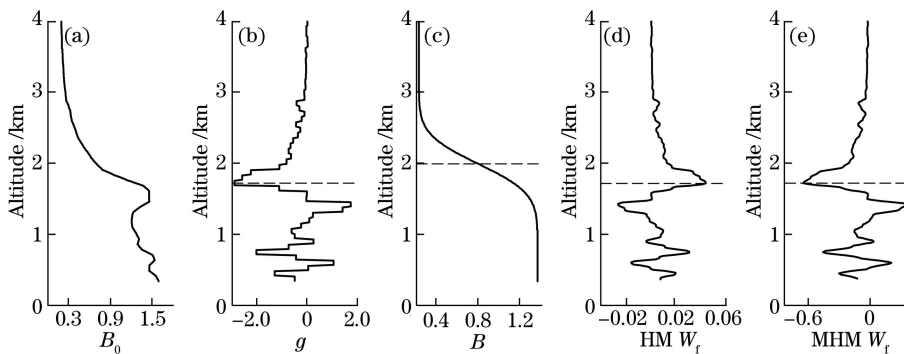


图 3 (a) SACOL 站 2007 年 5 月 13 日当地时间 14:23 的地基激光雷达 NRB 信号图;(b)利用梯度法获得边界层高度;

(c)利用曲线拟合法获得边界层高度;(d)利用 HM 法获得边界层高度;(e)利用 MHM 法获得边界层高度

Fig. 3 (a) Ground-based lidar NRB signal at SACOL on May 13, 2007 local time 14:23; (b) BLH obtained by using GM;

(c) BLH obtained by using curve fitting method; (d) BLH obtained by using HM method; (e) BLH obtained by using MHM method

3.2.2 曲线拟合法

曲线拟合法^[25]求解边界层高度的原理是构建理想曲线 $B(z)$,使其无限逼近实际廓线 $B_0(z)$ 。理想曲

线表达形式为

$$B(z) = \frac{B_m + B_u}{2} - \frac{B_m - B_u}{2} f_{er}\left(\frac{z - z_m}{s}\right), \quad (2)$$

式中 z 为垂直高度, B_m 为混合层内的后向散射信号的平均值, B_u 为夹卷层顶以上自由大气后向散射信号的平均值, s 是与夹卷层厚度有关的量, 本研究采用夹卷层厚度 $T_{EZ} = 2.77$ s 的假设, z_m 为待反演的边界层高度; $f_{er}(a)$ 为误差函数, 其定义为

$$f_{er}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a \exp(-y^2) dy. \quad (3)$$

计算时, 首先给出 z_m 和 s 的初始猜测值, 然后利用模拟退火下降算法得到多组不同的 z_m 和 s 。最终将使 $\sum [B(z) - B_0(z)]^2$ 最小的 z_m 视为实际边界层高度。该方法的示例如图 3(c) 所示, 由拟合法对图 3(a) 中的廓线处理得到的边界层高度为 1.994 km。

3.2.3 小波协方差变换法

小波协方差变换法是通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度的细化分析, 突出信号在时间和频率方面的某些特征。由于后向散射信号在边界层顶至自由大气的过渡区突然递减, 该性质类似于 Haar 小波函数的阶跃性质, 因此可对 NRB 信号廓线 $B_0(z)$ 进行 Haar 小波变换(HM)^[26,29-30]; 此外, 信号在边界层顶的强衰减对应着梯度廓线上的最小值点, 表现为一个突出点, 而 Mexican Hat 小波分析具有诊断突变点的能力, 因此采用 Mexican Hat 函数对后向散射梯度廓线 $g(z)$ 进行 Mexican Hat 小波变换(MHM)^[31]。

小波协方差变换函数(小波系数) $W_f(\Delta h, z_m)$ 的表达式为

$$W_f(\Delta h, z_m) = \frac{1}{\Delta h} \int_{z_b}^{z_t} f(z) \varphi\left(\frac{z - z_m}{\Delta h}\right) dz, \quad (4)$$

式中 z_b 和 z_t 分别为垂直积分的下限和上限; Δh 表示小波函数的振幅, 在边界层高度的反演中, 该变量的实际物理意义为夹卷层的厚度, 取值为 $2dz, 4dz, 6dz, \dots$; z_m 为小波函数的中心位置(位移因子), 此处即为边界层高度所在位置; $f(z)$ 为一可积目标函数, 对于 HM, $f(z)$ 为后向散射信号 $B_0(z)$, 对于 MHM, $f(z)$ 为 $g(z)$; $\varphi[(z - z_m)/\Delta h]$ 为小波母函数, 也就是本研究中用到的 Haar 及 Mexican Hat 两种小波母函数。

其中 Haar 小波函数定义为

$$\varphi\left(\frac{z - z_m}{\Delta h}\right) = \begin{cases} 1, & z_m - \frac{\Delta h}{2} \leq z \leq z_m \\ -1, & z_m \leq z \leq z_m + \frac{\Delta h}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

对 $B_0(z)$ 进行 HM, (4) 式小波系数 W_f 的大小表征了两者的相似程度, W_f 取得最大值时的 z_m 就认为是边界层高度。

Mexican Hat 小波母函数定义为

$$\psi\left(\frac{z - z_m}{\Delta h}\right) = \left[1 - \left(\frac{z - z_m}{\Delta h}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - z_m}{\Delta h}\right)^2\right], \quad (6)$$

对 $g(z)$ 进行 MHM, 在信号衰减最快的高度[也就是 $g(z)$ 取得最小值的高度], W_f 也取得最小值, 此时的 z_m 即为边界层高度。对于图 3(a) 的 NRB 信号廓线, 图 3(d) 黑色实线为 $a = 4dz$ 时对应的 Haar 小波系数, 以及由 HM 法得到的边界层高度 1.7175 km(黑色虚线); 图 3(e) 黑色实线为 $a = 4dz$ 时, 对应的 Mexican Hat 小波系数, 以及由 MHM 法得到的边界层高度 1.725 km(黑色虚线)。图 3(d)、(e) 分别说明了 HM 法与 MHM 法获取边界层高度的原理。从图 3(d) 可以看出, Haar 小波系数大致在信号衰减最快的高度(图中梯度值最小的高度)处取得小波系数的最大值。而 Mexican Hat 小波系数的最小值也出现在梯度值最小的高度处。

利用上述三种方法对选取的地基激光雷达 24 天的 NRB 廓线反演得到边界层高度。值得注意的是, 利用 NRB 系数廓线反演边界层高度时, 前提是晴天无云情形。当有云存在时, 云层内增强的湍流与云内冰水

粒子的强散射作用会造成激光雷达散射信号的局地大值,这将导致边界层高度的误判^[32-33]。因此对选择的24天廓线高层有云层干扰的情况,都人为限制在云层以下反演边界层高度。经过上述限制后反演的边界层高度结果如图4所示,其中HM法与MHM法只给出小波振幅 $\Delta h = 4dz$ 的结果。图4中,第1~6天为春季天数,第7~12天为夏季天数,第13~16天为秋季天数,第17~24天为冬季天数。从图4中可以看出,多数情况下,曲线拟合法反演的边界层高度高于小波变换法反演的结果,而两种小波变换法得到的边界层高度往往相差不大,且与由梯度法得到的边界层高度比较吻合。

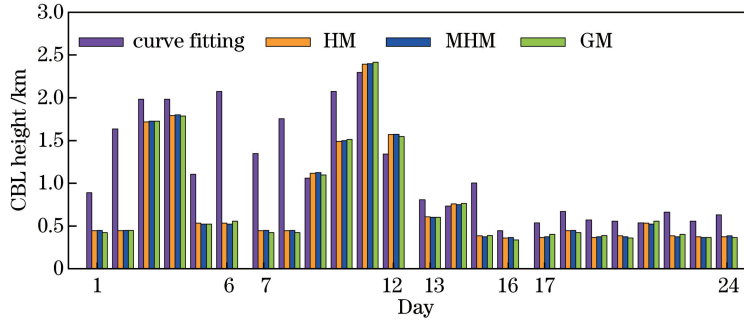


图4 曲线拟合法、HM法、MHM法和梯度法反演得到的24天边界层高度

Fig. 4 Retrieved BLHs obtained by the curve fitting method, HM, MHM and GM for 24 days

分别计算三种方法在4个季节得到的平均边界层高度,由曲线拟合法获取的边界层高度的四季变化为:春季1.61 km,夏季1.65 km,秋季0.746 km,冬季0.590 km。由HM法获取的边界层高度的四季变化为:春季0.91 km,夏季1.24 km,秋季0.53 km,冬季0.40 km。由MHM法获取的边界层高度的四季变化为:春季0.91 km,夏季1.25 km,秋季0.52 km,冬季0.41 km。由梯度法获取的边界层高度的四季变化为:春季0.91 km,夏季1.24 km,秋季0.53 km,冬季0.41 km。可以看到,利用三种方法获得的边界层高度均呈现出明显的季节特征:夏季边界层高度取得最大值,这揭示了太阳入射辐射对湍流运动提供了能量;而冬季边界层高度取得最小值,春季边界层高度高于秋季边界层高度。

考虑到HM与MHM两种小波变换法在算法实现时需要给定初始小波振幅 Δh ,所以分别设定 $\Delta h = 2dz, 4dz, 6dz, \dots, 20dz$ 共10组不同的 Δh ,考察初值对两种小波变换法反演结果的影响,结果如图5所示。可以看出无论是哪种小波变换法,不同的初值 Δh 会对结果造成一定的影响,但是影响不是很明显,这可能与地基激光雷达获得的后向散射信号廓线自身信噪比较高有关,另外,也在求解过程中对高层有云层干扰的廓线进行了限制有关。

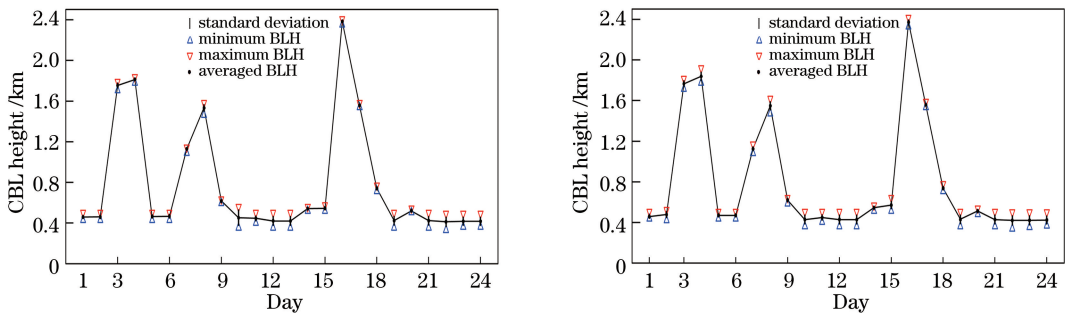


图5 不同 Δh 初值情况下,(a) HM法和(b) MHM法反演得到的边界层高度

Fig. 5 Retrieved BLHs obtained by (a) HM method and (b) MHM method with different initial values of Δh

3.3 CALIPSO 天基激光雷达资料

利用CALIPSO Level 1 532 nm 消光系数廓线反演边界层高度的原理与地基激光雷达的反演原理相同,通过寻找信号突减的高度作为边界层高度。信号的突变有较大的方差,Mexican Hat小波具有诊断突变的能力,因此利用最大方差(VM)法与MHM法可以分别反演边界层高度。

考虑到Level 1信号信噪比较低,本研究同时利用Level 2气溶胶层产品反演边界层高度,该方法是

将最低气溶胶层的层顶作为边界层高度,具体参见 Leventidou 等^[15]对该方法的介绍。

3.3.1 VM 法

VM 法^[23]是利用一定高度范围内总体消光系数 $\beta(z)$ 的离散程度来提取大气边界层高度的。定义信号在某一高度的方差 $s^2(z)$

$$S^2(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\beta(z) - \bar{\beta})^2, \quad (7)$$

式中 $\bar{\beta}$ 为这 n 个点消光系数的平均值对于对流边界层情况,取信号变化最剧烈(也就是信号方差最大)的高度作为边界层高度。方差的点数 n 会影响求解的边界层高度结果。选取 2007 年 8 月 1 日 SACOL 站对应的当地时间 14:23 的 CALIPSO 532 nm 总体消光系数廓线[图 6(a)],对该廓线计算方差分布,结果如图 6(c)所示,方差最大的高度 0.603 km 即为边界层高度。

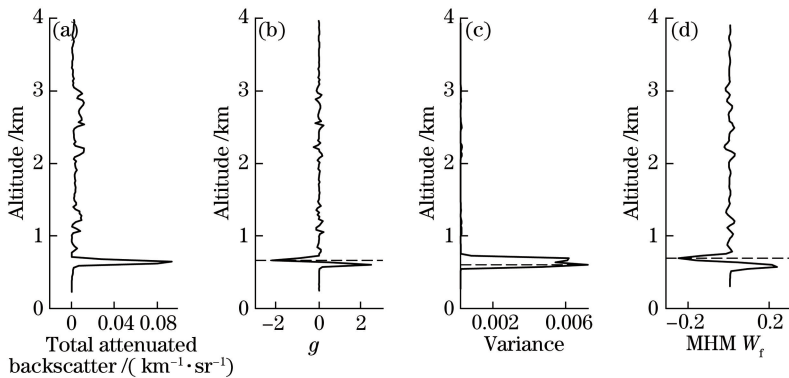


图 6 (a) 2007 年 8 月 1 日当地时间 14:23 的 CALIPSO 532 nm 总体消光系数廓线;(b)梯度廓线;

(c) $n=4$ 时对应的方差分布图;(d) $a=4dz$ 时对应的 Mexican Hat 小波系数廓线

Fig. 6 (a) Vertical profile of CALIPSO 532 nm total attenuated backscatter measured on Aug. 1, 2007 local time 14:23;

(b) gradient profile; (c) variance distribution diagram while $n=4$; (d) Mexican Hat wavelet coefficient profile while $a=4dz$

3.3.2 MHM 法

与地基激光雷达 NRB 廓线相似,CALIPSO 总体消光系数在边界层顶处也有强衰减,对应梯度值的最小值,因此可将 Mexican Hat 小波母函数应用于总体消光系数的梯度廓线提取边界层高度。图 6(a)为 2007 年 8 月 1 日当地时间 14:23 的 CALIPSO 532 nm 总体消光系数廓线;图 6(b)为总体消光系数廓线对应的梯度廓线(g),黑色虚线为利用梯度法获得的边界层高度 0.663 km;图 6(c)为 $n=4$ 时对应的方差分布图,黑色虚线为利用 VM 法得到的边界层高度 0.603 km;图 6(d)为 $a=4dz$ 时对应的 Mexican Hat 小波系数廓线,黑色虚线为利用 MHM 法得到的边界层高度 0.693 km。

由 CALIPSO Level 1 65 天资料得到的边界层高度如图 7 所示,其中图 7 (a)为春夏季节的结果(第 1~15 天为春季,16~30 天为夏季),图 7(b)为秋冬季节的结果(第 31~53 天为秋季,54~65 天为冬季)。其中,VM 法取 $n=4$,MHM 法取小波振幅 $\Delta h = 4dz$ 。大多数情况下,由两种方法得到的边界层高度在 1 km 以下,而且 MHM 法得到的边界层高度往往稍高于 VM 法的结果。对于一些边界层高度比较高的情况,可能是由于当天信号的信噪比很低,高层云层或气溶胶平流层的存在影响了边界层高度的提取。两种方法得到的边界层高度的季节平均分布分别为,VM 法:春季 0.8095514 km,夏季 0.6588625 km,秋季 1.355885 km,冬季 1.530577 km;MHM 法:春季 1.227551 km,夏季 0.7008627 km,秋季 1.384580 km,冬季 1.748076 km。剔除边界层高度特别高的结果后,VM 法:春季 0.6454431 km,夏季 0.6807977 km,秋季 0.7431272 km,冬季 0.7790128 km;MHM 法:春季 0.7272614 km,夏季 0.7207977 km,秋季 0.7711273 km,冬季 0.8090126 km。可以看出,不同于地基资料得到的边界层高度,由 CALIPSO Level 1 资料反演的边界层高度随季节的变化不明显。

同理,利用 CALIPSO Level 2 气溶胶层数据反演得到的边界层高度结果如图 8 所示。由此法得到的边界层高度的季节平均变化为:春季 1.73 km,夏季 1.77 km,秋季 0.87 km,冬季 0.85 km,这与由地基资料得

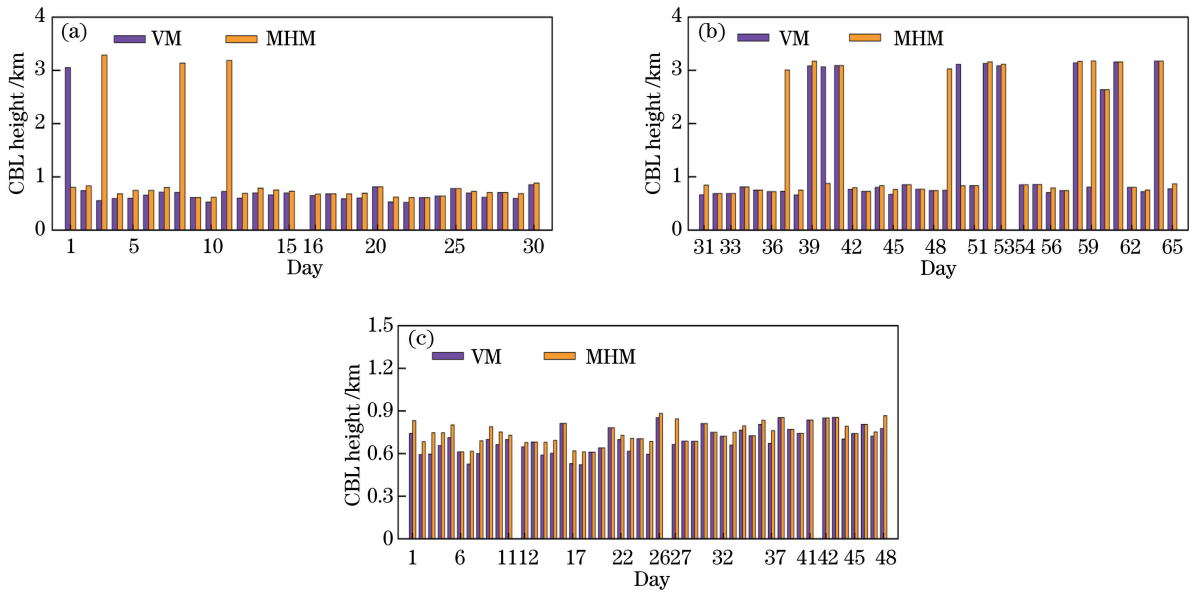


图7 (a)春季、夏季(第16~30天)和(b)秋季(第31~53天)、冬季(第54~65天)时,VM法和MHM法应用于CALIPSO Level 1资料反演得到的65天边界层高度;(c)剔除反演结果较高的数据后的48天的边界层高度,春季(第1~11天),夏季(第12~26天),秋季(第27~41天),冬季(第42~48天)

Fig. 7 Retrieved BLHs of 65 days based on CALIPSO Level 1 data by VM and MHM in (a) spring (days 1-15), summer (days 16-30) and (b) autumn (days 31-53), winter (days 54-65); (c) BLHs of 48 days after removing cases with higher retrieved results in spring (days 1-11), summer (days 12-26), autumn (days 27-41) and winter (days 42-48)

到的边界层高度的季节变化是一致的。这也说明了由CALIPSO Level 2资料获得的边界层高度更加符合实际。

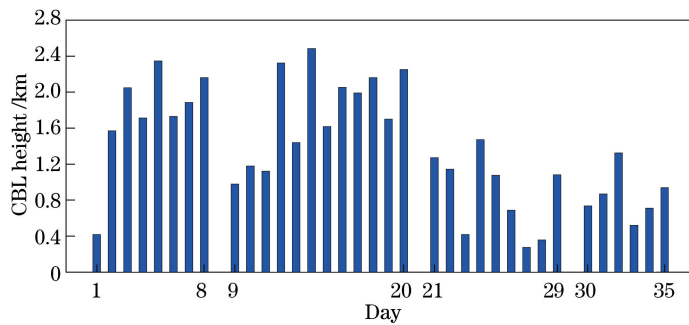


图8 春季(第1~8天)、夏季(第9~20天)、秋季(第21~29天)和冬季(第30~35天)由CALIPSO Level 2气溶胶层资料反演得到的35天边界层高度

Fig. 8 Retrieved BLHs of 35 days obtained from CALIPSO Level 2 aerosol layer products in spring (days 1-8), summer (days 9-20), autumn (days 21-29) and winter (days 30-35)

针对Level 1总体消光系数廓线,VM法在应用时,方差的点数 n 不同将会造成边界层高度反演值的不同。同时,对于MHM法,不同的小波振幅 Δh 也会得到不同的边界层高度。基于以上特点,对VM法分别取10组不同的点数($n=2,4,6,\dots,20$)、对MHM法分别取10组不同的 $\Delta h(2dz,4dz,6dz,\dots,20dz)$ 来反演边界层高度,结果如图9所示。可以看出相较于地基激光雷达资料,当MHM法应用于CALIPSO Level 1资料时,初值的变化对反演的边界层高度值影响更大。

4 不同资料反演的边界层高度的比较

4.1 微波辐射计温度资料求取的边界层高度与CALIPSO Level 1资料求取的边界层高度比较

微波辐射计的反演结果与CALIPSO Level 1数据反演的结果可用于比较的有34天,如图10所示。可

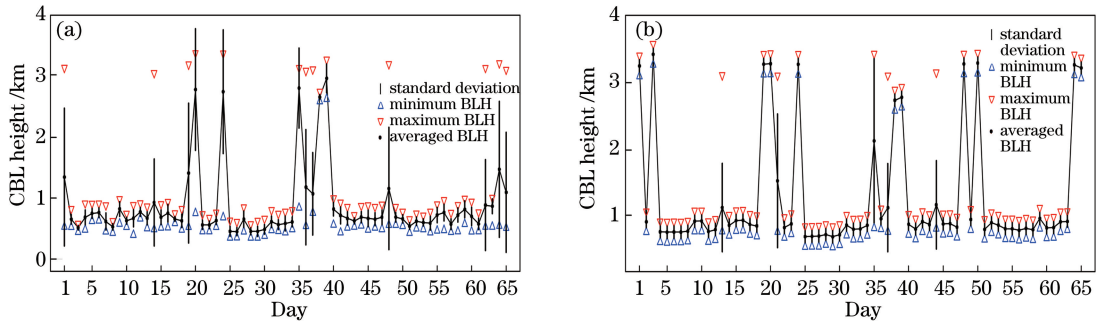


图9 (a)不同点数 n 情况下 VM 法反演得到的边界层高度;(b)不同 Δh 初值情况下 MHM 法反演得到的边界层高度
Fig. 9 (a) Retrieved BLHs obtained by VM method with different values of n ;
(b) retrieved BLHs obtained by MHM method with different initial values of Δh

可以看出多数情况下,由温度廓线得到的边界层高度低于由 CALIPSO Level 1 资料获取的边界层高度。两种资料得到的边界层高度的平均偏差为 0.27 km,皮尔逊相关系数为 -0.378 。

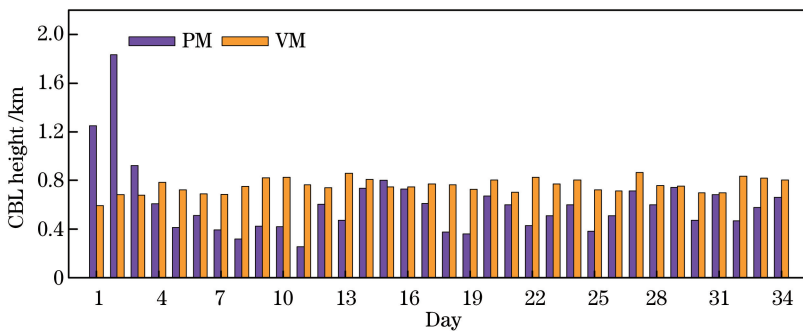


图10 利用气块法由微波辐射计温度资料反演的边界层高度与
利用 VM 法由 CALIPSO Level 1 总体消光系数资料反演的边界层高度比较

Fig. 10 Comparison of BLHs retrieved by microwave radiometer temperature data using PM and BLHs retrieved by CALIPSO Level 1 total attenuated backscatter data using VM

4.2 地基激光雷达资料求取的边界层高度与 CALIPSO Level 1 资料求取的边界层高度比较

地基激光雷达的反演结果与 CALIPSO Level 1 资料反演结果可用于比较的有 24 天,为了比较的统一,对两种雷达资料均采用 VM 法,且求取方差的点数保持一致,均为 4。两者反演的边界层高度比较如图 11 所示,可见由地基激光雷达资料得到的边界层高度一般低于由 CALIPSO Level 1 资料得到的边界层高度,两种资料得到的边界层高度的平均偏差为 0.52 km,皮尔逊相关系数为 -0.710 。

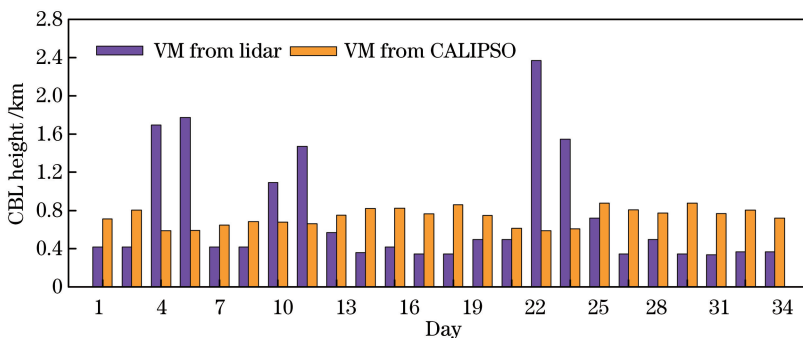


图11 利用 VM 法由地基激光雷达资料和 CALIPSO Level 1 总体消光系数资料反演的边界层高度比较
Fig. 11 Comparison of BLHs retrieved by ground-based lidar data and CALIPSO Level 1 total attenuated backscatter data using VM

选择微波辐射计、地基激光雷达资料、CALIPSO Level 1 消光系数资料都可用的 12 天,比较边界层高度的反演值,结果如表 2 所示。其中地基激光雷达资料与天基激光雷达资料得到的边界层高度都采用 VM

法,且对于高空有干扰的情形,限制在一定的高度以下。可见两种地基资料反演的边界层高度相对来说比较接近,平均偏差为 0.280071 km,而由地基激光雷达资料反演的边界层高度与由 CALIPSO Level 1 资料反演的边界层高度的平均偏差达到了 0.433952 km。

表 2 利用不同资料反演的边界层高度比较

Table 2 Comparison of BLHs retrieved by different data

km

Date	BLH retrieved by microwave radiometer data at SACOL using PM	BLH retrieved by ground-based lidar data at SACOL using VM	BLH retrieved by CALIPSO Level 1 data using VM	Deviation of retrieved BLH between ground-based lidar and microwave radiometer data at SACOL	Deviation of retrieved BLH between ground-based lidar at SACOL and CALIPSO Level 1 data
May 29, 2007	1.250000	1.785000	0.5936752	0.535000	1.1913248
Jun. 30, 2007	1.833336	0.435000	0.6808653	1.398336	0.2458653
Jul. 16, 2007	0.9249973	1.110000	0.6793430	0.1850027	0.430657
Nov. 21, 2007	0.3187523	0.585000	0.7498961	0.2662477	0.1648961
Dec. 7, 2007	0.4249973	0.360000	0.8209652	0.0649973	0.4609652
Dec. 23, 2007	0.4222221	0.4350000	0.8245524	0.0127779	0.3895524
Jan. 8, 2008	0.2538471	0.360000	0.7626429	0.1061529	0.4026429
Feb. 9, 2008	0.4708347	0.360000	0.8599472	0.1108347	0.4999472
Mar. 12, 2008	0.7999992	0.510000	0.7464262	0.2899992	0.2364262
Nov. 26, 2009	0.5100002	0.352500	0.7690555	0.1575002	0.4165555
Dec. 12, 2009	0.5999966	0.367500	0.8045548	0.2324966	0.4370548
Jan. 13, 2010	0.3840008	0.382500	0.7140405	0.0015008	0.3315405
Average deviation				0.280071	0.433952

4.3 地基激光雷达资料求取的边界层高度与 CALIPSO Level 2 资料求取的边界层高度比较

同理,比较由 CALIPSO Level 2 气溶胶层产品反演得到的边界层高度与地基激光雷达资料得到的边界层高度。为了尽量减少地基激光雷达资料信噪比对提取结果的影响,首先选择地基激光雷达反演效果最佳的方法。比较 4 种地基雷达方法与气块法得到的边界层高度:曲线拟合法、HM 法、MHM 法及梯度法与气块法结果的平均偏差分别为:0.237831, 0.278820, 0.280071, 0.2804408 km;皮尔逊相关系数分别为:0.881486、0.448413、0.450442、0.434607。综合考虑的结果是选择相对稳定的曲线拟合法,得到曲线拟合法与 CALIPSO Level 2 资料获得的边界层高度,如图 12 所示。两种方法得到的边界层高度的平均偏差为 0.35 km,皮尔逊相关系数则达到了 0.84。相较于由 CALIPSO Level 1 消光系数数据得到的边界层高度,由 Level 2 气溶胶层产品得到的边界层高度与地基激光雷达得到的边界层高度更加一致。

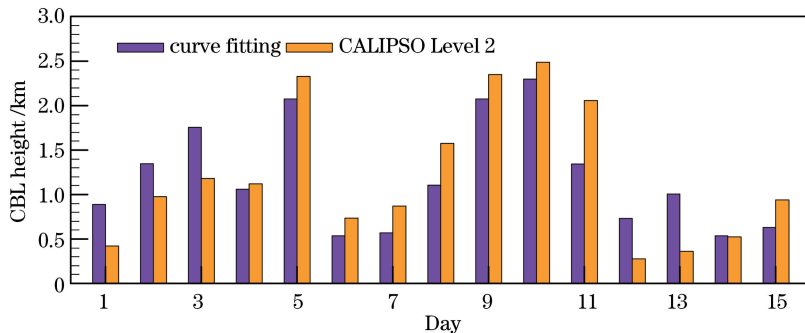


图 12 利用地基激光雷达资料采用曲线拟合法反演的边界层高度与利用 CALIPSO Level 2 气溶胶层资料反演的边界层高度比较

Fig. 12 Comparison of BLHs retrieved by ground-based lidar data using curve fitting method and BLHs retrieved by CALIPSO Level 2 aerosol layer products

5 结 论

本研究利用 SACOL 站当地时间 14:23 的微波辐射计温度廓线(34 天)与激光雷达 NRB 廓线(24 天)反演白天边界层高度。其中,微波辐射计温度廓线得到边界层高度采用的是气块法,由气块法得到的边界层高度呈现出的季节变化为:在夏季达到最大,秋冬季节较低。而针对 NRB 数据,分别采用梯度法、曲线拟合法与小波变换法(HM 法与 MHM 法)反演边界层高度。由曲线拟合法得到的边界层高度多数情况下高于梯度法、HM 法和 MHM 法的结果,但是 4 种方法得到的边界层高度呈现出相同的季节变化特征,边界层高度在夏季达到最大,秋冬季节较低,春季介于两者之间。由两种不同的地基资料得到的边界层高度显示出相似的季节变化规律。如果以微波辐射计资料得到的边界层高度为标准,那么基于地基激光雷达资料的方法中,曲线拟合法的反演效果最佳,它与气块法的结果平均偏差为 0.23 km,皮尔逊相关系数可达 0.88。

CALIPSO 卫星携带天基激光雷达 CALIOP,利用该雷达资料可以得到全球的边界层高度分布状况,以此验证模式的边界层高度是否正确,从而对模式的动力包等进行修正。为了进一步验证由 CALIPSO 资料得到的边界层高度的可靠性,利用 CALIPSO Level 1 532 nm 总体衰减系数廓线(65 天)与 Level 2 气溶胶层产品(35 天)反演边界层高度,并与由地基资料得到的边界层高度做比较。其中对 Level 1 廓线分别采取 VM 法与小波变换法(MHM 法)反演边界层高度,同时通过寻找最低气溶胶层从 Level 2 气溶胶产品得到边界层高度。结果显示,由 CALIPSO 雷达 Level 1 消光系数廓线资料得到的边界层高度往往由于高层存在云或气溶胶的平流输送等原因而造成某些时刻过高估计的现象,剔除过高估计的个例后,相比于地基资料,由 CALIPSO Level 1 资料获得的边界层高度季节性的变化不是很明显。由地基激光雷达资料反演的边界层高度与 CALIPSO Level 1 资料反演的边界层高度(24 天,均采用 VM 法)的平均偏差可达到 0.52 km,且两种资料的结果呈现出负相关,这可能与 Level 1 数据本身信噪比较低有关。而由 Level 2 气溶胶层产品得到的边界层高度显示出与地基激光雷达资料得到的边界层高度相同的季节变化,夏季最大,秋冬季节较低。并且两种资料得到的边界层高度(15 天)平均偏差为 0.35 km,呈现出正相关。由此说明,以 CALIPSO Level 2 气溶胶层产品得到的边界层高度相较于 Level 1 廓线得到的边界层高度更加可靠。在使用 CALIPSO 雷达 Level 1 532 nm 消光系数资料反演边界层高度作为“观测”来验证模式的边界层高度输出量时需更加谨慎。

此外,对地基激光雷达 NRB 廓线及 CALIPSO Level 1 532 nm 总体衰减系数廓线,考虑两种小波变换法使用时对初值小波振幅 Δh 的敏感性,研究中通过设置 10 组不同的初值比较结果的差异,发现当小波变换法应用于两种资料时,不同的小波振幅 Δh 对地基激光雷达资料得到的边界层高度结果影响不大,而对 CALIPSO 雷达资料的反演结果影响更明显一些。

参 考 文 献

- [1] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988: 13-16.
- [2] Zhao Ming, Miao Manqian, Wang Yanchang. Boundary layer meteorology tutorial[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991.
赵 鸣, 苗曼倩, 王彦昌. 边界层气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [3] Yang Jing, Wu Jiangyan, Li Xia, *et al.* Analysis on atmospheric boundary layer structure and its effect on air pollution over Urumqi city in winter[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(4): 717-723.
杨 静, 武疆艳, 李 霞, 等. 乌鲁木齐冬季大气边界层结构特征及其对大气污染的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 717-723.
- [4] Dang R, Li H, Liu Z G, *et al.* Statistical analysis of relationship between daytime lidar-derived planetary boundary layer height and relevant atmospheric variables in the semiarid region in Northwest China[J]. Advances in Meteorology, 2016(3): 1-13.
- [5] Jordan N S, Hoff R M, Bacmeister J T. Validation of Goddard Earth Observing System-version 5 MERRA planetary boundary layer heights using CALIPSO[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D24): 9-12.
- [6] Zeng X, Brunke M A, Zhou M, *et al.* Marine atmospheric boundary layer height over the Eastern Pacific: data analysis and model evaluation[J]. Journal of Climate, 2004, 17(21): 4159-4170.

- [7] Yan Baodong, Song Xiaoquan, Chen Chao, *et al.* Beijing atmospheric boundary layer observation with lidar in 2011 spring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s128001.
闫宝东, 宋小全, 陈超, 等. 2011 春季北京大气边界层的激光雷达观测研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s128001.
- [8] Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong, *et al.* Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1214001.
陶宗明, 吴德成, 刘东, 等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1214001.
- [9] Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, *et al.* Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north suburb area of Nanjing city[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060101.
曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060101.
- [10] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, *et al.* Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(7): 1001-1027.
- [11] Wang Lin, Xie Chenbo, Han Yong, *et al.* Comparison of retrieval methods of planetary boundary layer height from lidar data[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(4): 241-247.
王琳, 谢晨波, 韩永, 等. 测量大气边界层高度的激光雷达数据反演方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(4): 241-247.
- [12] Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo, *et al.* Research on the depolarization ratio characteristic of the aerosol in the atmosphere with the CALIPSO satellite data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 2943-2951.
赵一鸣, 江月松, 张绪国, 等. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 2943-2951.
- [13] McGrath-Spangler E L, Denning A S. Estimates of North American summertime planetary boundary layer depths derived from space-borne lidar[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D15101): 408-414.
- [14] Liu J, Huang J, Chen B, *et al.* Comparisons of PBL heights derived from CALIPSO and ECMWF reanalysis data over China[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2015, 153: 102-112.
- [15] Leventidou E, Zanis P, Balis D, *et al.* Factors affecting the comparisons of planetary boundary layer height retrievals from CALIPSO, ECMWF and radiosondes over Thessaloniki, Greece[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 74(2): 360-366.
- [16] Zhang W, Augustin M, Zhang Y, *et al.* Spatial and temporal variability of aerosol vertical distribution based on lidar observations: a haze case study over Jinhua Basin[J]. *Advances in Meteorology*, 2015: 1.
- [17] McGill M J, Vaughan M A, Trepte C R, *et al.* Airborne validation of spatial properties measured by the CALIPSO lidar[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D20): 365-371.
- [18] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): 228-262.
- [19] Liu Hongyan, Li Ju, Cao Xiaoyan, *et al.* Characteristics of the atmosphere remote sensed by the ground-based 12-channel radiometer[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(2): 222-229.
刘红燕, 李炬, 曹晓彦, 等. 遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(2): 222-229.
- [20] Huang Z, Huang J, Bi J, *et al.* Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-U. S. joint dust field experiment[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(D7): 1307-1314.
- [21] Holzworth G C. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States[J]. *Monthly Weather Review*, 1951, 92(5): 235-242.
- [22] Eresmaa N, Karppinen A, Joffre S M, *et al.* Mixing height determination by ceilometers[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2005, 6(6): 12697-12722.
- [23] Melfi S H, Spinhirne J D, Chou S H, *et al.* Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1985, 24(8): 806-821.
- [24] Menut L, Flamant C, Pelon J, *et al.* Urban boundary-layer height determination from lidar measurements over the Paris area[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(6): 945-954.

- [25] Steyn D G, Baldi M, Hoff R M. The detection of mixed layer depth and entrainment zone thickness from lidar backscatter profiles[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1999, 16(7): 953-959.
- [26] Davis K J, Gamage N, Hagelberg C R, *et al.* An objective method for deriving atmospheric structure from airborne lidar observations[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2000, 17: 1455-1468.
- [27] Lammert A, Bösenberg J. Determination of the convective boundary-layer height with laser remote sensing [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 119(1): 159-170.
- [28] Hayden K L, Anlauf K G, Hoff R M, *et al.* The vertical chemical and meteorological structure of the boundary layer in the Lower Fraser Valley during Pacific '93[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(14): 2089-2105.
- [29] Cohn S A, Angevine W M. Boundary layer height and entrainment zone thickness measured by lidars and wind-profiling radars[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39(39): 1233-1247.
- [30] Brooks I M. Finding boundary layer top: application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2003, 20(8): 1092-1105.
- [31] Li Hong, Ma Yuanyuan, Yang Yi. Study on retrieval of boundary layer height using wavelet transformation method based on lidar data[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(1): 78-88.
李红, 马媛媛, 杨毅. 基于激光雷达资料的小波变换法反演边界层高度的方法[J]. *干旱气象*, 2015, 33(1): 78-88.
- [32] Grimsdell A W, Angevine W M. Convective boundary layer height measurement with wind profilers and comparison to cloud base[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1998, 15(6): 1331.
- [33] 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.