

# 结合激光雷达评估常规探空资料反演青藏高原混合层高度的适用性

王存贵<sup>1,2</sup> 李成才<sup>1,†</sup> 贺千山<sup>3</sup> 檀望舒<sup>1</sup> 初奕琦<sup>1</sup> 李建<sup>1</sup>

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 中国人民解放军 92914 部队, 临高 571820;  
3. 上海市气象局, 上海 201100; † 通信作者, E-mail: ccli@pku.edu.cn

**摘要** 利用微脉冲激光雷达探测资料, 采用梯度法获取那曲地区夏季的混合层高度序列及日最大混合层高度; 利用每日两次(08:00 和 20:00)的探空资料结合地面最大位温, 采用气块法得到雷达探测对应日期的日最大混合层高度(MMH)。通过对比从不同资料得到的 MMH, 发现 08:00 探空反演结果与激光雷达结果有较好的一致性(相关系数  $R$  为 0.85, 均方根误差 RMSE 为 0.30 km, 平均绝对误差 MAE 为 0.25 km, 并通过显著性水平为 0.95 的  $t$  检验); 20:00 探空反演结果则与激光雷达结果偏差相对较大( $R$  为 0.84, RMSE 为 0.67 km, MAE 为 0.54 km, 未通过  $t$  检验)。分析产生偏差的原因发现, 探空时刻的残余层、前期的天气变化过程以及对流泡活动或强卷夹过程引起的混合层高度时空变化等都可能都是导致 20:00 高度结果与激光雷达结果不一致的原因, 使得 20:00 探空资料不适合进行最大混合高度的反演。位温廓线的日变化特征也会影响反演结果的准确性, 导致 08:00 探空结果偏高, 但可以通过统计订正做修正。

**关键词** 青藏高原; 最大混合高度; 微脉冲激光雷达; 常规探空

**中图分类号** P407

## An Assessment with Lidar on the Applicability of Radiosonde Data in Retrieving the Mixing Height in Tibetan Plateau

WANG Cungui<sup>1,2</sup>, LI Chengcai<sup>1,†</sup>, HE Qianshan<sup>3</sup>, TAN Wangshu<sup>1</sup>, CHU Yiqi<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;  
2. 92914 PLA Troops, Lingao 571820; 3. Shanghai Meteorological Service, Shanghai 201100;  
† Corresponding author, E-mail: ccli@pku.edu.cn

**Abstract** With micro-pulse lidar (MPL) data, the max mixing height (MMH) in the summer of Naqu is retrieved by gradient method. With radiosonde data (twice daily at 08:00 and 20:00) and max potential temperature of Naqu in the corresponding date, MMH is retrieved by parcel method. The intercomparison between MMHs from the different data shows that the result from 08:00 radiosonde data consists well with MPL results, with correlation coefficient 0.85, root-mean-square error (RMSE) 0.30 km, mean absolute error (MAE) 0.25 km, and the  $t$ -test (0.95) passed. But the result from 20:00 radiosonde data has larger deviation from MPL results, with the correlation coefficient 0.84, RMSE 0.67 km, MAE 0.54 km and failed in the  $t$ -test. Deviation analysis shows that some factors such as the residual mixing layer in 20:00 soundings, some local weather process before the 20:00 launch time and the temporal-spatial variation of the mixing height induced by the thermal convective bubbles or/and the entrainment process may cause the inconsistency in the results. All above lead to the non-availability of the 20:00 radiosonde data in retrieving the mixing height. The character of the diurnal variation of the potential temperature profile will also affect the accuracy of retrieval result, which would produce a higher height from 08:00 data, and

some statistical corrections should be used to improve the result.

**Key words** Tibetan Plateau; max mixing height; micro-pulse lidar; radiosonde data

因其独特的地理位置和地形条件,青藏高原对我国乃至全球的大气环流、天气和气候都有重要影响。边界层作为连接高原下垫面和自由大气的桥梁,在各种热力、动力作用自高原向自由大气的传递中扮演着特殊而重要的角色。因此,对高原边界层特征的研究一直是科学家关注的重要课题<sup>[1]</sup>。混合层高度是大气边界层研究中的一个重要参数,它决定垂直方向上大气混合的空间距离,对于研究污染物扩散、环境监测以及污染物预报都有重要的意义<sup>[2-3]</sup>。近年来,针对青藏高原边界层已经开展多次观测试验和研究,基本上确认青藏高原地区的混合层高度高于平原地区<sup>[1,4]</sup>。

目前对边界层的研究大多依靠湍流试验、探空气球、系留气球、雷达探测及飞机观测等较短期和集中的专项观测试验进行,这些试验为研究地表向上的热动量输送、边界层结构特征及演变提供了珍贵数据资料。但是,由于青藏高原恶劣的自然条件,试验的实施非常困难且费用昂贵,在空间、时间上无法满足研究需求<sup>[1-2]</sup>,所以常规探空、探测仍是高原地区边界层研究的重要手段。气球探空可以从位温、水汽、通量等要素的垂直廓线特征得到边界层高度信息,虽然有探测瞬时性、时间分辨率低、高空位置偏离较大等缺点,但实施过程相对简单,探测与反演结果有较高可信度,加上探空业务台站分布较广,可以获得较长时间的资料(几十年)用于气候态变化特征研究。这些特点使气球探空成为最常用的反演边界层高度的方法<sup>[2,5-6]</sup>。

激光雷达探测以大气中的气溶胶粒子为示踪物,通过对雷达接收到的后向散射信号进行相关处理,获取边界层信息。由于具有高时空分辨率和全天候探测的优势,激光雷达探测在边界层结构和演变特征的研究方面有不可取代的作用,成为反演混合层高度最合适的方法之一,并在实际应用中发挥越来越重要的作用。但是,激光雷达探测受到很多因素(如造价、维护等)的影响,目前仍没有普及<sup>[2,5,7]</sup>。由于有连续探测资料的时间也较短,故无法利用激光雷达探测资料进行长时间序列的分析,但可以作为对其他探测手段的补充和验证。

最大混合高度(MMH)对应着混合最强时刻的最大涡旋尺度,是一个特殊的混合层特征参数。它

决定了垂直混合与垂直扩散的最大作用距离,在污染物扩散、环境预报等研究与实际应用中都有重要意义。本文的工作针对高原地区的最大混合高度特征展开。常规探空每天只有两次(北京时 08:00 和 20:00),并且这两个时刻都不是混合最强时刻。利用非混合最强时刻的探空廓线反演最大混合高度,对探测时刻各气象要素的垂直分布特征有很大的依赖性。高原地区的高海拔及复杂下垫面会引起强烈的热力、动力作用,由此引起的湍流、平流作用会导致边界层内气象要素的空间分布复杂多变<sup>[4]</sup>。因此,利用常规探空两个时刻的探空资料反演最大混合高度,其准确性与适用性需要利用其他探测试验进行验证。

本文利用激光雷达探测资料、08:00 与 20:00 探空资料及地面观测资料,对青藏高原地区的最大混合高度进行计算,得到基于各种资料的 3 种结果:  $MMH_{\text{lidar}}$ ,  $MMH_{08s}$  和  $MMH_{20s}$ , 以  $MMH_{\text{lidar}}$  为参照,对  $MMH_{08s}$  和  $MMH_{20s}$  进行对比与误差分析,并对比 08:00 与 20:00 探空资料反演结果的优劣,论证在高原地区使用探空资料反演 MMH 的可行性,为进一步利用探空资料分析高原地区 MMH 的气候态变化特征提供参考。

## 1 资料与方法

那曲地区位于青藏高原中部稍偏东北,地处高原腹地,观测台站坐标为 31.5°N, 90.1°E, 海拔 4508 m, 周边为相对平缓的半丘陵地形。本文所用资料为 2011 年 7 月 19 日至 8 月 25 日的激光雷达探测资料、对应日期 08:00 和 20:00 探空资料以及地面连续观测资料。其中,激光雷达发射波长为 532 nm, 采样频率为 2500 Hz, 发射功率约为 12  $\mu\text{J}$ , 数据集累积时间为 30 s (时间分辨率), 空间分辨率为 30 m, 每组信号包含背景噪声的均值  $\bar{S}$  和标准差  $S_d$  (选择 55~60 km 这 5 km 高度范围内的激光雷达接收信号作为背景噪声信号, 其平均值作为背景噪声的均值  $\bar{S}$ , 并求得噪声的标准差  $S_d$ )。因雷达重叠区影响, 低层 300 m 以下存在一个探测盲区, 这一点虽然对利用雷达信号反演边界层演变特征不利, 但对反演 MMH 没有影响。另外, 已经通过水平探测实验确定了重叠区订正因子<sup>[8]</sup>。探空资料和

地面观测资料为那曲气象台站的业务资料, 本文所用的地面最高位温值由地面观测资料通过位温公式得到<sup>[9]</sup>。探空气球的施放地点位于雷达探测地点的正东方向, 与雷达探测地点相距几十米, 采用 L 波段无线电探测系统(GTS1 型), 可探测地面至 25~30 km 高度的基本气象要素。探空资料中还提供了探测初始时刻测站上空云、天气现象等气象信息以及该次探测的仪器质量说明, 文中资料对应的探测仪器均检测合格。

### 1.1 激光雷达反演最大混合高度

激光雷达接收信号的强度与大气中的气溶胶粒子浓度有正相关关系, 与自由大气相比, 混合层中较大的气溶胶含量能够后向散射更多的发射能量, 而在混合层与自由大气交界的地方, 气溶胶浓度会突变减少, 在激光雷达信号廓线上也有对应的突变特征。因此, 使用激光雷达信号识别边界层高度, 并不需要复杂的气溶胶消光系数或气体浓度的反演, 只需要归一化的后向散射信号, 即可确定特征点高度<sup>[2,10]</sup>。

除不同高度距离上气溶胶粒子的后向散射信号外, 雷达探测器接收到的信号还受很多其他因素的影响。为了利用信号廓线的突变特征确定 MMH, 需要对接收的原始信号进行背景噪声订正、距离订正、重叠区订正和能量归一化等前期处理, 最后得到的归一化后向散射信号(NBR)公式为

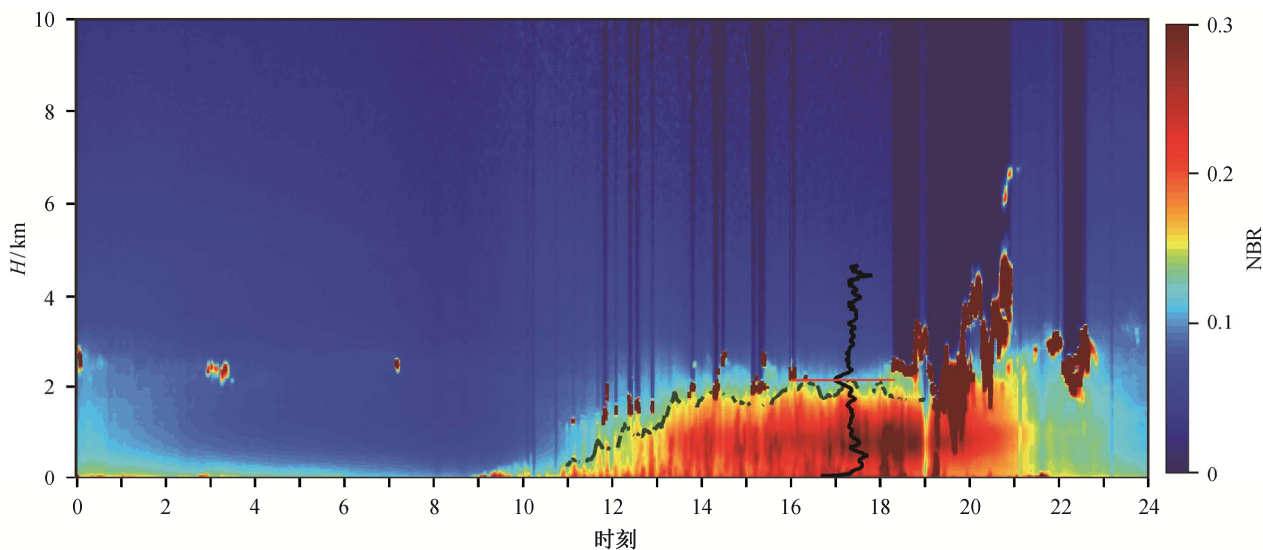
$$P(h) = \frac{(P_{\text{raw}}(h) - N_b)}{O(h)P_0} h^2,$$

其中,  $P_{\text{raw}}(h)$ 是激光雷达接收到的原始信号,  $h$ 是接收信号与探测器之间的垂直距离,  $P_0$ 是出射的激光能量,  $O(h)$ 是重叠区订正因子,  $N_b$ 是背景噪声。

对信号进行降噪处理时, 使用 Zhao 等<sup>[11]</sup>的方法, 利用噪声均值  $\bar{S}$  与标准差  $S_d$  对信号进行降噪处理, 具体步骤如下: 原始信号  $P_{\text{raw}}(h)$  减去背景噪声均值项  $\bar{S}$  后得到信号  $P_n$ , 从低层信号  $P_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $P_n$  对应 20 km 处信号) 开始, 依次对  $P_i$  和  $P_{i+1}$  进行对比, 若  $|P_i - P_{i+1}| \leq 3S_d$ , 则  $P_{i+1} = P_i$ , 反之,  $P_{i+1}$  不变, 得到一组信号值  $P_1$ ; 再从高层信号  $P_n$  开始, 向低层进行类似计算, 得到  $P_2$ , 取两组信号的平均值作为新的信号值。另外, 为进一步提高信噪比, 实际应用中常对激光雷达数据进行若干分钟的平均处理。本文对 NBR 做对应湍流特征时间尺度的 6 分钟平均<sup>[12]</sup>。

多年来, 已发展出多种用激光雷达信号反演混合层高度的方法。其中, 最常用的是梯度法: 对激光雷达信号求取梯度廓线后, 通过梯度极小值确定信号突变发生的位置(代表气溶胶浓度突然减小的高度, 即混合层高度)。有研究对几种常用的梯度廓线反演混合层高度方法进行对比分析, 得到的结论是: 通过 NBR 信号的二阶导数梯度廓线确定的 MMH 与探空方法得到的结果最为接近, 而 NBR 信号的一阶导数梯度廓线法和  $\log(\text{NBR})$  的一阶导数梯度廓线法得到的结果要偏高一些<sup>[2-3,7]</sup>。考虑到高原地区气溶胶含量较小, 噪声会对二阶导数法产生更大干扰, 本文选用更能体现 NBR 廓线中较弱信号的  $\log(\text{NBR})$  一阶导数来获取 NBR 信号的梯度廓线<sup>[10,13]</sup>。但是, 特殊天气条件(平流过来的气溶胶层)或者云层、剩余层会对信号的突变特征产生一些干扰, 又因为局部地区地表动力作用或者气溶胶源影响, 气溶胶浓度在低层起伏较大, 此时用导数法得到的梯度廓线会比较杂乱或出现多个极值, 从而产生错误的判断; 另外, 由于高原地区气溶胶浓度较低, 且激光雷达发射功率小, 因此得到的信号信噪比较低, 经常会在边界层内部出现多个梯度极值, 导致自动算法识别 MMH 会出现较大偏差(相关信号与梯度廓线图略)。为防止出现上述情况, 我们首先通过具体的 NBR 信号廓线, 剔除有明显云层存在时刻的梯度廓线数据, 然后在剩余的时间序列数据中, 人工判断当日 MMH 出现的大概时间  $t$  和大概高度  $H$ , 在  $t$  时刻前后 2 小时内对  $\log(P)$  在  $H$  附近寻找梯度极小值。该方法可以获取该时段内所有时刻的混合层高度, 最大高度  $H_{\text{max}}$  即为排除云层、气溶胶层干扰的 6 分钟平均 MMH (若该时段无连续梯度极值, 从其他时刻重新寻找 MMH 出现的大概时刻, 以确保 MMH 的有效性)。因为人工判断最大混合层高度的出现时间和范围时, 可以参考雷达信号的强度值和混合层高度的演变信息, 并能有效地排除明显的云层、残余层或者平流气溶胶层的干扰, 所以上述方法能保证 MMH 的准确性。该方法也有局限性, 比如有可能忽略混合层发展过程中对流热泡短时存在的影响, 且不能用于大量数据的自动算法。

通过梯度极值判断与人工辅助方法相结合, 得到那曲地区夏季典型日期的白天混合层高度日变化序列以及当天的 MMH, 如图 1 所示。可以看到, 早晨至 14:00 前后是混合加强时期, 混合层高度一



绿色曲线为混合层高度时间序列, 黑色曲线为 MMH 时刻的信号梯度廓线, 红色短线为确定的 MMH

图 1 2011 年 8 月 9 日的雷达 NBR 信号、混合层高度时间序列及当日的 MMH (雷达信号为任意单位)

Fig. 1 NBR signal with the time series of mixing layer height and MMH for August 9, 2011 (NBR are arbitrary units)

直稳定地升高。14:00—18:00 混合最强, 混合层高度因卷夹作用有上下起伏, 但变化较小。结合人工判断与信号梯度极值判断, 可以识别出混合层高度在 16:00—17:00 之间的某些时刻达到最高, 通过梯度极值廓线可以得到 MMH。从 NBR 信号也可以看到, 19:00 以后, 低层信号开始减弱, 表明地表开始冷却降温, 混合作用被抑制, 但混合层上部的残余层仍存在(较强的雷达信号一直持续到夜间)。

## 1.2 常规探空反演最大混合高度

混合层一般在下午发展到最高。本研究用到的探空数据是那曲气象台的常规探空资料, 探测时间分别为北京时 08:00 和 20:00, 因此利用 08:00 和 20:00 探空标准层数据无法直接确定大气的 MMH, 只能通过其他方式反演得到。气块法是较常用且可信度较高的一种利用探空资料和地面位温资料获取混合层高度的方法, 其基本步骤是利用距离混合层发展较近时刻的探空位温廓线和某一时刻  $t$  的地面位温数据, 将该地面位温向上延伸到与位温廓线相交, 交点确定的高度即定为  $t$  时刻的混合层高度, 其物理意义为地面附近的一个小气块绝热上升所能达到的平衡高度<sup>[2,14]</sup>。当地面位温取日最大位温值时, 得到的混合层高度就是 MMH。

图 2 是不同版本的气块法反演混合层高度示意图。早期, 气块法是直接使用地面观测的位温值作

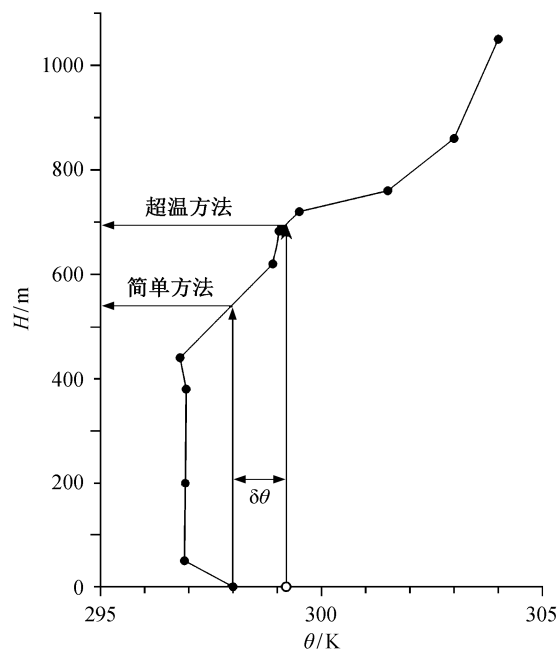


图 2 不同版本的气块法示意图(气块温度有两个选择:  $\theta$  和  $\theta + \delta\theta$ )<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Diagram of the parcel method of two versions with  $\theta$  and  $\theta + \delta\theta$ , respectively<sup>[2]</sup>

为气块抬升位温, 通过求算与位温廓线的交点高度来确定混合层高度。后来, 有研究者认为在对流条件下, 地面附近有一个超绝热层存在, 应该在此位温值的基础上加一个小的超温(excess temperature)

来提供向上的热通量能量,并给出超温  $\delta\theta$  的计算公式。但是,地面温度受地表附近超绝热层的影响,本身就有个超温值  $\delta\theta_0$ , 所以对于是否有必要再加上一个超温  $\delta\theta$ , 一直有争议。Seibert 等<sup>[2]</sup>通过试验发现,探测得到的超温  $\delta\theta_0$  有随机性,但它的量(一般为 2 K)远远大于利用超温公式得到的超温  $\delta\theta$  (0.5 K),若再将  $\delta\theta$  与  $\delta\theta_0$  相加组成新的超温,作用有限且不确定性增大。因此,本文直接采用日最大位温值作为气块抬升位温,以此确定 MMH。虽然气块法使用了多种假设,但它最接近混合层的定义,是对边界层日变化的合理估计,其结果的合理性已在实际应用中得到验证<sup>[7,13]</sup>。

2 结果比较与偏差分析

混合层特征在不同方面的表现,是激光雷达和探空方法反演 MMH 的基础。气块法确定的混合层高度一般对应逆温层中间位置,由于对流热泡作用,气溶胶粒子会出现一个“超射”,因而使用气溶胶浓度梯度确定的混合层高度会偏高。虽然方法不同,但确定的 MMH 都反映了混合层特征,不同方法的结果之间有较好的一致性<sup>[2-3,14]</sup>。因此,本文在对  $MMH_{08s}$  和  $MMH_{20s}$  进行分析时,将  $MMH_{lidar}$  作为参照,以验证探空数据反演高原大气 MMH 的适用性。

2.1 激光雷达与常规探空反演 MMH 结果比较

利用激光雷达与常规探空同时存在有效探测的部分日期探测资料,分别依照前面所述的反演方法,得到各自的 MMH 结果(图 3)。图 3 中,纵坐标用  $MMH_{soundings}$  代表  $MMH_{08s}$  和  $MMH_{20s}$ , 星号和圆圈分别表示  $MMH_{08s}$  和  $MMH_{20s}$  与  $MMH_{lidar}$  的散点分布,实线是 1:1 线,虚线是最小二乘法得到的  $MMH_{08s}$  与  $MMH_{lidar}$  的线性回归方程。从图 3 可以看到,圆圈多在 1:1 线右下侧,说明 20:00 探空数据得到的反演结果比激光雷达结果偏低,星号则较均匀地分布在 1:1 线两侧,并呈现较好的线性关系,拟合直

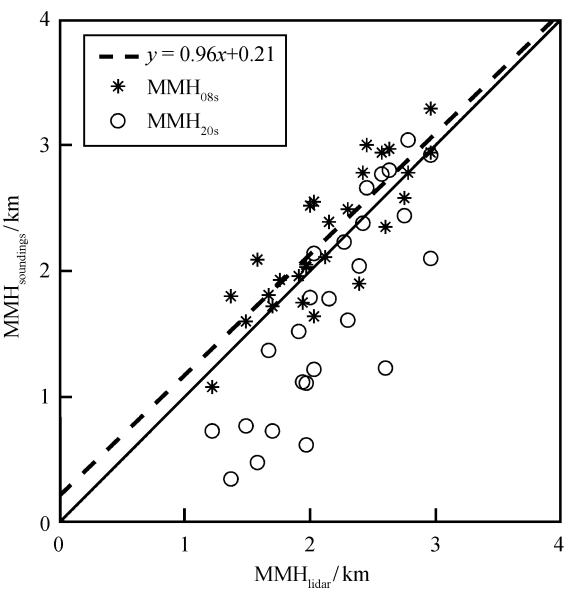


图 3 激光雷达与探空资料反演 MMH 散点图  
(样本数:  $N_{08s}=28$ ,  $N_{20s}=26$ )

Fig. 3 Scatter plot of the MMH from lidar method and radiosonde method with  $N_{08s}=28$  and  $N_{20s}=26$

线的斜率为 0.96, 截距为 0.21 km。在对  $MMH_{08s}$  和  $MMH_{20s}$  进行误差分析时,以  $MMH_{lidar}$  为参照,分别计算相关系数( $R$ )、均方根误差(RMSE)、平均相对误差(MRE)、平均绝对误差(MAE)和各自的均值,并进行  $t$  检验<sup>[15-16]</sup>, 结果见表 1。

根据  $t$  检验查算表,在样本数为 28 (26)时,  $t_{0.05}$  为 2.05 (2.06)。 $|t_{08s}| < t_{0.05}$  说明  $MMH_{08s}$  与  $MMH_{lidar}$  之间没有产生系统误差,  $|t_{20s}| > t_{0.05}$  表明  $MMH_{20s}$  与  $MMH_{lidar}$  存在较大偏差。与  $MMH_{20s}$  相比,  $MMH_{08s}$  在各项误差分析指标中均表现出与  $MMH_{lidar}$  有更好的一致性,其相关系数为 0.85 (通过 95%显著性水平检验), 均值偏差为 100 m。可以推断,虽然 08:00 与 MMH 发生时刻(高原地区多在北京时间下午至傍晚)的时间间隔较长,但  $MMH_{08s}$  仍能较好地体现真实的 MMH 情况,因此使用 08:00 探空数据反演混合层高度并用于气候态变化特征分析有一定的可行性。 $MMH_{20s}$  与  $MMH_{lidar}$  虽然线性关系较好

表 1 对比统计参数  
Table 1 Comparison of statistical parameters

MMN	$R$	均值/km (不同 $N$ 值)	RMSE/km	MAE/km	MRE/%	$t$
$MMH_{lidar}$	1.00	2.14 (2.16)	0	0	0	0
$MMH_{08s}$	0.85	2.27	0.30	0.25	12	0.95
$MMH_{20s}$	0.84	1.69	0.67	0.54	28	-2.50

(相关系数  $R$  为 0.84, 通过 95% 显著性水平检验), 但其他指标(均值、均方根误差等)偏差较大, 并且未通过  $t$  检验。从图 3 可以看出  $\text{MMH}_{20\text{s}}$  明显偏低(尤其在混合层高度较低时), 说明使用 20:00 探空数据反演 MMH 会产生相对较大的偏差。从反演方法上分析, 气块法确定的 MMH 是地面最大位温向上的延伸线与探空位温廓线的交点高度,  $\text{MMH}_{20\text{s}}$  偏低说明地面位温延长线与位温廓线在较低的高度相交, 即 20:00 的位温廓线特征影响了反演结果。这可能是由以下一种或几种原因导致的: 1) 大气残余层的存在会对使用气块法确定 MMH 产生干扰; 2) 平流、对流引起的天气过程改变了 20:00 边界层大气的位温分布, 会影响气块法确定 MMH; 3) 与雷达探测不同, 20:00 探空获得的是单点瞬时的位温廓线, 在大的时空尺度上不具有代表性<sup>[17]</sup>。上述几个因素只是基于本文所用方法或物理过程的猜测, 造成偏差的具体原因有待细致分析。

## 2.2 偏差原因分析

利用激光雷达信号的梯度廓线特征得到的 MMH, 实际上是气溶胶垂直分布中出现突变的位置, 与传统的热力/动力方法确定的 MMH 不一定完全吻合<sup>[10]</sup>, 并且, 一些湍流或非湍流过程也会对探空探测的物理参量垂直廓线造成影响<sup>[2]</sup>。有研究指出, 对激光雷达信号进行对数化处理后, 再用一阶导数法确定的最大混合高度( $\text{MMH}_{\text{lidar}}$ )略高于探空方法得到的 MMH<sup>[12-3]</sup>。本文中得到的  $\text{MMH}_{\text{lidar}}$  结果却略微低于  $\text{MMH}_{08\text{s}}$  (均值偏差 100 m 量级),  $\text{MMH}_{20\text{s}}$  与  $\text{MMH}_{\text{lidar}}$  的偏差更大。

研究发现, 有些情况(如平流等天气过程)会对混合层的垂直结构产生影响, 从而影响位温的垂直结构, 在这种情况下使用气块法确定混合层高度就会产生偏差<sup>[17]</sup>。夏季是青藏高原的雨季, 地形、地貌等下垫面特性导致的区域性天气变化特征尤其明显, 这些天气现象与天气过程都会影响大气的垂直结构<sup>[4,18]</sup>, 进而影响 20:00 探空数据的代表性。根据探空气球施放时刻的气象资料及当日地面站观测资料, 在北京时 14:00—20:00 期间, 风速往往会有一个突然增大的现象(0~2 m/s 增大至 3~5 m/s), 26 天的探测中有 20 天在气球施放时刻上空存在低云, 且云量在六成以上(云属性多为层积云、积云及积雨云), 20 天中有 5 天在施放时刻或之前 6 小时内探空站出现降水。这些观测事实说明, 在地面加热、水汽和地形等条件作用下, 台站上空或者周边

地区的天气曾经或正在发生变化, 都会对正常的大气位温廓线产生“污染”, 从而对气块法确定 MMH 产生干扰。20:00 位温廓线呈现不平稳变化, 或出现明显分层状态的情况确实较多(图略)。虽然不清楚具体原因, 但考虑到高原复杂地形引起的热力、动力强迫作用, 有可能是气团流经非均一下垫面或者前述天气过程等原因导致。这些都说明 20:00 位温廓线的区域代表性较差, 导致使用气块法得到的 MMH 偏差较大。

还应注意, 气块法虽然物理意义清晰, 但它体现的是边界层大气的理想混合状态。理想状态下, 混合层中大气位温的垂直分布  $\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \approx 0$ , 而真实的位温廓线在垂直方向会有波动甚至倾斜, 不是一条标准的垂直线, 有边界层云存在时也是如此<sup>[9]</sup>, 在这种情况下, 使用气块法确定 MMH 就可能出现偏差。

另外, 北京时 20:00 对应着那曲地方时 18:00 左右, 该时刻接近混合层发展最强时刻, 混合层上层的位温信息会保留下来(残余层), 在这种情况下, 使用气块法确定的 MMH 会偏低。图 4 显示 20:00 廓线中有明显的残余层存在, 而残余层的干扰会使得利用气块法得到的 MMH 偏低。同时, 本文使用的地面位温资料来自三小时观测数据集, 由此得到的最大位温可能比真正的最大位温偏低一些, 在残余层存在时, 这种情况产生的偏差更大, 得到的 MMH 更低。基于上述结果对比和偏差原因分析, 可以判断, 使用 20:00 探空位温廓线反演 MMH 会产生较大偏差。

入夜以后, 没有太阳辐射的加热作用, 大气会由低层到高层逐渐冷却(稳定边界层), 经过足够长的时间以后, 低层大气不论在空间还是时间上都会达到一个相对的稳定和平稳状态。基于这个原因, 尽管 08:00 与混合层发展最旺盛时刻的时间间隔较长, 但是利用该时刻位温廓线结合地面最大位温得到的 MMH 结果反而更稳定和准确。使用 08:00 位温廓线反演 MMH, 有一个较显著的偏差来源是位温廓线的日变化, 因为日出以后, 低层位温随着混合层发展会逐渐升高。虽然增温率随高度递减, 且对边界层附近及以上的影响会越来越小, 但是, 即使这样, 08:00 位温廓线也不能完全代表混合层最强时刻的大气真实状态, 忽略位温廓线的日变化仍会引入误差<sup>[10,13]</sup>。我们选用边界层在 20:00 仍保持混

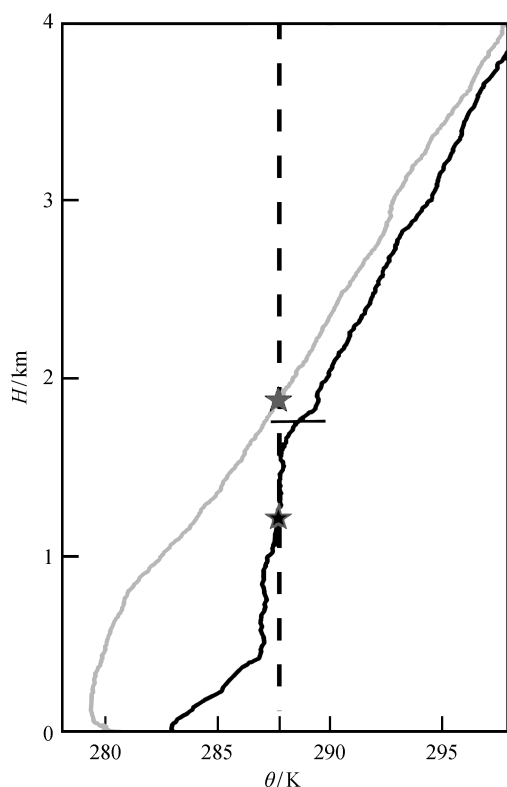


图 4 08:00 (灰色曲线)和 20:00 (黑色曲线)位温廓线,利用气块法确定的 MMH (五角星)和 20:00 残余层位温确定的 MMH (短横线)(2011 年 8 月 20 日)

Fig. 4 Profiles of potential temperature at 08:00 (gray line) and 20:00 (black line) and MMHs derived by parcel method with the profiles (pentagrams) and determined from 20:00 residual layer (horizontal line) (August 20, 2011)

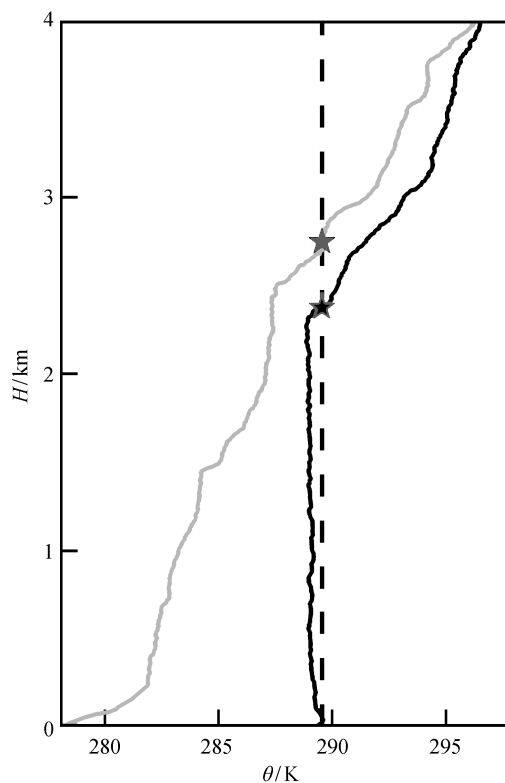


图 5 08:00 (灰色曲线)和 20:00 (黑色曲线)位温廓线及利用气块法确定的 MMH (五角星)(2011 年 8 月 11 日)

Fig. 5 Profiles of potential temperature at 08:00 (gray line) and 20:00 (black line) and MMHs derived by parcel method with the profiles (pentagrams) (August 11, 2011)

合状态的特例作为说明(此处以 8 月 11 日为例)。从图 5 可以看到,使用 08:00 位温廓线会得到一个偏大的  $MMH_{08s}$  值,这在上述的结果分析中也有体现( $MMH_{08s}$  偏高,均值偏差 100 m 量级,拟合直线截距为 0.21 km)。位温廓线日变化引起的偏差可以通过对 08:00 廓线和 20:00 廓线在混合层高度附近的长时期统计进行订正,进而对  $MMH_{08s}$  进行修正。杨东伟等<sup>[10]</sup>对香港地区探空资料进行统计修正后,得到更合理准确的混合层高度结果,我们下一步工作中可以作为参考。

另一个可能的原因是,随着气球漂移,激光雷达探测点与探空探测点的水平距离会增大,由此引起的激光雷达与探空的水平不一致性会导致偏差<sup>[2]</sup>。热力对流过程中会有较多的对流热泡活动,也会产生不同程度的卷夹作用,而热泡、烟羽在对流边界层中占据 42% 的水平面积,其余空间由下曳气流充

斥<sup>[9]</sup>,大气在水平方向上不均一,此时的单时单点探测很难体现混合层发展的区域平均状态,得到的 MMH 结果很可能偏差较大。以 8 月 24 日为例(图 6),当天 20:00 探空得到的位温廓线反映当时的混合层处在强盛阶段。可以看到,同时段激光雷达探测得到的 MMH 结果与探空反演结果不一致,二者的偏差达到 800 m。分析其成因,气球探空捕捉的是空间某位置的瞬时气象要素特征,激光雷达探测得到的是雷达上空当天的气溶胶浓度分布,通过反演得到的也是雷达上风向某一区域的最大 MMH,因为高原更强的热力、动力作用会引起较多的对流热泡及相关卷夹运动,就可能导致激光雷达与探空反演 MMH 的不一致<sup>[10]</sup>。经过夜间辐射降温冷却后,08:00 大气层结稳定,位温廓线在水平方向有较好的一致性,垂直方向上变化均匀,通过气块法反而可以得到更稳定、更有区域代表性的 MMH,因此,08:00 廓线比 20:00 廓线更适用于混合层高度反演。



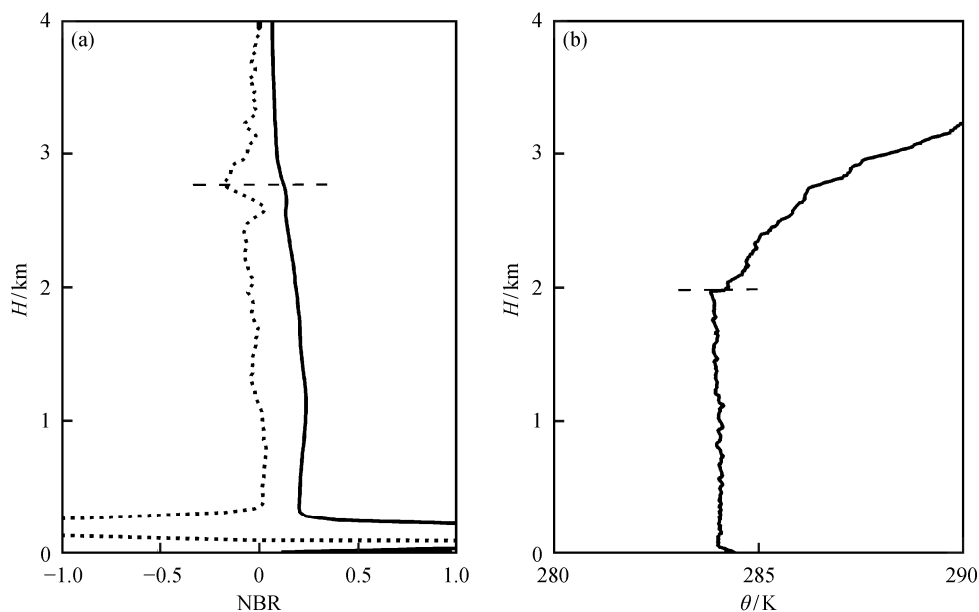


图 6 NBR 信号(任意单位)及信号取对数后的梯度廓线与确定的 MMH (横虚线) (a), 位温廓线与确定的 MMH (横虚线) (b)  
Fig. 6 Profiles of NBR signal (arbitrarily units) and gradient of the signal's logarithm with MMH (marked by horizontal dash line) derived by the gradient (a), profiles of potential temperature at MMH moment with MMH (marked by horizontal dash line) (b)

### 3 总结与讨论

本文利用青藏高原东部那曲地区 2011 年 7—8 月部分日期的 MPL 数据以及 08:00 和 20:00 探空数据, 分别用梯度法和气块法对 MMH 进行反演, 并对结果进行比较与分析。结果表明, 利用 08:00 探空数据得到的  $MMH_{08s}$  与利用 MPL 数据得到的  $MMH_{lidar}$  有较好的一致性(相关系数为 0.85, 均值接近, 均方根误差为 0.30 km, 平均相对误差为 12%, 并且通过 0.95 置信水平的  $t$  检验), 而  $MMH_{20s}$  与  $MMH_{lidar}$  的偏差较大(相关系数为 0.84, 均值偏差、均方根误差和平均相对误差都较大, 未通过  $t$  检验)。通过结果比较, 可在一定程度上表明, 使用 08:00 探空数据反演 MMH 以及对 MMH 进行长时间序列的反演和分析有一定的可行性。

通过对可能引起偏差的原因进行分析, 我们认为区域天气过程(如降水、平流以及大的对流泡或者卷夹过程等)可能影响 20:00 位温廓线的代表性, 20:00 探空位温廓线上带有的残余层信息等也会导致 20:00 探空资料得到的 MMH 偏差较大。探空因为经过前夜较长时间的辐射冷却过程, 低层位温降低到一个稳定少变的状态, 且没有残余层的影响, 因此使用 08:00 廓线反而会得到较稳定、准确的 MMH。另外, 位温廓线的日变化特征会影响探空

资料反演 MMH 的准确性, 使  $MMH_{08s}$  偏大。

本文只分析了那曲地区夏季部分日期的数据, 所有结论都是基于有激光雷达探测的二十多天的反演结果。青藏高原的地形复杂, MMH 在各个地区及不同季节很可能呈现不同的特征<sup>[1]</sup>, 使得上述结论不足以代表高原其他地区和其他季节的 MMH 特征, 因而需要更多加密探空或激光雷达资料, 对探空数据在 MMH 反演上的适用性提供更准确、更量化的分析。另外, 也需要对 08:00 探空资料进行统计修正, 才能得到更准确的 MMH, 以便为使用长时间序列的探空数据研究高原地区的 MMH 气候态变化特征提供依据。

### 参考文献

- [1] 李英, 胡志莉, 赵红梅. 青藏高原大气边界层结构特征研究综述. 高原山地气象研究, 2012, 32(4): 91-96
- [2] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. Atmospheric Environment, 2000, 34(7): 1001-1027
- [3] Beyrich F. Mixing height estimation from sodar data — a critical discussion. Atmospheric Environment, 1997, 31(23): 3941-3953
- [4] 周明煜. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研



- 究. 北京: 气象出版社, 2000: 57-77, 100-109
- [5] Summa D, Girolamo P D, Stelitano D, et al. Characterization of the planetary boundary layer height and structure by Raman lidar: comparison of different approaches. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(3): 5195-5216
- [6] Sicard M, Pérez C, Rocadenbosch F, et al. Mixed-layer depth determination in the Barcelona Coastal area from regular lidar measurements: methods, results and limitations. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 119(1): 135-157
- [7] Menut L, Flamant C, Pelon J, et al. Urban boundary-layer height determination from lidar measurements over the paris area. *Appl Opt*, 1999, 38(6): 945-954
- [8] Campbell J R, Hlavka D L, Welton E J, et al. Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites: instruments and data processing. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2002, 19(19): 431-442
- [9] 盛裴轩. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003: 134-135, 262-265
- [10] 杨东伟. 大气边界层和气溶胶的激光雷达探测研究[D]. 北京: 北京大学, 2014: 37-41, 52-55
- [11] Zhao C, Wang Y, Wang Q, et al. A New cloud and aerosol layer detection method based on micropulse lidar measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(11): 6788-6802
- [12] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988: 117-120, 515-520
- [13] Yang D, Li C, Lau A K, et al. Long-term measurement of daytime atmospheric mixing layer height over Hong Kong. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(5): 2422-2433
- [14] Holzworth G C. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Mon Weather Rev*, 1964, 92(5): 235-242
- [15] Hennemuth B, Lammert A. Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 120(1): 181-200
- [16] 程水源, 张宝宁, 李现丽. 用清晨探空曲线确定混合层高度的研究. *环境科学丛刊*, 1992, 13(3): 76-80
- [17] Kuribayashi M. Temporal Variation and Vertical Structure of the Marine Atmospheric Mixed Layer over the East China Sea from Mie-Scattering Lidar Data. *Scientific Online Letters on the Atmosphere Sola*, 2011, 7: 189-192
- [18] 戴加洗. 青藏高原气候. 北京: 气象出版社, 1990: 114-123, 234-236