

doi: 10.3788/gzxb20164505.0501001

# 激光云高仪对那曲地区大气边界层高度的探测分析

廖希伟, 宋小全, 王东祥, 张倩, 戴光耀, 吴松华

(中国海洋大学 信息科学与工程学院海洋技术系, 山东 青岛 266100)

**摘 要:**2014 年 7 月至 8 月在第三次青藏高原大气科学试验的支持下, 分析了夏季那曲地区大气边界层高度日变化特征. 采用激光云高仪通过后向散射信号梯度法求得大气边界层高度, 将云顶高度判定为边界层高度时, 那曲地区对流边界层高度最高可达 3800 m, 在夜间稳定边界层情况下, 最低只有 40 m. 采用无线电探空仪数据, 利用位温梯度法、相对湿度梯度法求得大气边界层高度. 利用云高仪与探空仪同步实验 40 天得到的有效数据, 对后向散射信号梯度法与位温梯度法得到的大气边界层高度的相关性进行分析, 相关系数达 0.78, 标准偏差为 738.84 m. 对 8 组较为异常量据的再分析发现云高仪在晴空探测大气时信噪比存在一定的不足. 对比早、晚测量结果可知, 那曲地区大气边界层高度日变化大, 是由于该地区地处内陆海拔较高, 夏季日照辐射相对平原地区较强, 对流和气温强烈的日变化引起大气层结日变化较大.

**关键词:**大气边界层; 边界层厚度; 激光雷达; 气溶胶-光学特性; 气溶胶-衰减

**中图分类号:**P407.5; P412.292; P412.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2016)05-0501001-7

## Performance Analysis of Atmospheric Boundary Layer Height Measurement in Nagqu Based on Ceilometer

LIAO Xi-wei, SONG Xiao-quan, WANG Dong-xiang, ZHANG Qian,  
DAI Guang-yao, WU Song-hua

(Department of Marine Technology, College of Information Science and Engineering,  
Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** With the support of the Third Tibetan Plateau Experiment of Atmospheric Sciences, variations of the atmospheric boundary layer height of Nagqu area in summer (Jul-Aug 2014) were compared. Ceilometer derived atmospheric boundary layer height was estimated via gradient method of backscatter signal. The result shows that, when the cloud top height is determined as atmospheric boundary layer height, the upper limit of convection boundary layer height could reach 3800 m. And, for nocturnal stable boundary layer, the lower limit is only 40 m. Radiosonde derived atmospheric boundary layer height was obtained using gradient method of potential temperature and relative humidity. By analyzing the valid dataset derived from the simultaneous measurements of ceilometer and radiosonde within the 40 days, the correlation coefficient of atmospheric boundary height obtained by gradient method of backscatter signal and potential temperature, is calculated as 0.78, while the standard deviation is 738.84 m. In addition, it has been found that signal-to-noise ratio of ceilometer detection is insufficient under clear sky condition by analysis of 8 sets of abnormal data. In short, results indicate great diurnal variation of atmospheric boundary layer height by comparing daily measured data, which could be attributed to that the high altitude of Nagqu district causes stronger solar radiation compared to plain area, and hence intense diurnal variation of temperature and convection in summer.

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 41375016, 91337103, 41576108)资助

**第一作者:**廖希伟(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光雷达大气探测. Email: 909432902@qq.com

**导师(通讯作者):**宋小全(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光遥感遥测. Email: songxq@ouc.edu.cn

**收稿日期:**2015-11-30; **录用日期:**2016-01-25

<http://www.photon.ac.cn>

**Key words:** Atmosphere boundary layer; Boundary layer thickness; Lidar; Aerosols-optical properties; Aerosols-attenuation

**OCIS Codes:** 010.1290; 010.3640; 010.1100

## 0 引言

大气边界层(Atmospheric Boundary Layer, ABL)是地面和自由大气的连接部分,与人类生活息息相关,它响应地面作用的时间尺度为1 h甚至更短,这些作用包括摩擦阻力、蒸发和蒸腾、热量输送、污染物排放等,变化范围一般为100~3000 m<sup>[1]</sup>.在陆地地区大气边界层具有轮廓分明、日循环发展的结构,一般分为对流边界层、稳定边界层和残留层,对应的大气边界层高度(Atmospheric Boundary Layer Height, ABLH)分别为对流边界层高度、稳定边界层高度和残留层高度<sup>[2]</sup>.

大气边界层高度是描述大气边界层的一个基础参量,用来表征对流层底部的结构,也是大气动力学和大气数值模式中边界层参量化方案的一个重要参量.大气边界层高度随着时间和空间而变化,并受地形、地表、季节、昼夜以及天气的影响<sup>[1]</sup>.青藏高原是世界上最高、最大的高原,作为“世界屋脊”,青藏高原对全球大气环流的形成有显著影响,对全球大气能量和水循环起重要作用<sup>[3-4]</sup>.高原对大气的影晌与大气边界层结构紧密相关,所以对青藏高原大气边界层高度的确定尤为重要.

大气边界层的探测手段主要有卫星、微波雷达、声雷达、系留气球、无线电探空仪、激光雷达等.气溶胶主要聚集在大气边界层内,激光云高仪作为一种激光雷达,能够连续实时获得来自气溶胶粒子的后向散射垂直廓线,可以定量探测大气气溶胶层,是监测和追踪大气边界层演变的有力工具<sup>[5-7]</sup>.目前利用云高仪后向散射信号(Backscatter Signal, BS)反演边界层高度的方法主要有三种:1)利用后向散射信号求出垂直梯度,梯度最小值所在高度被定义为边界层的高度,但当大气中存在多个气溶胶分层时,梯度法可能无法准确判定大气边界层高度<sup>[8-10]</sup>;2)利用小波协方差变换方法寻找后向散射信号积分的最大值,该值对应的高度就是边界层高度,该方法适用于边界层内及以上的后向散射信号梯度较小或者轮廓分明的逆温层情况,但是当背景噪声梯度变大时,较大的误差可能会被引入边界层高度的判定<sup>[11-12]</sup>;3)利用信号在时间上的变化求出标准偏差(Standard Deviation, SD),偏差最大值所在高度也可以判定为边界层高度,但是当大气层结变化较快时,判定结果也会产生较大误差<sup>[13]</sup>.

本文利用激光云高仪给出的边界层高度分析了那曲地区的边界层高度特征,并与探空数据提取的边界层高度进行对比.用后向散射信号梯度法与标准偏差法对云高仪的原始数据做边界层高度提取,再与探空

数据结果对比.分析了云高仪在硬件设计和边界层提取算法方面存在的问题.

## 1 试验场地、观测仪器和观测内容

2014年7月至8月在青藏高原那曲地区进行第三次青藏高原大气科学试验,这次试验可以用于边界层特性探测的仪器有激光云高仪、无线电探空仪和自动气象站,三台设备的同步观测可以用做数据验证.观测地点为那曲地区气象局(31.48°N, 92.06°E, 海拔高度为4 508 m),如图1,试验场地四周开阔,地面为高约5 cm的高原草甸覆盖,试验场地的地形和下垫面特性基本能够代表夏季藏北那曲地区的地理环境特性.



图1 试验场地下垫面状况

Fig. 1 The underlying surface situation of test site

云高仪实验测量从7月7日至8月30日,24小时连续工作,共测得55天的数据,获取的数据产品有后向散射原始信号、云底高度、云层数和边界层高度等.那曲地区气象局在每天早晚大约7:15释放探空仪,从7月8日至8月16日共测得40天数据,参量包括温度、气压、湿度、风速和风向等,本文主要利用了云高仪与探空仪40天共有的实验数据进行分析.自动气象站从7月8日到8月3日工作,获得27天实验数据,可获得地面处温度、风速和湿度的连续数据,用作辅助参考.

## 2 大气边界层高度反演

### 2.1 激光云高仪 CL31

CL31型激光云高仪为VAISALA公司生产、基于激光雷达技术研制而成,在全球广泛用于边界层与云层的自动化探测.云高仪通过发射910 nm的红外激光,穿过气溶胶与云层时产生后向散射,接收其回波信号来探测大气信息.根据激光雷达原理,云高仪系统接收到的不同高度的信号为<sup>[14-15]</sup>

$$P_r(z) = E_0 \frac{c}{2} \frac{A}{z^2} \beta(z) \exp\left(-z \int_0^z \sigma(z') dz'\right) \quad (1)$$

式中, $P_r(z)$ 为从距离 $z$ 处接收到的后向散射信号, $E_0$

为发射的激光能量,  $c$  为光速,  $A$  为接收孔径,  $z$  表示距离,  $\beta(z)$  为距离  $z$  处的后向散射系数,  $\exp(-2\int_0^z \sigma(z') dz')$  为双向大气透射率, 表示地面到距离  $z$  处的双向大气衰减<sup>[14-15]</sup>.

后向散射信号梯度(Backscatter Signal Gradient, BSG)法通过对后向散射信号距离平方修正得到距离修正信号(Range-Corrected Signal, RCS), 消除信号强度对高度的依赖, 然后对信号取对数后再利用梯度法求出信号在高度上的梯度变化(Gradient Signal, GS), 最后找到梯度最小值处, 公式为<sup>[7]</sup>

$$GS(z) = \frac{d}{dz} \log(RCS) \quad (2)$$

如果梯度变化在边界层高度以下一直处在零值附近, 只有到达边界层顶才会有最大的衰减, 说明该边界层内混合较为充分<sup>[7]</sup>. 理论上这一过程就可以确定大气边界层的高度, 但是由于实际大气层结复杂多变, 受到温度、太阳辐射和风速等诸多因素的影响, 还需要做一系列的判定过程才能大致确定边界层高度, 判定过程主要分为三个步骤: 通过数据的预处理来提高信噪比; 采用梯度探测技术找到重要的气溶胶梯度层; 最后通过质量控制和大气层结特征条件从多个候选层中确定真实的边界层高度. 云高仪的数据一般情况下会给出至多三个候选边界层高度, 自低至高以数字 0~3 表示, 0 代表无明显边界层高度被探测到, 1、2、3 分别表示后向散射信号梯度绝对值大小的表征, 最后通过 BL-index、时间和天气状况等信息来确定哪一层所在高度最有可能是边界层高度<sup>[16-18]</sup>. 云高仪的 BL-VIEW 可以直接从颜色上客观显示后向散射强度、边界层高度和云底高度信息, Level\_3 数据直接存储了边界层高度与云层高度数据. 云高仪主要参量表见表 1<sup>[14, 17]</sup>.

表 1 云高仪 CL31 产品参量

Table 1 The parameters of ceilometer CL31

Parameter	Value/Range
Laser wavelength/nm	910
Minimum range resolution/m	5
Range resolution for boundary layer scans/m	10
Minimum report interval/s	2
Report interval for boundary layer scans/s	16
Measuring range for cloud base detection/m	0~7500
Backscatter profile range/m	0~7700
Range for boundary layer fine structure profiling/m	0~3000

本文采用后向散射信号的标准偏差法来判定边界层高度, 以便于对后期的数据进行个例分析与方法对比<sup>[13]</sup>.

## 2.2 无线电探空仪

无线电探空仪释放期间, 可测得温度、风速、风向、

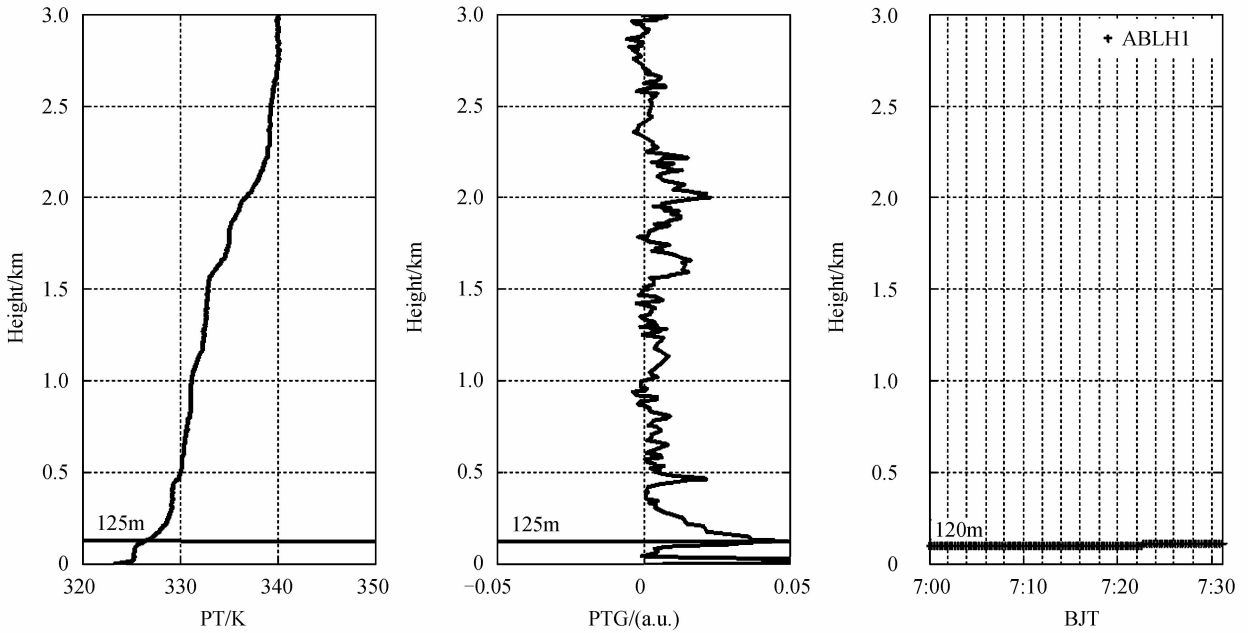
湿度、气压等气象要素廓线. 位温梯度(Potential Temperature Gradient, PTG)法是根据探空仪获取的位温(Potential Temperature, PT), 即空气在干绝热条件下变化到标准大气压时的温度, 计算其垂直梯度, 梯度最大值所在高度即为大气边界层高度<sup>[9, 19]</sup>. 还可以利用相对湿度(Relative Humidity, RH)的梯度最小值处所在高度判定边界层高度, 即相对湿度梯度(Relative Humidity Gradient, RHG)法, 这两种方法可以相互验证<sup>[16-17]</sup>. 利用无线电探空仪数据反演边界层高度的方法有地转风高度法、气块法和理查森数法等<sup>[1]</sup>, 由于位温梯度法与相对湿度梯度法应用较为简单, 且准确度较高, 应用最为广泛.

## 3 数据结果分析

### 3.1 那曲地区大气边界层高度特征

综合云高仪 55 天、297000 组数据, 通过每小时数据平均及标准偏差可得那曲地区大气边界层高度日变化. 云高仪自带算法里将其探测的大气边界层分为三层, 通过 BL-index 来确定所给出层结的后向散射信号梯度数值的大小, 用来判定真实的边界层高度与类型<sup>[16-18]</sup>. 从高度分布来看, 云高仪给出的那曲地区大气边界层高度变化范围为 40~3 800 m, 徐祥德等<sup>[3]</sup>根据青藏高原当雄地区实测资料得出大气边界层高度范围为 1 850~2 750 m(当雄地区距离那曲地区约 140 km), 李茂善等<sup>[20]</sup>认为那曲地区大气边界层最高可达 1 800 m, 刘诚等<sup>[21]</sup>给出的那曲地区 2002 年 8 月大气边界层高度仅有 1 100 m, 且比较稳定. 造成这一差别的原因除了地理位置及天气季节条件外, 原因还包括: 1) 云高仪后向散射信号梯度法在有些情况下会产生多个梯度局部最小值, 导致无法准确确定哪一个值才是符合实际的; 2) 云高仪给出的最低 40 m 的边界层高度由于设备重叠因子的存在使其准确性有待商榷; 3) 那曲地区处于雨季时有云存在的概率极高, 云高仪有可能将云顶高度判定为边界层高度, 所以最高 3800 m 的边界层高度必定受到了云层的影响.

对于近地面边界层高度的探测, 选用位温梯度法与云高仪边界层高度数据进行对比. 图 2 为北京时间(Beijing Time, BJT)2014 年 7 月 16 日 07:17 释放的探空仪数据所获得的位温、位温梯度和云高仪在 07:00-07:30 时间段内边界层高度变化, 探空仪得到的边界层高度约为 125 m, 云高仪显示高度为 120 m, 期间有略微变化. 因为早上太阳还未升起, 下垫面还未受热, 边界层高度也较低, 所以该时间段内的边界层为稳定边界层, 两者结果较为一致.



(a) 07:17 Potential temperature profile (b) 07:17 Potential temperature gradient profile (c) 07:00-07:30 Boundary layer height of ceilometer

图 2 2014 年 7 月 16 日基于探空仪与云高仪的边界层高度对比

Fig. 2 Comparison of boundary layer height based on radiosonde and ceilometer on July 16, 2014

大气边界层高度在白天不断发展,到傍晚达到最大,选择 2014 年 8 月 13 日晚的数据,通过 19:15 释放的探空仪获得位温、位温梯度、相对湿度、相对湿度梯度和 19:00~19:30 云高仪探测边界层高度与云底高

度(Cloud Base Height, CBH)情况,如图 3.可以看出位温梯度在 2 666 m 处增强,相对湿度在 2 580 m 处有一个强烈衰减的过程,这两个高度分别对应为位温梯度法与相对湿度梯度法判定的边界层高度。

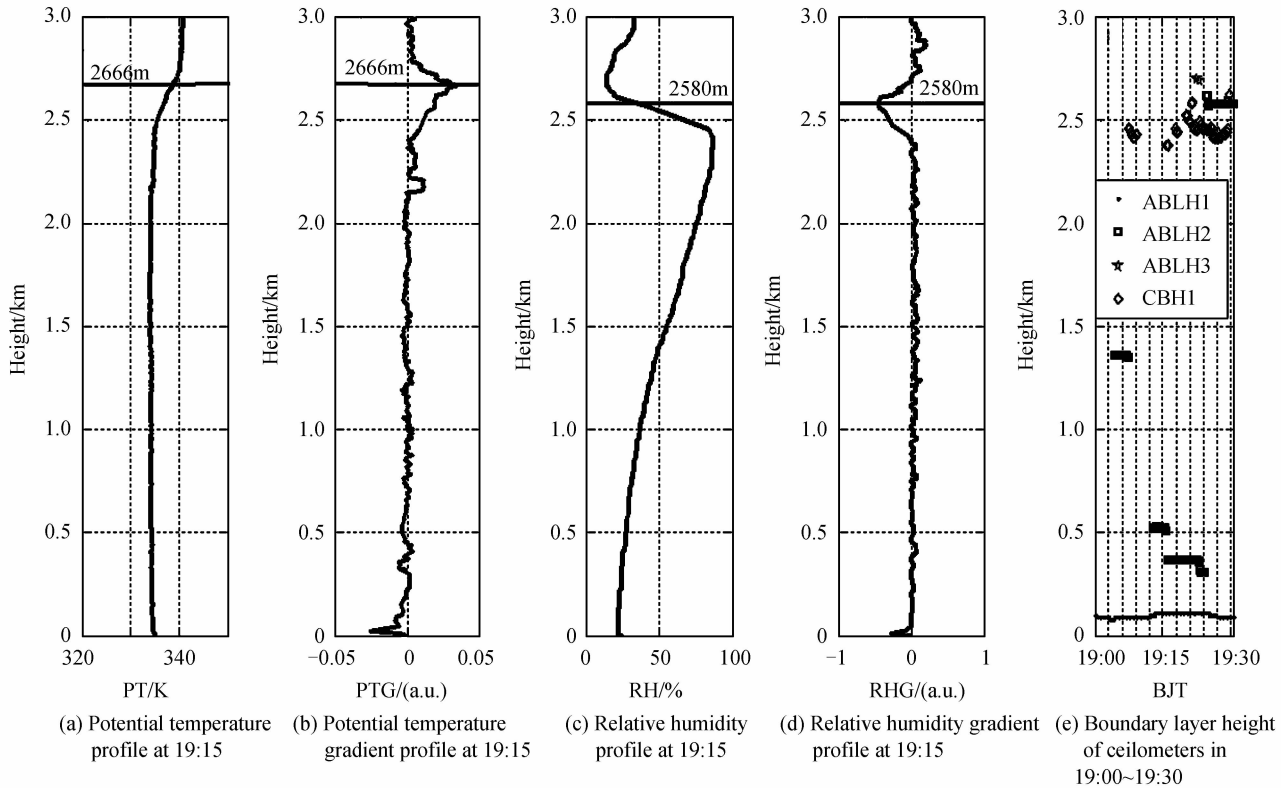


图 3 2014 年 8 月 13 日基于探空仪与云高仪的边界层高度对比

Fig. 3 Comparison of boundary layer height based on radiosonde and ceilometer on August 13, 2015

通过判断可知位温梯度给出的 2 666 m 这一高度 是对流边界层高度,与相对湿度梯度给出高度的差只

有 86 m,结果较为一致.通过云高仪的数据可以知道,19:00~19:30时在 2 500 m 处存在云层,而且云高仪也将这层云的云顶判定为大气边界层高度,高度为 2 580 m,与相对湿度梯度法给出高度相同,以上三种方法都将这一时间段内测量得到的云顶高度判定为边界层的高度,所以可以知道探空仪的位温梯度法、相对湿度梯度法和云高仪判定边界层高度时都会出现将云顶高度判定为边界层高度的情况.

### 3.2 激光云高仪性能分析

探空仪与云高仪同步开展观测实验的天数为 40 天,根据云高仪的后向散射信号梯度法与探空仪的位温梯度法<sup>[19]</sup>,对这些天大气边界层高度的结果进行了初步统计,如图 4.图中数据共有 77 组,其中标注为三角形的数据 8 组,这 8 组数据判定的边界层高度差值在 1 450 m 以上,日期分别是 7 月 10 日晚、7 月 11 日晚、7 月 12 日晚、7 月 15 日晚、7 月 18 日晚、7 月 25 日早晚和 7 月 27 日晚.

这 8 组数据大部分发生在晚上,并且数据获取当天的白天时间一直处于能见度较好的晴空无云状态,或者探空仪释放前两个小时之内都有降雨发生.这些都造成释放探空仪时,气溶胶的含量比平时偏低,导致云高仪对高空处气溶胶粒子的梯度变化不够敏感,无法识别准确的对流边界层(那曲地区 19 点太阳光照依旧存在,对流边界层也存在),只给出了近地面稳定边界层高度,因而导致差值巨大.

图 4 中 8 组标注为三角形的数据差值较大,在没有剔除的情况下,这 77 组数据得到云高仪与探空仪的相关系数为 0.78,标准偏差为 738.84 m,标准偏差较大,原因主要是:1)云高仪与探空仪分别基于不同原理、不同方法来探测大气边界层高度,会导致两者结果差距较大;2)高原地区海拔较高,风较大,日照强,大气状况发生变化的时间尺度更短,加上阵雨时有发生,导致大气层结复杂,偏差较大.

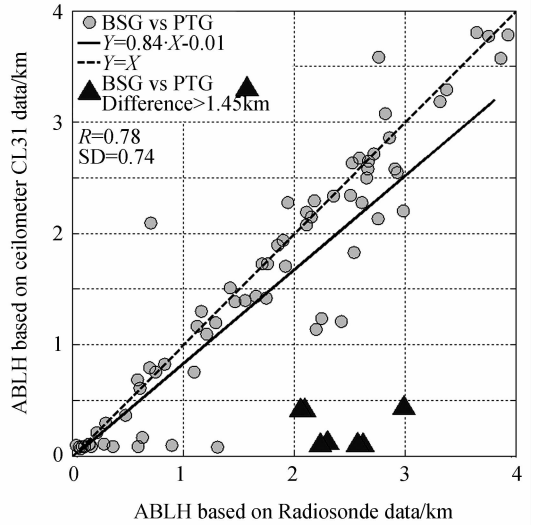


图 4 云高仪与探空仪边界层高度相关性  
Fig. 4 Correlation of ABLH derived from ceilometer and radiosonde

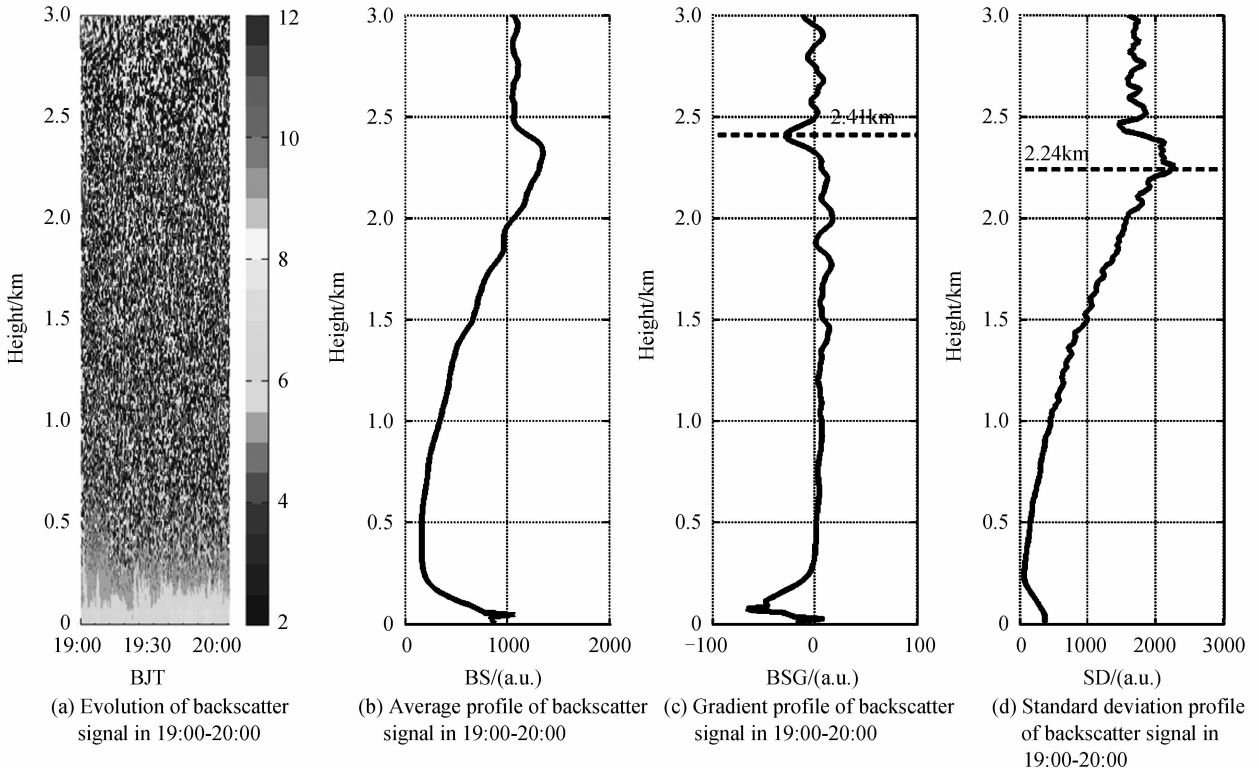


图 5 2014 年 7 月 27 日 19:00~20:00 后向散射信号数据  
Fig. 5 Backscatter signal data in 19:00-20:00 on July 27, 2014

为了更详细地探究云高仪的性能,选取云高仪在2014年7月27日19:00~20:00的level\_2原始数据,分别得到了后向散射信号随高度和时间的变化、后向散射信号1h的平均值、后向散射信号梯度法和标准偏差法得到的1h数据的梯度廓线和标准偏差廓线,如图5.从图中可以看出0.5~3km高度处的信号扰动很大,信噪比较低,而且在19:03~19:09和19:12~19:18两个时间段内信号加扰动有较大差距,这也说明了云高仪工作的不稳定性.在BL-VIEW中,可能由于信噪比较低的缘故将0.5km以上的信号加扰动全部剔除掉,导致云高仪最后给出的边界层高度与真实状况差距较大,也就与探空仪的判定结果差距较大.将level\_2 1h数据平均,因为扰动导致后向散射信号在0.5km以上有个增大的过程,利用后向散射信号梯度

法和标准偏差法来求边界层高度时<sup>[7,13]</sup>,可以分别将相同时间相邻高度上和相同高度相邻时间上的扰动通过相减而去掉,这两种方法得到的边界层高度分别为2.41km和2.24km(近地面的梯度最小值不符合实际天气情况),与探空仪的结果2.235km更为一致.最后将7月10日晚、7月11日晚、7月12日晚、7月15日晚、7月18日晚和7月25日早晚的数据也做了相同的处理,得到的结果见表2.从表2中可以看出,整体上后向散射信号梯度法、标准偏差法与探空数据的位温梯度法的结果一致性较好,虽然在1~3km的高度处梯度、标准偏差也有起伏,但还是可以找到局部的梯度最小值、局部最大标准偏差,所以将信噪比较低的信号全部剔除是不合理的,云高仪给出的结果不理想,需要继续改进优化算法.

表 2 基于不同方法的边界层高度对比

Table 2 Comparison of boundary layer height based on different methods

Date(morning(m), afternoon(a))	Gradient signal/km	Standard deviation/km	VAISALA height/km	Potential temperature gradient/km
7-10(a)	2.46	2.38	0.12	2.31
7-11(a)	2.42	2.39	0.43	2.99
7-12(a)	2.12	2.05	0.41	2.1
7-15(a)	2.41	1.97	0.10	2.62
7-18(a)	2.40	2.29	0.41	2.06
7-25(m)	2.56	2.51	3.29	1.57
7-25(a)	2.44	2.38	0.11	2.57
7-27(a)	2.41	2.24	0.10	2.235

## 4 结论

本文利用第三次青藏高原大气科学试验那曲地区站点的云高仪与探空仪数据资料,计算分析了那曲地区大气边界层高度与演变规律,探讨了云高仪在高原地区的性能表现,结果表明:1)那曲地区大气边界层日变化大,最低的夜间稳定边界层高度为40m,最高对流边界层高度可达3800m,原因是那曲地区处于内陆且海拔较高,日照辐射相较于平原地区强,气温强烈的日变化引起对流更加显著,大气层结日变化更大,此外,高原地形复杂、起伏大,机械湍流等促进了近地面的大气流动,使边界层得到发展.2)无云时云高仪判定边界层高度更为准确,有云时可能会将云顶高度判定为边界层高度,导致边界层高度偏高,这是由云高仪的判定算法决定的.3)利用40天云高仪与探空仪同步数据做了边界层高度相关性分析,相关系数达到0.78,标准偏差为738.84m.分析不一致的原因是云高仪与探空仪基于不同原理来判定边界层高度;探空仪释放后会随风飘移到距离云高仪较远的地方,再加上夏季那曲地区复杂天气的影响,导致两者数据偏差较大.4)云高仪判定边界层高度时强烈依赖气溶胶粒子浓度,在大

气干洁、无云的天气下,气溶胶粒子浓度过低、云高仪自身脉冲能量较小等原因导致云高仪无法精确识别气溶胶粒子浓度的变化、使0.5km以上信噪比偏低,算法上又将信噪比不够的情况剔除,导致判定结果不准确,所以云高仪在硬件设计与算法上需要继续改进.5)利用云高仪与探空仪反演大气边界层高度上会有一定的差异,为提高准确性,下一步将结合风速(低空急流)、温度(逆温层)等参量或者联合激光雷达等高准确度遥感设备来确定边界层高度.

**致谢** 感谢张洪玮、翟晓春、王琪超等高原实验观测人员;感谢冯长中、庄全风、王贵宁在算法实现与编程中提出的宝贵建议;感谢中国气象科学研究院刘黎平研究员和那曲气象局提供的探空仪数据;感谢中国海洋大学海洋与大气学院张苏平教授提供的云高仪.

### 参考文献

- [1] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology [M]. Springer Science & Business Media, 1988.
- [2] LIU S, LIANG X. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height [J]. *Journal of Climate*, 2010, **23**(21): 5790-5809.
- [3] XU Xiang-de, CHEN Lian-shou. Advances of the study on Tibetan plateau experiment of atmospheric sciences [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, **17**(6):

756-772.

徐祥德,陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, **17**(6): 756-772.

- [4] LIANG Xiao-yun, LIU Yi-min, WU Guo-xiong. The Qinghai-Tibet plateau uplift for spring and summer atmospheric circulation influence in Asia[J]. *Plateau Meteorology*, 2005, **24**(6): 837-845.
- 梁潇云,刘屹岷,吴国雄. 青藏高原隆升对春、夏季亚洲大气环流的影响[J]. 高原气象, 2005, **24**(6): 837-845.
- [5] YAN Bao-dong, SONG Xiao-quan, 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.
- [6] MAO Jian-dong, HUA Deng-xin, HE Ting-yao. A compact mie scattering lidar and its observation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 284-288.
- 毛建东,华灯鑫,何廷尧. 小型米散射激光雷达的研制及其探测[J]. 光子学报, 2010, **39**(2): 284-288.
- [7] MARTUCCI G, MATTHEY R, MITEV V, *et al.* Comparison between backscatter lidar and radiosonde measurements of the diurnal and nocturnal stratification in the lower troposphere[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, **24**(7): 1231-1244.
- [8] MATTHIAS V, BALIS D, B? SENBERG J, *et al.* Vertical aerosol distribution over Europe: statistical analysis of Raman lidar data from 10 European aerosol research lidar network (EARLINET) stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D18): D18201.
- [9] SICARD M, PeREZ C, ROCADENBOSCH F, *et al.* Mixed-layer depth determination in the Barcelona coastal area from regular lidar measurements: methods, results and limitations [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, **119**(1): 135-157.
- [10] WANG Dong-xiang, SONG Xiao-quan, FENG Chang-zhong, *et al.* Coherent doppler lidar observes Bohai Sea and Huanghai Sea marine atmospheric boundary layer height research[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(s1): s101001.
- 王东祥,宋小全,冯长中,等. 相干多普勒激光雷达观测渤海黄海海洋大气边界层高度研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(s1): s101001.
- [11] 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**(8): 1233-1247.
- [12] BROOKS I M. Finding boundary layer top: application of a wavelet covariance transform to Lidar backscatter profiles [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, **20**(8): 1092-1105.
- [13] 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.
- [14] OYJ V. Vaisala ceilometer CL31 user's guide[M]. Vaisala Oyj, Helsinki, Finland, 2006.
- [15] BU Ling-bing, YUAN Jing, GAO Ai-zhen, *et al.* Fog and haze detection process based on ceilometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0901002.
- 卜令兵,袁静,高爱臻,等. 基于激光云高仪的雾霾过程探测[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0901002.
- [16] HAIJ M D, WAUBEN W, BALTINK H K. Continuous mixing layer height determination using the LD-40 ceilometer: a feasibility study [M]. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2007.
- [17] M?NKEL C, ROININEN R. Automatic monitoring of boundary layer structures with ceilometer[OL]. (2008-06-23) [2015-10-21]. [http://www.wmo.int/pages/Prog/www/IMOP/publications/IOM-104\\_TECO-2010/P2\\_17\\_Muenkel\\_Germany.pdf](http://www.wmo.int/pages/Prog/www/IMOP/publications/IOM-104_TECO-2010/P2_17_Muenkel_Germany.pdf).
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] LI Mao-shan, MA Yao-ming, HU Ze-yong, *et al.* Analysis of characteristics of atmospheric boundary layer in Nagqu area of northern Tibet[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, **23**(5): 728-733.
- 李茂善,马耀明,胡泽勇,等. 藏北那曲地区大气边界层特征分析[J]. 高原气象, 2004, **23**(5): 728-733.
- [21] LIU Cheng, MING Hai, WANG Pei, *et al.* Tibet Nagqu and Beijing suburb of tropospheric aerosol micro pulse laser radar measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1435-1439.
- 刘诚,明海,王沛,等. 西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的微脉冲激光雷达测量[J]. 光子学报, 2006, **35**(9): 1435-1439.