

利用探空秒数据估算北京地区日最大混合层高度

王越昊^{1,2} 李成才^{1,†} 初奕琦³ 檀望舒¹ 任静静¹

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 91197 部队, 青岛 266405;
3. 北京无线电测量研究所, 北京 100854; † 通信作者, E-mail: ccli@pku.edu.cn

摘要 研究利用北京地区 L 波段探空秒数据和地面日最大位温, 采用气块法反演北京地区日最大混合层高度 (MMH) 的可行性。将 08 时探空秒数据以及常规探空数据反演结果分别与对应的微脉冲激光雷达反演结果相比较, 发现前者与激光雷达反演结果的一致性好于后者, 常规探空数据垂直空间分辨率低可能是导致其反演结果误差较大的原因。分别用春夏秋冬的探空秒数据反演结果与激光雷达反演结果相比较, 发现春夏秋反演结果的一致性较好, 而冬季较差。利用 08 时探空秒数据结合地面日最大位温, 采用气块法反演北京地区 2010—2017 年的 MMH, 发现 MMH 每年均表现出春夏秋冬逐次递减的分布特征。通过对长期资料的统计分析发现, 北京地区日地面最高气温与 850 hPa 温度差定义的热力稳定度与 MMH 之间存在较强的正相关性。

关键词 日最大混合层高度 (MMH); L 波段探空雷达秒数据; 微脉冲激光雷达; 北京地区

Estimating the Daily Atmospheric Maximum Mixing Height with 1-Second Sounding Data over Beijing Area

WANG Yuehao^{1,2}, LI Chengcai^{1,†}, CHU Yiqi³, TAN Wangshu¹, REN Jingjing¹

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. 91197 PLA Troops, Qingdao 266405; 3. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854; † Corresponding author, E-mail: ccli@pku.edu.cn

Abstract Basing on the 1-second sounding data from L-band radar and the daily max potential surface air temperature over Beijing, the possibility of deriving the daily maximum mixing layer height (MMH) over Beijing region by the parcel method was studied. By comparing the inversion results of the 1-second sounding data and the conventional sounding data at local time 08:00 with the inversion results from a micro pulse lidar (MPL), it is found that the consistency between the former and the MPL results is better than the latter. The reason for the larger bias from the conventional data results may be due to their lower vertical resolution. By comparing the inversion results of the 1-second sounding data in spring, summer, autumn and winter respectively with the results from the MPL, it is found that the consistency is better in spring, summer and autumn, but it is worse in winter. Long-term data results of the MMH over Beijing area from 2010 to 2017 were obtained using the 1-second sounding data at local time 08:00 and the daily maximum potential surface air temperature. It is found that the MMH almost showed a decreasing characteristic from spring to summer, to autumn and to winter successively. With the long-term results, it is found that the thermal stability defined by the difference of the daily max surface air temperature and temperature at the layer of 850 hPa was strongly positively correlated with the MMH in Beijing area.

Key words daily maximum mixing layer height (MMH); L-band radar 1-second sounding data; micro pulse lidar; Beijing area

近年来,随着经济的快速发展,北京地区经常出现严重的空气污染天气^[1],成为全球气溶胶浓度最高的地区之一^[2]。研究大气边界层的发展和演变特征是研究该地区空气污染机制的必要前提。

大气边界层是大气层的最低层。受湍流和垂直混合作用影响,该层中动量、热量、气体以及气溶胶呈现快速扰动现象,在地表与自由对流层之间进行交换^[3]。在大气边界层特征参数中,混合层高度(mixing layer height, MLH)是重要的特征参数之一。混合层高度指受到地面直接影响的气层高度,在这一大气层中,被排放或卷夹进来的污染物或者其他成分在约 1 小时的时间尺度内,在热对流或机械湍流作用下进行垂直的混合扩散^[4],混合层高度是影响大气污染物和水汽垂直扩散的重要因素^[5]。日最大混合层高度(daily maximum mixing layer height, MMH)对应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,它决定来自地面的各种物质在垂直方向混合与扩散在当日达到的最大高度,在环境监测和空气质量预报等的研究与实际应用中都具有重要意义^[6-7]。为了方便起见,本文中 MMH 均为日最大混合层高度。一般来说,日最大混合层高度发生在白天午后热力边界层最旺盛时分。

目前,对 MLH 的观测主要通过飞机探测、地面遥感和气象无线电探空 3 种途径。

飞机探测可以获取高分辨率的气象要素以及污染物剖面,但由于受空中交通管制和飞行成本高等因素的限制,很难进行长时间的探测。

地面遥感是近年来兴起的可以获得较高垂直空间和时间分辨率的探测手段,目前已成为最先进的 MLH 测量方法。地面遥感探测 MLH 的主要手段有声雷达温度探测、多普勒雷达风廓线探测以及激光雷达气溶胶探测等。声雷达探测高度通常小于 1000 m,不利于在对流状态下观察 MLH。风廓线雷达的最低探测高度通常在 200 m 以上,垂直分辨率为 50~250 m,这就使得风廓线雷达数据对 MLH 不具有较好的解释性。激光雷达观测技术近年来发展迅速,使 MLH 的反演探测方法不断完善^[5]。

气象无线电探空也称常规探空,其实施过程相对简单,探测与反演 MLH 的结果有较高的可信度,探空业务台站分布较广,具备几十年的历史资料。这些特点使得利用常规探空资料获取 MLH 仍然是最常用的手段,特别是在研究 MLH 的年际和季节性变化特征方面,是其他投入使用时间较短的地面

遥感手段无法比拟的。然而,常规探空具有探测瞬时性和时间分辨率低等缺点,大多数站点只在北京时间 08 时和 20 时进行两次观测,且观测数据的垂直分辨率基本上对应分钟级别的气球上升时间段。

几十年来,众多研究者对北京地区的 MLH 做了一系列的观测与研究。张霁琛等^[8]利用低空探测等资料,对北京地区夏季和冬季混合层进行观测,结果表明混合层在夏季发展比较旺盛,午后 MLH 可达 1200 m,冬季则只有 500~600 m。程水源等^[9]利用首都机场探空数据,探测北京地区逆温和大气温度廓线特征,并测试了 4 种计算 MLH 的方法。尤焕琴等^[10]利用北京观测站常规探空数据,分析北京地区 38 年的 MMH 变化情况,比较 2004—2007 年北京地区空气质量等级与 MMH 的关系,得出 MMH 呈现冬季低夏季高的特征,且 MMH 与空气质量等级有较明显的负相关关系的结论。

虽然近年来利用激光雷达等地面遥感技术探测北京地区 MLH 的研究逐渐增多,但是由于起步较晚,没有较长时间的资料积累,所以在研究北京地区 MLH 的年际和季节性等长期变化特征时,仍主要依靠常规探空数据。

立足于探空数据反演 MMH 较常用的方法是 Holzworth^[11]1964 年提出的干绝热法,也称为气块法。本文首先验证此方法的合理性,然后以目前反演北京地区 MMH 效果较好的激光雷达反演方法为参考,对分别利用 08 时探空秒数据以及 08 时常规探空数据,采用气块法反演的 MMH 进行线性拟合和误差分析,获取拟合结果较好的数据类型以及拟合结果的季节性变化特征,论证在北京地区通过使用探空秒数据反演 MMH 来进行年际和季节性变化研究的可行性。最后,鉴于探空秒数据比常规探空数据具有更高的垂直空间分辨率,且前者反演的 MMH 结果好于后者,利用 2010—2017 年 08 时探空秒数据反演北京地区的 MMH,分析这 8 年的季节性变化特征,并通过定义热力稳定度,讨论热力稳定度与 MMH 之间的关系。

1 数据与方法

1.1 数据介绍

本研究中用到的数据如下:北京大学物理楼顶微脉冲激光雷达(Micro Pulse Lidar, MPL)观测数据,观测时间为 2016 年 4 月至 2017 年 10 月;北京市南郊气象站(站号为 54511)的常规探空数据,观测时

间为2016年4月至2017年10月每日08时;北京市南郊气象站(站号为54511)的L波段探空雷达秒数据,观测时间为2010年1月至2017年10月每日08时以及2010—2017年每年6—8月夏季汛期每日14时;北京地区自动气象观测站(Automatic Weather Station, AWS)数据,观测时间为2010年1月至2017年10月,提供半小时分辨率的地面常规气象数据。

1.2 激光雷达反演日最大混合层高度

激光雷达是地面遥感探测混合层高度(MLH)的重要手段之一,它以气溶胶为示踪物,利用气溶胶浓度在混合层顶向自由大气过渡的区域中快速降低的特性,通过气溶胶归一化相对后向散射信号(normalized relative backscattering signals, NRB),间接地判断混合层顶的位置。

传统的激光雷达反演MLH算法多基于NRB信号,通过各种方式查找NRB信号的突变,进而判断气溶胶浓度的变化情况,确定MLH(气溶胶浓度突然减少的高度即为MLH),如贺千山等^[12]2005年提出的归一化梯度法以及王珍珠等^[13]2008年提出的极小值法。但是,在重污染情况下,上层的NRB信号会因下层消光作用的影响而大大减弱,此时在MLH附近的NRB信号值可能远低于近地面信号,导致NRB信号的梯度极值出现在近地面附近而非MLH处。在这种情况下,需要对NRB信号进行对数化处理,得到在垂直方向上量级相近的In(NRB)梯度廓线,以便消除上层NRB信号衰减过多造成的影响。另一方面,在气溶胶稀少的洁净天气条件下,NRB信号很弱,因此容易受到噪声的干扰,使结果可信度变差。在北京地区,重污染天气和洁净天气都会出现,需要激光雷达反演MLH的算法能够对这些极端天气条件有良好的适应性。

本文使用的利用MPL资料反演MLH的算法是由初奕琦^[14]针对北京地区MLH的特点提出的人工辅助算法。首先,该算法利用激光雷达线性退偏振比(linear depolarization ratio, DEP),具有不受下方气溶胶消光作用的影响以及在气溶胶稀少时仍具有较高可信度与信噪比的特点,将对数化NRB信号与DEP相结合,反演结果在洁净天气以及重污染天气时均表现良好(DEP为单位体积含气溶胶气团的后向散射信号中正交与平行方向偏振信号强度的比值,利用混合层中气溶胶高DEP以及自由大气中空气分子低DEP的特点可以较好地判断MLH)。其次,

该算法优化了对清晨接近或低于盲区高度的MLH的识别,使MLH的识别下限降低,大大地提高对清晨MLH的识别效果。最后,该算法结合人工识别方法,先在图像上通过肉眼判断每天MLH时间序列的大致轮廓,为算法提供一个粗略的参考值,再在这个参考值的一定范围内查找最近的DEP或者In(NRB)梯度极值点,作为MLH反演结果。

通过该算法得到的北京地区MLH和MMH的可信度较高,可以作为标准来检验其他数据或算法反演的MLH或MMH。本文中视利用激光雷达数据以及该算法识别的MMH为真值,将此算法简称为人工辅助算法。

1.3 探空数据反演日最大混合层高度

1.3.1 理查森数法反演混合层高度

理查森数法是基于边界层理论和探空资料计算混合层高度的基本方法。我们使用理查森数法反演的MLH作为检验气块法反演MLH的比对标准。参照Sicard等^[15]2006年提出的方法,计算理查森数(R_i)的公式如下:

$$R_i(z) = \frac{g(z-z_0) [\theta(z) - \theta(z_0)]}{\theta(z) [u(z)^2 + v(z)^2]}$$

式中, g 是重力加速度, z_0 是地面海拔高度, θ 是位温, u 和 v 分别为纬向和经向风分量。理论和实验证明,当 $R_i > R_c$ (临界理查森数)时,湍流运动转变成层流运动,因此该方法主要依赖于临界理查森数 R_c 的选取。本文选取 R_c 值为0.25,将首次 $R_i/R_c > 1$ 的高度作为MLH。

1.3.2 气块法反演日最大混合层高度

气块法立足于探空数据以及地面常规气象数据反演MMH,具有较高的可信度,被众多研究者广泛使用^[5-7,10,14,16],成为反演MMH的常用方法之一。气块法反演MLH的依据如下:白天,随着太阳辐射的加强,近地层大气被加热,混合层开始发展,在充分混合的混合层内部,位温表现为随高度变化几乎不变的特征。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^[11]。如图1所示,沿地面观测的大气位温画上添线,该上添线与当日早晨08时探空位温廓线的交点高度即为当时的MLH,当地面位温取日最大值时,得到的MLH就是MMH。由于大多数探空数据只有08时和20时的两次观测数据,因此无法获得地面位温日最大

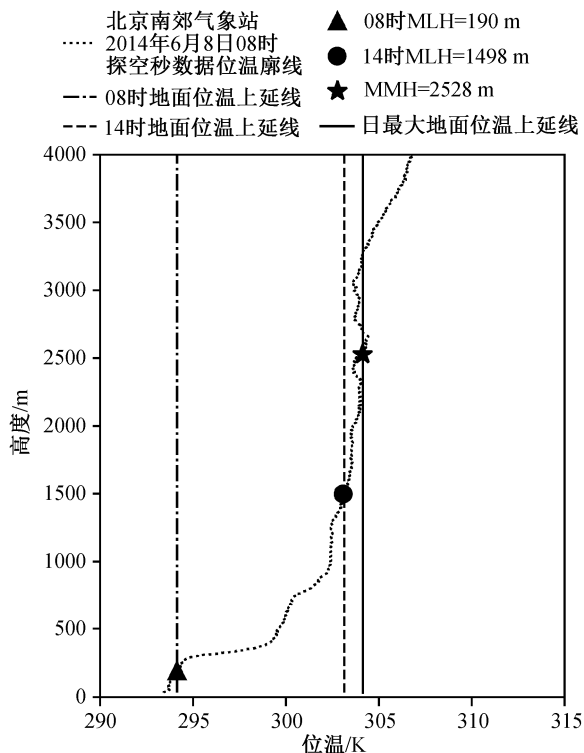


图1 气块法确定日最大混合层高度示意图
Fig. 1 Diagram of the determination of MMH by the parcel method

时刻的探空曲线,所以在利用探空数据采用气块法反演MMH的过程中,还需要应用白天位温廓线在自由大气中随时间几乎不变的假设。

2 结果与分析

2.1 验证气块法反演日最大混合层高度的合理性

验证气块法利用08时位温廓线和地面日最大位温反演MMH的可行性,需要检验两个假设带来的混合层估计偏差:1)混合层内位温随高度不变;2)白天位温廓线在自由大气中随时间几乎不变。

首先,检验第一个假设可能带来的偏差。在白天午后时分,如果具备探空观测数据,可以直接利用理查森数法计算MLH,此时利用气块法得到的MLH的误差主要来自混合层是否充分发展以及位温随高度是否不变。将气块法所得结果与理查森数法的结果相比较,可以得到由此假设带来的混合层高度估计偏差。选用北京南郊气象站2010—2017年每年6—8月夏季汛期每日北京时间14时的探空秒数据,对理查森数法反演的14时MLH与气块法利用14时地面位温反演的MLH做拟合分析,结果如图2所示。去除空值和异常值,有效数据样本数

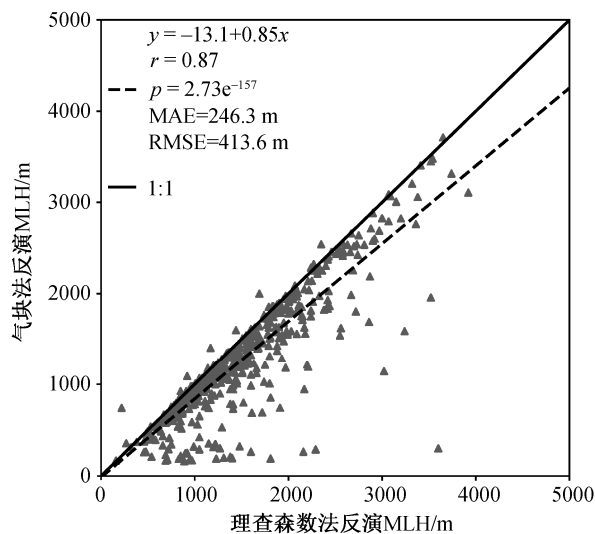


图2 理查森数法计算14时MLH与气块法利用14时位温廓线反演14时MLH的散点图

Fig. 2 Scatter plot of 14:00-MLH derived by the Richardson number method and the parcel method with the profile of potential temperature at 14:00

为507组。从图2可以看到,数据点较均匀地分布在1:1斜线的两侧,且呈现较好的线性关系,拟合直线的斜率为0.85,截距为-13.1 m。计算得到相关系数 $r=0.87$,均值偏差 $MAE=246.3$ m,均方根误差 $RMSE=413.6$ m。我们对两组数据进行Spearman检验, $p=2.73e^{-157}$,通过显著性检验($p<0.001$)。对比结果表明两组数据具有较好的一致性,证明气块法第一个假设带来的混合层估计偏差较小。

然后,检验第二个假设可能带来的对MLH估计的偏差,选用北京南郊气象站2010—2017年每年6—8月夏季汛期每日08时和14时的探空秒数据,用气块法分别利用08时位温廓线辅以14时地面位温观测数据以及14时位温廓线反演14时的MLH,并做拟合分析,结果如图3所示。去除空值和异常值,有效数据样本数为507组。从图3可以看到,散点较均匀地分布在1:1斜线的两侧,且呈现较好的线性关系,拟合直线的斜率为0.78,截距为135.6 m。计算得到 $r=0.79$, $MAE=320.9$ m, $RMSE=467.4$ m。对两组数据进行Spearman检验, $p=2.18e^{-111}$,通过显著性检验($p<0.001$)。对比结果表明两组数据具有较好的一致性,证明气块法第二个假设带来的混合层估计偏差较小。

通过对气块法两个假设的检验,证明了利用08时位温廓线,采用气块法结合地面日最大位温反演MMH的合理性,因此可以在一定程度上弥补由于

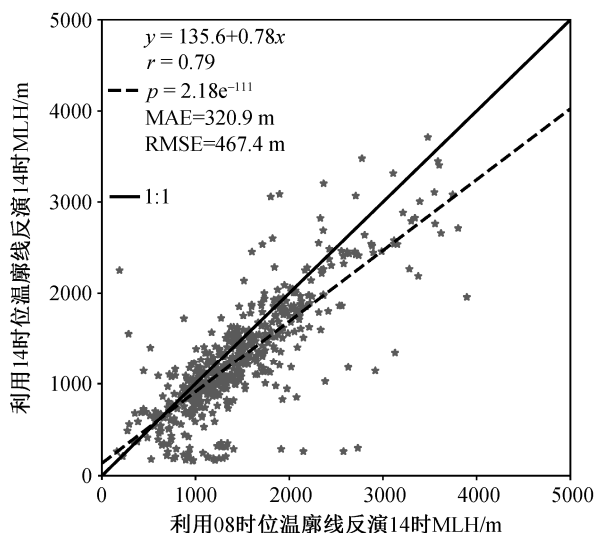


图3 气块法利用08时位温廓线及地面位温与气块法利用14时位温廓线反演14时MLH散点图

Fig. 3 Scatter plot of 14:00-MLH derived by the parcel method with the profile of potential temperature at 08:00 and surface potential temperature observations and the parcel method with the profile of potential temperature at 14:00

缺少当日地面最大位温时刻的位温廓线造成的遗憾。同时，因为每日探空数据几乎都有08时数据，所以可以确保气块法反演获得MMH的连续性，为年际和季节性MMH变化的研究提供了可能性。

2.2 激光雷达与探空数据反演日最大混合层高度的结果和偏差对比

利用激光雷达与探空秒数据、常规探空数据同时存在有效探测数据的2016年4月至2017年10月探测数据，激光雷达采用人工辅助算法，探空数据利用08时位温廓线采用气块法，分别得到各自的MMH反演结果(图4)。为方便叙述，本文分别用 MMH_L 、 MMH_S 和 MMH_C 代表激光雷达、探空秒数据与常规探空数据的反演结果。图4中，去除空值和异常值，有效数据样本数为379组。可以看出，两条拟合直线均呈现较好的线性关系。对 MMH_S 与 MMH_L 以及 MMH_C 与 MMH_L 分别进行Spearman检验，所得 p 值分别为 $1.28e^{-54}$ 和 $5.95e^{-45}$ ，均通过了显著性检验($p < 0.001$)，表明两种探空数据反演的MMH与 MMH_L 之间均不存在系统性偏差。与 MMH_C 相比， MMH_S 的各项误差分析指标与 MMH_L 有更好的一致性，与 MMH_L 的相关系数大于 MMH_C 与 MMH_L 的相关系数，与 MMH_L 的均值偏差和均方根误差均小于 MMH_C 与 MMH_L 的均值偏差和均方根误差。从图4还可以看出，星号多分布在1:1斜

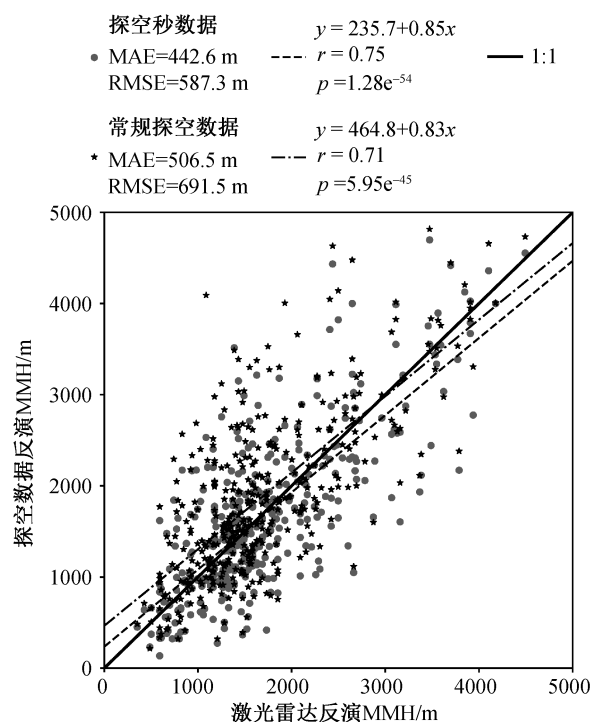


图4 激光雷达与探空数据反演MMH散点图

Fig. 4 Scatter plot of MMH derived from MPL and sounding data measurements

线的右下侧，而圆圈较均匀地分布在1:1斜线的两侧，说明相对于 MMH_C ， MMH_S 与 MMH_L 的一致性更好。 MMH_C 比 MMH_L 误差大的主要原因是常规探空位温廓线的垂直分辨率不足。

以2016年4月7日为例(图5)，常规探空数据与探空秒数据位温廓线的垂直分辨率不同，常规探空数据分辨率低，出现垂直距离1000m左右范围内没有数据点的情况，两点之间只能用内插数据。图5中 MMH_S 比 MMH_L 高194.5m， MMH_C 则比 MMH_L 高485.5m，可见常规探空数据会因分辨率低而导致 MMH_C 与真值的偏差较大。

2.3 激光雷达与探空数据反演日最大混合层高度的季节性变化

为了对MMH有一个更清晰的认识，我们对2.2节中 MMH_S 与 MMH_L 的拟合结果做季节性变化分析，结果如图6所示。虽然对4个季节进行Spearman检验，均通过显著性检验($p < 0.001$)，但冬季 MMH_S 与 MMH_L 的相关系数最小，均值偏差和均方根误差最大， MMH_S 与 MMH_L 的线性关系也较差，说明冬季 MMH_S 与 MMH_L 的一致性较差，原因可能在于气块法的两个基本假设对冬季而言有所偏差。

虽然各季节 MMH_S 与 MMH_L 的一致性程度不

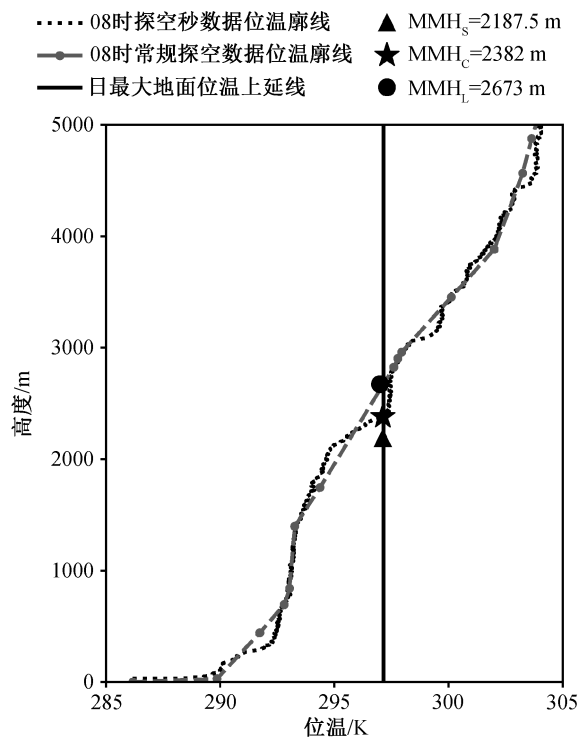


图 5 08时探空秒数据与08时常规探空数据位温廓线及MMH_S, MMH_C和MMH_L(2016年4月7日)

Fig. 5 Profiles of potential temperature at 08:00 from second sounding data and conventional sounding data measurements and MMH_S, MMH_C and MMH_L (April 7, 2016)

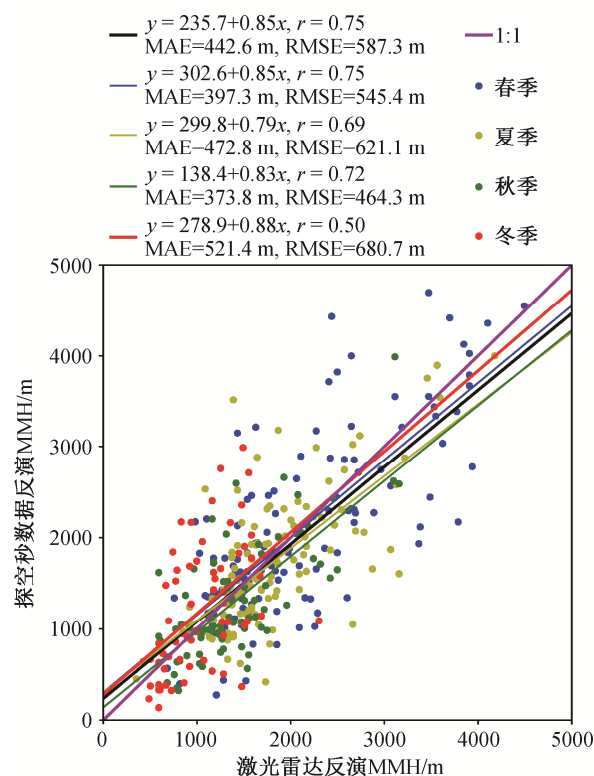


图 6 激光雷达与探空秒数据反演 MMH 散点图的季节性变化分析

Fig. 6 Seasonal analysis of the scatter plot of MMH derived from MPL and second sounding data measurements

同, 但均通过显著性检验, 说明在北京地区使用探空秒数据反演 MMH 来研究其年际和季节性变化特征是可行的。

2.4 探空秒数据反演日最大混合层高度的季节性变化特征

选用北京南郊气象站 2010 年 1 月至 2017 年 10 月每日 08 时的探空秒数据及自动站地面气温数据, 采用气块法反演 MMH, 去除空值及异常值, 有效数据样本数为 2682 组。为了保证数据的连续性, 设定春季为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月, 冬季为 12—次年 2 月。把每年的数据切片, 分为春夏秋冬四季, 得到 MMH 的箱线图(图 7)。除 2014 年秋季和冬季(各缺少一个月的数据)外, 每个季度数据的样本数相差不大, 均在 90 左右。除去不具有代表性的 2014 年秋季和冬季后, 从各季度 MMH 的平均值、四分位数、中位数以及最大值可以看出, MMH 每年均表现出春夏秋冬逐次递减的分布特征, 与王坚等^[16]2016 年利用常规探空数据, 采用气块法反演 MMH 所得结论一致。以图 7 中

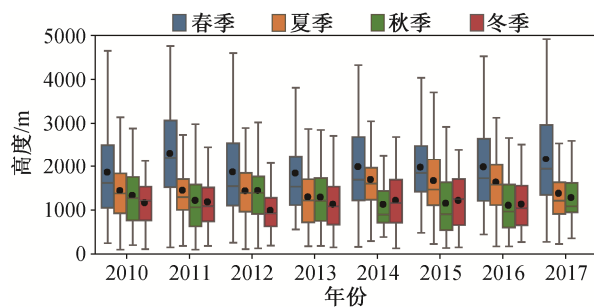


图 7 探空秒数据反演 MMH 的箱线图

Fig. 7 Box-and-whisker plots of MMH derived from second sounding data measurements

2010 年为例, 其 MMH 在春夏秋冬的平均值分别为 1860, 1441, 1332 和 1165 m。

2.5 探空秒数据反演日最大混合层高度与热力稳定度

Kuribayashi 等^[17]2011 年提出热力稳定度的概念: 热力稳定度是海表面温度与 850 hPa 气压层的温度之差, 并分析中国东海的 MMH 与热力稳定度的关系, 发现两者线性关系较好。王存贵等^[7]2018

年用特征气压层与地面的位温差定义热力稳定度, 并对比多个热力稳定度与 MMH 的相关性, 最后选取特征气压层 400 hPa 左右与地面的位温差的热力稳定度, 与青藏高原地区 MMH 做线性拟合, 得到较好的线性关系。前人的研究表明, 虽然由于研究地点的不同导致定义和选取热力稳定度的方法不同, 但目的都是为了获得与当地 MMH 具有最好相关性的热力稳定度, 从而可以仅通过热力稳定度与 MMH 的关系获得 MMH, 大大地简化反演 MMH 所需的观测数据和计算过程。

为更好地定义和选取北京地区的热力稳定度, 使其与北京地区的 MMH 相关性最好, 本文借鉴海拔高度与北京接近的中国东海地区热力稳定度^[17]的定义方法, 将特征气压层温度与日最大地面气温的温度差定义为热力稳定度, 对比从地面至 500 hPa, 每隔 50 hPa 的热力稳定度与 MMH 的相关性, 从中选取相关性最好的热力稳定度。北京地区 MMH 和各热力稳定度的获取均来自北京南郊气象站 2010 年 1 月至 2017 年 10 月每日 08 时的探空秒数据, MMH 的反演采用气块法。

如表 1 所示, 各气压层的热力稳定度与 MMH 的相关系数(r)先增后减, 在 850 hPa 时达到最大。因此, 选用 850 hPa 的热力稳定度与 MMH 做拟合分析, 结果见图 8。去除空值及异常值后, 有效数据样本数为 2603 组。可以看到, 数据点较均匀地分布在拟合直线两侧, 呈现较好的线性关系, 拟合直线的斜率为 0.0037, 截距为 8.03, 相关系数为 0.81。我们对两组数据进行 Spearman 检验, $p=1.02e^{-296}$, 通过显著性检验($p<0.001$), 表明两组数据之间存在显著的相关性。

3 总结

本文利用 2016 年 4 月至 2017 年 10 月的激光雷

表 1 热力稳定度与气块法反演 MMH 的相关系数
Table 1 Correlation coefficient between the thermal stability and MMH derived by the parcel method

热力稳定度所在的气压层/hPa	r	热力稳定度所在的气压层/hPa	r
950	0.69	700	0.75
900	0.78	650	0.72
850	0.81	600	0.68
800	0.80	550	0.66
750	0.79	500	0.66

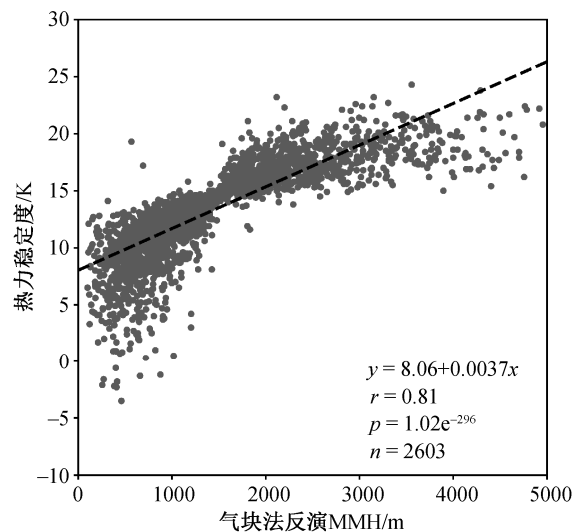


图 8 热力稳定度与气块法反演 MMH 散点图
Fig. 8 Scatter plot of the thermal stability and MMH derived by the parcel method

达数据和常规探空数据、2010—2017 年共 8 年的探空秒数据以及 AWS 数据, 研究北京地区的日最大混合层高度, 得到以下主要结论。

1) 采用气块法, 利用 08 时位温廓线, 结合地面日最大位温反演 MMH 是可行的。由于几乎每日都有 08 时的探空数据, 因此可以确保气块法反演获得 MMH 的连续性, 为年际以及季节性的 MMH 研究提供可能性。

2) 相对于常规探空数据反演的 MMH_C, 秒数据反演的 MMH_S 与激光雷达反演的 MMH_L 一致性更好。常规探空数据分辨率低是 MMH_C 与 MMH_L 偏差较大的原因。

3) 冬季 MMH_S 与 MMH_L 的拟合结果较差, 但各季节 MMH_S 与 MMH_L 的相关系数均通过显著性检验, 证明在北京地区使用探空秒数据反演 MMH 来研究其年际和季节性变化是可行的。

4) 采用气块法反演得到的 2010—2017 年长达 8 年的 MMH, 在各个年份都呈现春夏秋冬逐次递减的分布特征。

5) 北京地区的 MMH 与热力稳定度之间呈现较好的正相关线性关系。

参考文献

- [1] Tang Guiqian, Zhu Xiaowan, Hu Bo, et al. Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: lidar ceilometer observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(21): 12667–

- 12680
- [2] Lu Z, Streets D G, Zhang Q, et al. Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(13): 6311–6331
- [3] Ji Xiangguang, Liu Cheng, Xie Zhouqing, et al. Comparison of mixing layer height inversion algorithms using lidar and a pollution case study in Baoding, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 79(5): 81–90
- [4] 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
- [5] Tang Guiqian, Zhang Jinqiang, Zhu Xiaowan, et al. Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(4): 2459–2475
- [6] 王存贵, 李成才, 贺千山, 等. 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. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(3): 579–587
- [7] 王存贵, 初奕琦, 檀望舒, 等. 结合激光雷达和探空资料研究青藏高原地区混合层高度特征. *大气科学*, 2018, 42(5): 1133–1145
- [8] 张霁琛, 孙成国, 田毅. 北京地区大气混合层的探测与预测模式的检验. *气象学报*, 1990, 48(3): 345–354
- [9] 程水源, 张天宝, 白天雄, 等. 北京地区大气混合层高度的研究及气象特征. *环境科学丛刊*, 1992, 13(4): 46–52
- [10] 尤焕琴, 刘伟东, 谭江瑞. 北京地区平均最大混合层厚度的时间变化特征. *气象*, 2010, 36(5): 51–55
- [11] Holzworth G C. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Mon Weather Rev*, 1964, 92(5): 235–242
- [12] 贺千山, 毛节泰. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究. *气象学报*, 2005, 63(3): 374–384
- [13] 王珍珠, 李炬, 钟志庆. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层. *应用光学*, 2008, 29(1): 96–100
- [14] 初奕琦. 大气混合层高度的微脉冲激光雷达探测研究[D]. 北京: 北京大学, 2018: 33–59
- [15] 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. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 119(1): 135–157
- [16] 王坚, 蔡旭晖, 宋宇. 北京地区日最大边界层高度的气候统计特征. *气候与环境研究*, 2016, 21(5): 525–532
- [17] Kuribayashi M, Ohara T, Shimizu A. Temporal variation and vertical structure of the marine atmospheric mixed layer over the East China Sea from Mie-scattering lidar data. *Sola*, 2011, 7: 189–192