

刘思波,何文英,刘红燕,等. 地基微波辐射计探测大气边界层高度方法. 应用气象学报, 2015, 26(5): 626-635.
doi:10.11898/1001-7313.20150512

地基微波辐射计探测大气边界层高度方法

刘思波¹⁾²⁾ 何文英^{2)*} 刘红燕³⁾ 陈洪滨²⁾

¹⁾(成都信息工程大学, 成都 610225)

²⁾(中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

³⁾(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘 要

采用 2013 年中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站的地基微波辐射计和激光雷达观测数据, 以激光雷达探测的大气边界层高度为参考, 分别利用非线性神经网络和多元线性回归方法建立微波亮温直接反演大气边界层高度的算法, 并对比两种方法的反演能力, 同时分析非线性神经网络算法在不同时段及不同天气状况下反演结果的差异。结果表明: 非线性神经网络算法的反演能力优于多元线性回归算法, 其反演结果与激光雷达探测的大气边界层高度有较好一致性, 冬、春季的相关系数达到 0.83, 反演精度比线性回归算法约高 26%; 对于不同时段和不同天气条件, 春季的反演结果最好, 晴空的反演结果好于云天; 四季和不同天气状况的划分也有利于提高反演精度。

关键词: 微波亮温; 大气边界层高度; 激光雷达; 神经网络; 多元线性回归

引 言

大气边界层(atmospheric boundary layer, ABL)指易受地面影响的低层大气, 它与人类的活动关系最为密切, 在空气质量、天气预报和气候变化中扮演着重要角色^[1]。受热力和动力作用, 大气边界层高度随时间和空间不断变化, 变化范围从百米到几千米, 对其观测和研究一直是大气科学领域的重要内容。通常边界层高度可以根据探空探测的温度、湿度和风廓线计算得到^[2]。但常规气象探测很难得到高时空分辨率的大气边界层高度连续演变信息, 目前先进的数值模式在很多情况下也不能很好地刻画大气边界层高度的时空分布^[3]。近些年, 激光雷达、声雷达、风廓线雷达等遥感探测系统逐渐成为测量和估计边界层高度的主要手段^[4]。激光雷达是一种大气主动遥感探测工具, 它所接收到的激光大气回波, 包含大气散射光的光强、频移和偏振等多种信

息, 同时具有很高的时空分辨率及可长时间连续工作的能力, 可运用于研究大气边界层结构和大气气溶胶廓线特征^[5], 尤其能够快速并细致地反映大气边界层高度演变过程。贺千山等^[6]利用微脉冲激光雷达资料反演边界层高度, 结果显示边界层高度的变化趋势与气溶胶光学厚度变化趋势一致。贺千山等^[7]还提出微脉冲激光雷达反演混合层高度的方法, 反演结果与探空有很好的一致性(白天混合层高度与大气边界层高度一致)。因此, 激光雷达探测反演的边界层高度成为本文边界层高度反演研究的主要参考数据。

地基微波辐射计已成为大气遥感探测的一项重要技术。Fabio 等^[8]利用七通道地基微波辐射计观测建立了反演大气温度和湿度廓线的多元线性回归算式, 雷恒池等^[9]利用双通道地基微波辐射计对降水云进行探测, 姚展予等^[10]利用地基双频微波辐射计反演安徽寿县地区云中液态水含量, 魏重等^[11]讨论了地基微波辐射计在雨天探测遇到的问题及可能

2015-02-28 收到, 2015-05-27 收到再改稿。

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05100300), 国家重点基础研究发展计划(2013CB955801)

* 通信作者, email: hwy@mail.iap.ac.cn。

解决途径,陈洪滨等^[12]对 118.75 GHz 附近的六通道遥感反演大气温度廓线进行了数值模拟研究,姚志刚等^[13]利用人工神经网络方法反演大气温度的数值模拟研究。Cimini 等^[14]提出采用多通道地基微波辐射计观测,以多元线性回归的方法反演大气边界层高度,与激光雷达探测的大气边界层高度的相关系数达到 0.69,黄治勇等^[15]利用地基微波辐射计对比分析了短时暴雨与一般降水过程发生前微波辐射计观测资料的特征,王振会等^[16]研究了地基微波辐射计天线性能和工作环境对 k 波段亮温观测数据的影响,车云飞等^[17]对比了有云和无云对地基微波辐射计反演温湿廓线的影响。

鉴于中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站已有 1 台 14 个通道地基微波辐射计和激光雷达在进行同步观测,本文尝试直接利用地基微波辐射计观测的多通道微波亮温数据和激光雷达探测的大气边界层高度数据。基于非线性神经网络和多元线性回归两种方法,建立地基微波辐射计遥感反演大气边界层高度的算法,并对两种算法反演结果进行系统比较,考察其不同天气状况时与不同季节的表现。

1 数据和质量控制

本文采用中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站(简称香河站,39.79°N,116.95°E,海拔为 8 m)的观测资料,地基激光雷达和微波辐射计的观测时间均为 2013 年 2—10 月,其中 4 月的地基激光雷达资料缺失。

1.1 地基微波辐射计亮温数据

香河站地基微波辐射计是德国 RPG 公司生产的 RPG-HATPRO,共有 14 个通道,前 7 个通道为水汽通道,后 7 个通道为氧气通道。地基微波辐射计自动支持两种扫描方式,天顶模式(固定垂直向上对天顶观测)和边界层多仰角扫描模式,保证在整个对流层和边界层的准确和高分辨率观测,对捕获边界层的逆温效应至关重要。香河站地基微波辐射计自 2012 年 3 月 8 日开始观测至今,数据连续性良好,基本处于 24 h 连续运行状态,除部分降水天气时由于参数自身敏感性导致的数据不可用之外,其余数据良好;该仪器每年进行 1~2 次液氮定标。辐射计观测方式为天顶模式时,每 1~2 s 接收 1 组亮温数据,成为本文使用的主要数据。此外,地基微波

辐射计信号受大气气溶胶的影响很小,即在洁净和霾天气条件下,地基微波辐射计都能遥感多种大气参数。因此,香河站多通道地基微波辐射计获取的高时间分辨率、全天候的观测资料,为边界层高度变化研究与试验提供了有利条件。

1.2 激光雷达数据

香河站地基激光雷达(EZLidar)由法国 Leosphere 公司与法国国家研究中心气候环境科学实验室(LSCE, CEA/CNRS)共同研制^[18]。激光雷达垂直对天顶观测,其工作波长为 355 nm,脉冲频率为 20 Hz,单次脉冲能量为 16 mJ,每隔 5 min 获取 1 条廓线资料,垂直分辨率为 15 m。激光雷达接收的能量回波廓线,经过反演可得到气溶胶消光系数和后向散射系数的廓线,并可从经距离平方订正后的回波廓线得到大气边界层结构信息,以及云底高度或薄云云顶高度等信息^[18]。地面气溶胶在湍流混合作用下被扩散至整个边界层内,由于在混合层顶部与上部自由大气的交换处往往存在逆温层^[19],阻碍了气溶胶继续往上扩散,气溶胶会在混合层顶部积累起来,大量的气溶胶束缚在逆温层顶之下的大气层边界层内,而边界层顶上的气溶胶消光系数一般显著减小。因此,通过激光雷达测量的气溶胶廓线的梯度变化可精确估算大气边界层高度。

1.3 激光雷达探测大气边界层高度的可行性和不确定性

图 1 为 2013 年 6 月 13 日 07:15(北京时,下同)气溶胶消光系数廓线(香河站)以及探空位温廓线(北京市气象台),图 1a 虚线是由消光系数梯度法计算得到的大气边界层高度,图 1b 虚线是由 Seidel 方法^[5]计算得到的边界层高度,两者具有很好的一致性,这表明使用梯度法计算得到的边界层高度数据是可行的。图 1b 中位温廓线显示在 480 m 高度以上有逆温层,它的存在抑制了边界层内气溶胶向上发展,所以在图 1a 中气溶胶消光系数在 480 m 高度处明显减小,也表明 480 m 高度为大气边界层高度。为了保证探空位温廓线得到准确的大气边界层高度,选取了 31 个具有明显逆温探空位温廓线进行分析,图 2 是时间匹配的激光雷达探测得到大气边界层高度与探空位温廓线计算得到大气边界层高度的散点图,虽然激光雷达和无线探空仪相隔 60 km,但它们相关性很好,说明利用激光雷达探测大气边界层高度是可行的。

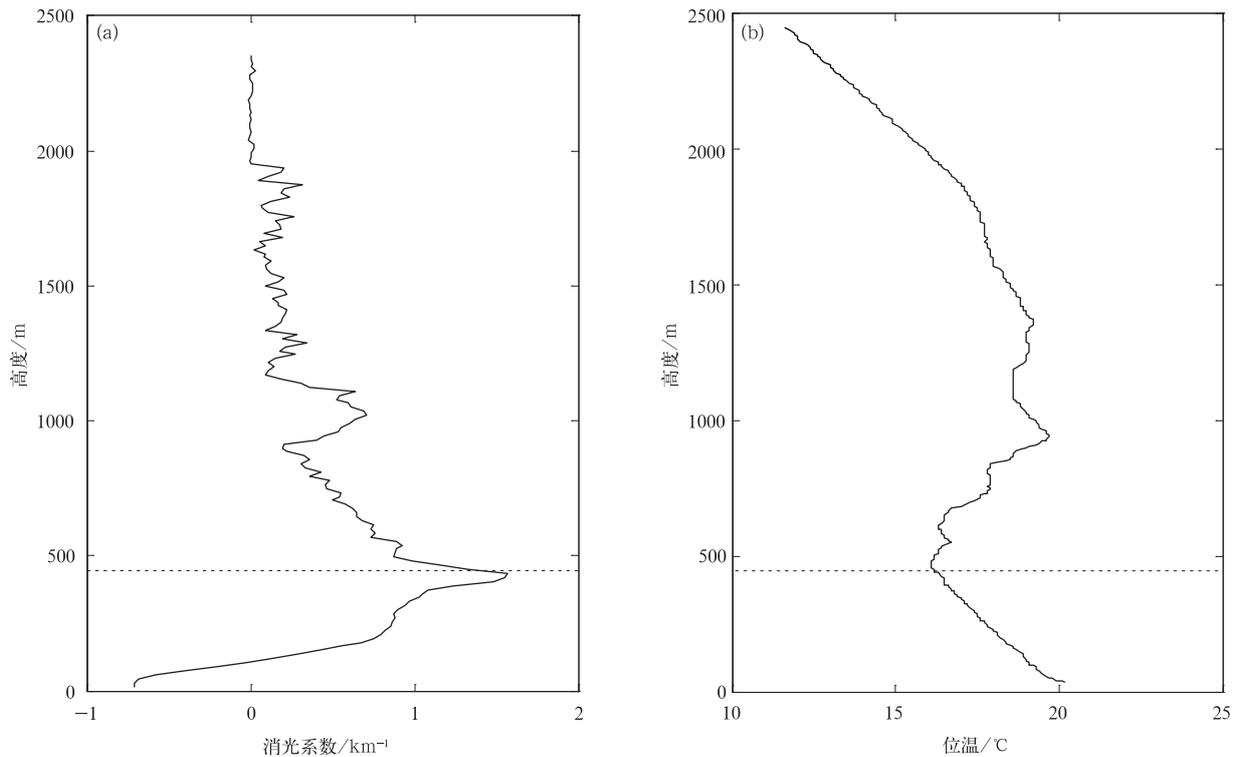


图1 验证激光雷达探测边界层高度 (a)2013年6月13日07:15 香河站气溶胶消光系数廓线,
(b)2013年6月13日07:15北京市观象台探空位温廓线

Fig. 1 Verification of laser radar boundary layer height

(a)aerosol extinction coefficient profile at Xianghe Station at 0715 BT 13 Jun 2013,

(b)potential temperature profile from sounding at Beijing Weather Observatory at 0715 BT 13 Jun 2013

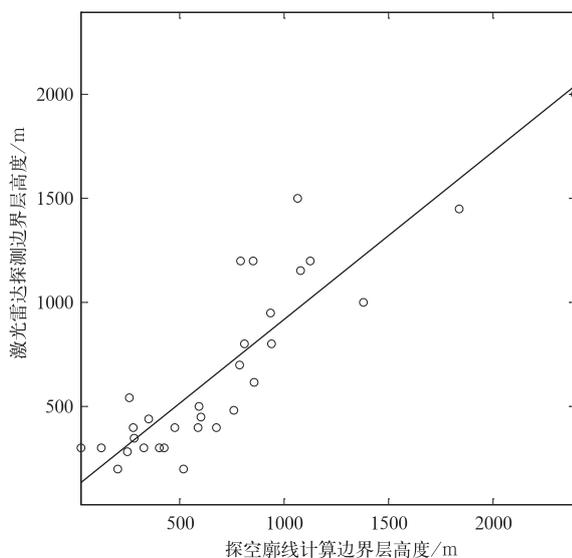


图2 2013年香河站激光雷达探测大气边界层高度与北京市观象台探空廓线计算大气边界层高度散点图

Fig. 2 Scatte-plots of laser radar boundary layer height and sounding boundary layer height in 2013

图3显示2013年8月24日大气消光系数廓线的时间变化,图中黑点是由梯度法计算得到的大气边界层高度。由图3可见,夜晚地表面冷却,近地面出现逆温,形成稳定边界层,由梯度法计算得到的大气边界层高度与大气气溶胶消光系数明显减小的高度比较一致;而在白天,由于湍流活动强,由梯度法计算得到的大气边界层高度存在误差。17:00以后为多云天气,夜晚没有演变成稳定边界层,由梯度法计算得到的大气边界层高度也存在不确定性。表明无论白天和夜晚,湍流活动较强时,由梯度法得到的大气边界层高度均存在不确定性。

1.4 数据质量控制

选取香河站2013年2—10月的激光雷达和地基微波辐射计观测数据(其中4月激光雷达资料缺失)。对于微波亮温数据,首先考虑降水天气会影响微波辐射计接收的数据质量,因此,剔除雨天时的数据,主要采用数据质量相对可靠的晴空和云天的多通道观测亮温。此外,在数据预处理中剔除掉超过平均值附近3倍标准偏差(3σ)范围的微波亮温数据,

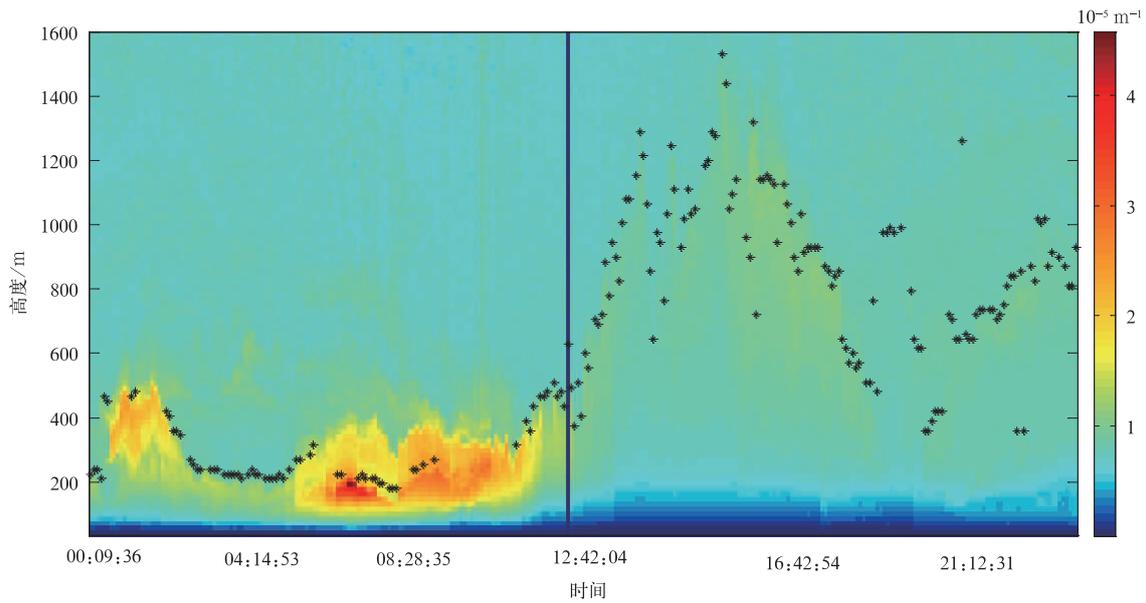


图 3 2013 年 8 月 24 日香河站激光雷达气溶胶消光系数的时间-高度剖面图
(黑点为梯度法计算的大气边界层高度)

Fig. 3 Time-height section of laser radar aerosol extinction coefficient at Xianghe Station on 24 Aug 2013
(black dots denote boundary layer height derived with the gradient method)

类似奇异点去除方法也应用到激光雷达数据。由于激光雷达观测每 5 min 获取 1 条廓线,而地基微波辐射计每 1~2 s 可获取 1 组微波亮温数据,因此在匹配两种数据时,选取与激光雷达数据时间一致的微波亮温数据,最终形成 23853 组匹配样本用于研究。

2 反演模型建立

地基微波辐射计所获得的亮温包括大气层温度、湿度信息,由大气温湿廓线,可估算大气边界层高度。亮温与大气温度廓线两者之间相互存在着一定关系。但由于地基微波辐射计遥感反演大气温湿廓线过程中尚存诸多不确定性,造成与实际探空廓线存在误差,且垂直分辨率不足的问题,在一定程度上增加了计算大气边界层高度的误差。而亮温包含有关于边界层高度的信息,所以本文利用亮温直接反演大气边界层高度。

2.1 算法模型

地基微波辐射计接收不同高度大气层中氧气和水汽等向下发射的微波辐射,其中含有大气边界层高度及其变化的信息。设向量 y 为大气边界层高度,矩阵 x 为 14 个通道亮温数据,存在一种可逆反演关系 R ,于是有

$$y = R \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{14} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, R 是非线性或多元线性关系。由于北京市气象台无线电探空每天只施放两次,采集的数据有限,且距离香河站约 60 km,所以这里使用香河站激光雷达 EZLidar 反演探测的大气边界层高度数据为 y ,地基微波辐射计的 14 个通道亮温数据为 x 。利用已经匹配好的数据样本作为已知的 x 和 y ,使非线性用神经网络算法和多元线性回归算法,即可确定关系式(1)。

2.2 BP 神经网络算法

本研究采用 BP 神经网络(BPNN)算法。它是一种多层的前向网络,由 Rumelhart 等在 1986 年提出^[20]。BP 神经网络算法采用 Widrow-Hoff 训练算法和非线性可微转移函数的多层网络,在解决非线性近似方面有很大的优势,可用于复杂的非线性函数的逼近^[21]。该方法已成功应用于大气参数廓线反演领域,并取得较好的结果^[22]。此外,BP 神经网络算法有良好的训练功能,可以接受根据用户需求提交的样本集合,依照系统给定的算法,不断修正用来确定系统行为的神经元之间的连接强度,并存放

于系统中^[23]。本文使用 23853 组匹配样本的 4/5 数据,即 19000 组样本,进行 BPNN 训练。经过大量数据训练后,得到权重系数和阈值。

2.3 多元线性回归算法

线性统计回归方法在遥感反演中得到广泛应用。利用匹配好的数据建立多元线性回归算法,即

$$Y = \sum_{i=1}^n a_i X_i + b. \quad (2)$$

式(2)中, Y 为大气边界层高度, X_i 为 14 个通道亮温数据,参数 a 和 b 由线性回归确定。

3 结果分析

针对 2013 年香河站同时观测的地基微波辐射计亮温和激光雷达获取的边界层高度数据匹配形成的 23853 组样本数据库,进行统计分析,分别建立两种反演算法且比较各算法性能。

3.1 BP 神经网络算法和多元线性回归算法对比

首先,使用 BP 神经网络算法和多元线性回归算法对 1/5 的检验匹配数据进行反演计算,然后进

行算法比对分析。BP 神经网络算法的均方根误差为 268.8 m,而多元线性回归算法均方根误差为 365.1 m,明显小于多元线性回归算法对应的结果,且前者与激光雷达探测的相关系数为 0.77,显著高于后者的相关系数(0.51),表明 BP 神经网络算法的反演能力优于多元线性回归算法。通过两种反演算法的测试结果与激光雷达探测大气边界层高度的散点图(图 4)可见,BP 神经网络算法反演的大气边界层高度大部分集中在 200~2000 m,与激光雷达大气边界层高度分布较为一致,能够达到 0.77 的相关性;而多元线性回归算法输出的大气边界层高度大部分均小于 1000 m,与 1000~2000 m 的激光雷达大气边界层高度有明显的系统偏差,致使两者总体相关系数只达到 0.51。从两种方法的测试数据中随机抽取 50 个样本的预测和期望输出(图 5),BP 神经网络算法反演结果与作为参考的激光雷达结果更为接近。上述两种算法对比分析显示,BP 神经网络算法反演结果优于多元线性回归算法因此,选用 BP 神经网络算法,分析不同天气条件和不同季节的反演能力。

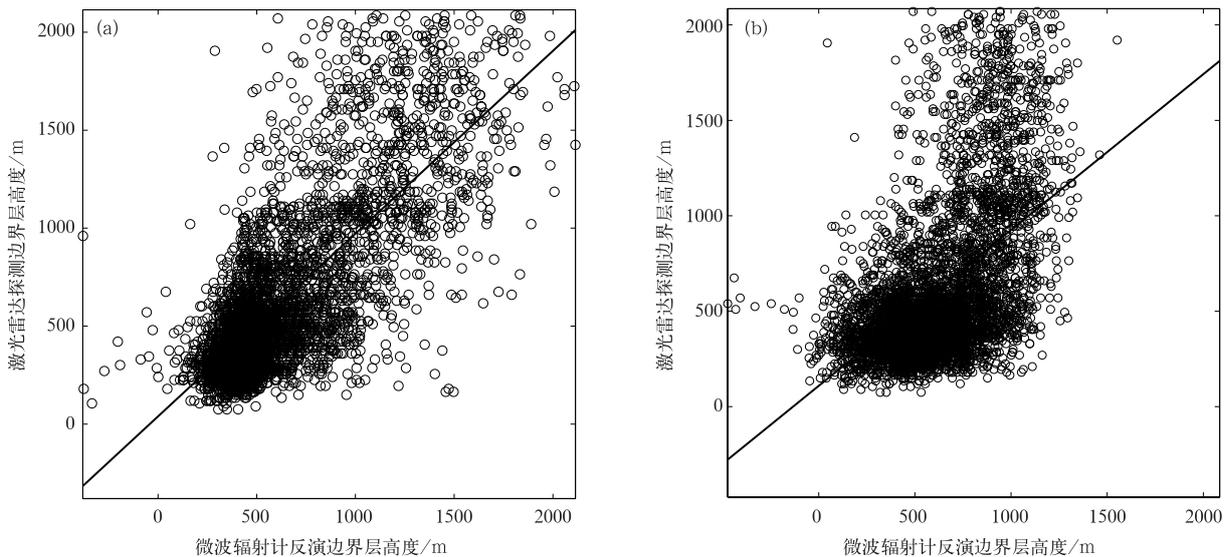


图 4 2013 年香河站激光雷达探测与微波辐射计测试样本反演边界层高度

(a)BP 神经网络算法,(b)多元线性回归算法

Fig. 4 Scatte-plots of laser radar boundary layer height and ground-based microwave radiometer boundary layer height for test data samples at Xianghe Station in 2013

(a)BP neural network,(b)multiple linear regression

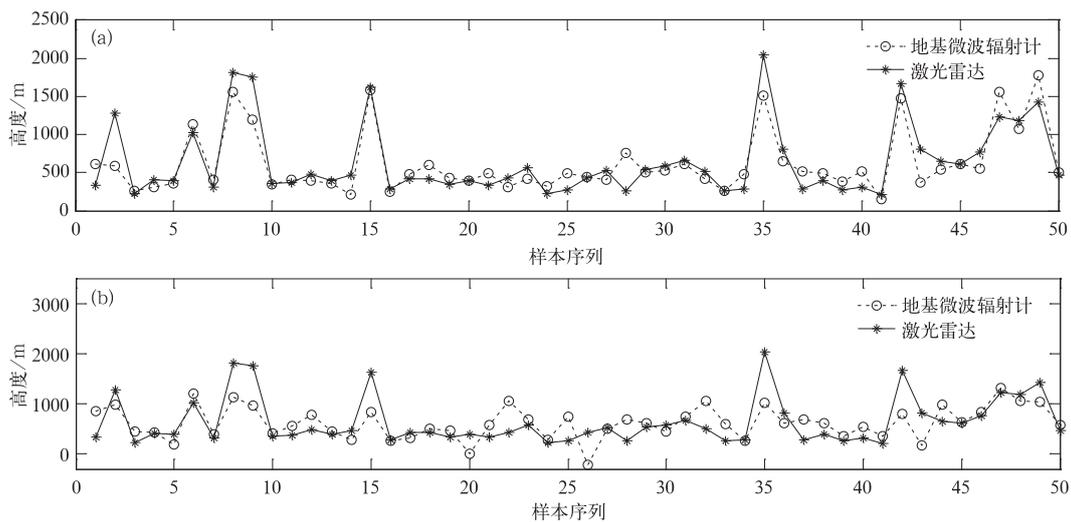


图 5 2013 年香河站地基微波辐射计和激光雷达大气边界层高度比较
(a)BP 神经网络算法, (b)多元线性回归算法

Fig. 5 Comparisons of boundary layer height derived from ground-based microwave radiometer and laser radar at Xianghe Station in 2013
(a)BP neural network, (b)multiple linear regression

3.2 晴空和云天反演结果比较

利用地基微波辐射计自带的同步观测的红外探测仪测量的红外亮温信息,进一步选取匹配数据中晴空与云天样本。具有两通道($11.0\ \mu\text{m}$ 和 $12.0\ \mu\text{m}$)的地基红外探测仪在云天条件下探测的红外亮温与云底温度紧密相关,用于反演云底高度。图 6 分别显示 2013 年 1 月 1 日(晴空)和 2013 年 4 月 19 日(云天)的红外亮温变化,可以看到,晴空红外亮温基本在明显偏低、突变较小的温度范围内,有云时亮温值明显升高,且由于云层厚度不均,出现较大温度起伏范围。因此,在固定天顶方向的垂直扫描上空若

无云,一段时间内红外亮温很低并且起伏小;上空有云,一段时间内亮温曲线会出现显著起伏,同时兼有温度高的特性^[23]。利用这个变化规律,统计 2013 年香河站地基微波辐射计上同步进行的红外探测数据在晴空条件下的阈值,晴空的红外辐射亮温均小于 $-30\ ^\circ\text{C}$,因此,将晴空阈值设定为 $-30\ ^\circ\text{C}$ 。由此得到匹配样本中近 1.1 万组晴空数据,1.2 万组云天数据。

针对晴空和云天样本数据,采用 BP 神经网络算法反演结果,晴空边界层高度均方根误差为 266.5 m,云天边界层高度均方根误差为 215.4 m,而相关性

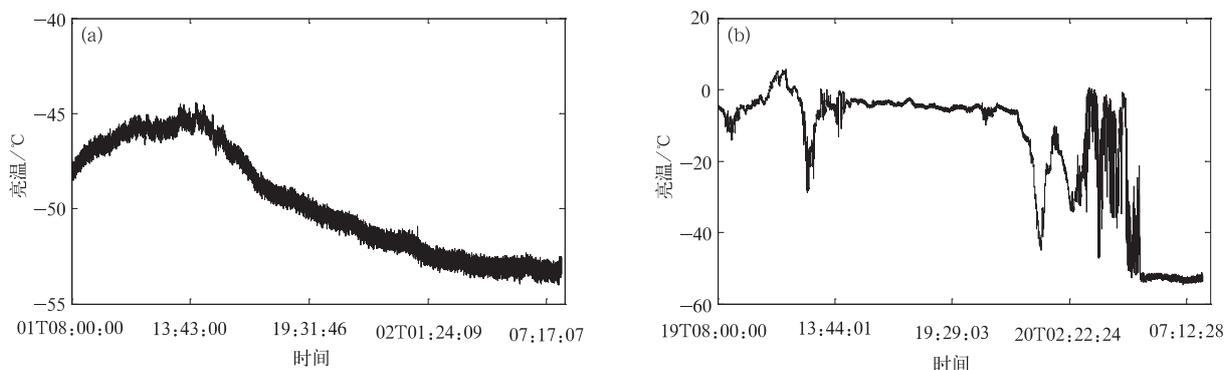


图 6 香河站晴空和云天红外辐射亮温变化

(a)2013 年 1 月 1—2 日(晴空), (b) 2013 年 4 月 19—20 日(云天)

Fig. 6 Variation of infrared brightness temperature under different weather conditions at Xianghe Station
(a)clear sky during 1—2 Jan in 2013, (b)cloudy sky during 19—20 Apr in 2013

却是晴空更好,达到0.83,好于云天时的0.78,优于全体样本下的0.77。晴空大气边界层高度变化范围较大(200~2000 m),不过大部分大气边界层高度集中在1000 m以下,小部分大气边界层高度达到1000~2000 m;而云天大气边界层高度普遍偏低,主要集中在200~800 m,个别零散样本高于1000 m。这是由于云层影响,使得地面净辐射减小,导致大气边界层高度和稳定边界层厚度比晴空时候低。此外,云天大气边界层高度集中在小于1000 m区域以内,而晴空边界层高度分布范围较大,对应的均方根误差和标准差也是晴空显著大于云天,说明云天边界层高度相对较为稳定,晴空边界层由于受地面和近地层大气热力和动力影响作用不

同,易出现起伏多变的边界层高度。

3.3 四季反演结果对比

由于地基激光雷达观测受天气条件限制,在个别月份数据不完整,本文建立的匹配数据只有2013年2—10月(其中4月激光雷达资料缺失),因此,划分为4个季节时段内的样本数差别较为显著(表1)。其中,由于匹配数据中仅以2月代表冬季,共320个样本,其数据代表性还需论证。春季仅有3月和5月数据,秋季仅有9月和10月数据,因此,这两个季节样本与夏季(6—8月)相比明显减少,尤其春季容易受云或沙尘影响,有效的地基激光雷达观测数据相对较少,也比秋季匹配样本少很多。

表1 不同季节反演结果的统计比较

Table 1 Statistic comparison of retrieval results for different seasons

季节	训练样本量	测试样本量	偏差/m	均方根误差/m	标准差/m	相关系数
冬季	320	84	2.5	228.4	387.1	0.82
春季	900	212	8.6	266.6	400.0	0.82
夏季	12000	2579	1.0	257.4	352.6	0.79
秋季	6200	1557	-0.2	251.6	362.5	0.80

表1显示BP神经网络算法分析匹配数据库在4个季节里的反演差异。总体看来,采用BP神经网络算法反演统计的4个季节的相关系数均约为0.80,优于整体样本0.77的相关性,且对应的均方根误差小于总体样本统计结果,说明按季节进行分类训练的反演效果更好。其中,春季和冬季样本较少,但反演与观测结果的总体一致性较好。夏季和秋季样本较丰富,夏季大气边界层高度大部分集中在200~800 m,大于1000 m的大气边界层高度分布较为零散,反演与观测结果偏差较大,致使夏季样本的相关性在4个季节中最低。与夏季相比,秋季大气边界层高度变化范围较高,但秋季反演的大气边界层高度与激光雷达测量结果总体一致性挺好,大气边界层高度大于1000 m时两者偏差较小,因此,秋季相关性能达到0.80,也明显优于总体样本统计结果。结合不同季节的天气变化特征,可以认为引起夏季相关性偏低可能是夏季多云雨天气,云天样本相对偏多,而云天的反演精度略低;而位于华北平原的香河地区的秋季多为晴朗无云天气,秋季大气边界层高度与晴空条件下大气边界层高度分布接近,而晴空反演精度较高,因此,秋季反演精度也

较高。此外,从4个季节的大气边界层高度均方根误差变化看,春季明显大于其他3个季节,达到266 m,夏、秋季较为接近(约250 m),冬季降低为228 m,表明春季反演结果与激光雷达观测偏差最大,而冬季反演结果与观测最为接近,夏季和秋季介于其中。从4个季节微波辐射计反演的大气边界层高度的标准差变化看,春季最大(400 m),夏季最小(352 m),表明反演的春季边界层高度的变化幅度最大,而夏季边界层高度变化相对较为稳定。由于匹配样本中春季和冬季样本偏少,这两个季节大气边界层高度变化特征还有待更多数据分析论证。

4 反演结果检验

选取验证激光雷达探测大气边界层高度的探空廓线验证微波亮温反演大气边界层高度的正确性。图7a是2013年香河站地基微波辐射计反演得到的大气边界层高度与无线探空位温廓线(北京市气象台)计算得到的大气边界层高度的散点图,相关系数为0.71。为了进一步检验地基微波辐射计遥感反演大气边界层高度的可行性,采用了2014年香河站

地基微波辐射计和无线探空位温廓线(北京市观象台)数据(如图7b所示),相关系数为0.67。由于验证的地基微波辐射计和无线探空仪相隔60 km,数据会

存在一定误差,但结果表明直接采用微波亮温连续反演大气边界层高度是可行的。

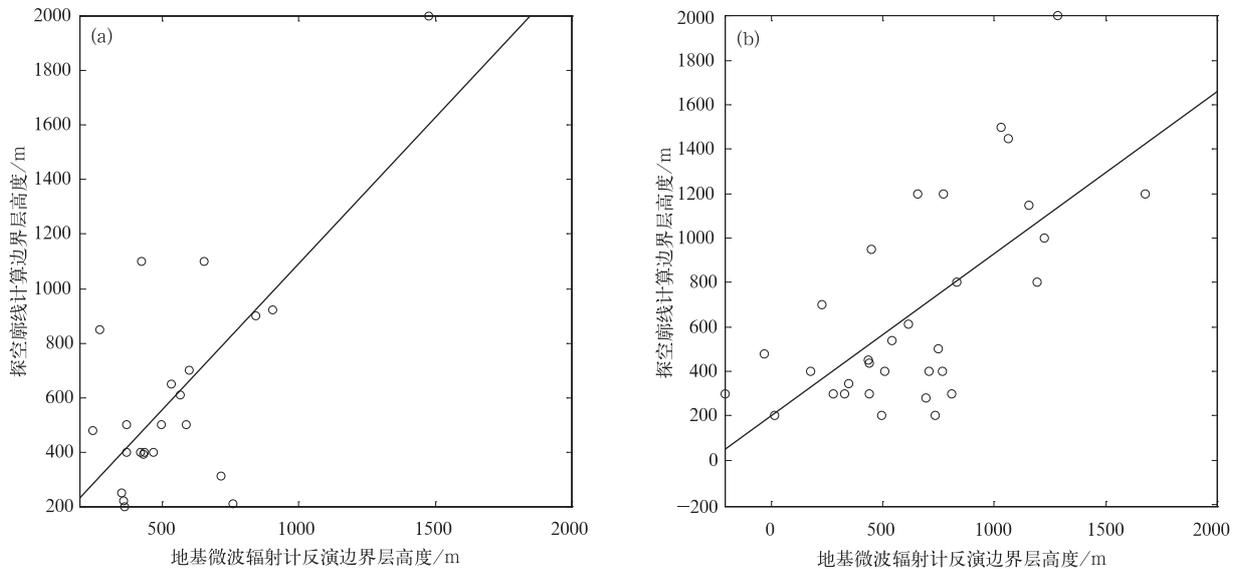


图7 香河站地基微波辐射计反演大气边界层高度与北京市观象台探空廓线计算大气边界层高度散点图

(a)2013年检验,(b)2014年检验

Fig.7 Scatte-plots of ground-based microwave radiometer boundary layer height at Xianghe Station vs sounding boundary layer height at Beijing Weather Observatory (a)the test in 2013,(b)the test in 2014

5 结论

本文使用2013年2—10月的中国科学院大气物理研究所香河大气综合观测试验站的地基微波辐射计的亮温数据和激光雷达提供的大气边界层高度数据,利用非线性神经网络和多元线性回归建立微波辐射计大气边界层高度的反演算法。论证了直接采用地基微波辐射计亮温连续反演大气边界层高度的可行性,也比较了白天与夜晚、晴空与云天和不同季节的反演结果,得到以下主要结论:

1) 非线性神经网络算法的反演能力优于多元线性回归算法,相关系数达到0.83左右,比多元线性回归算法高25%左右。

2) 晴空反演结果比云天的相关系数高,但晴空的均方根误差和标准差比云天要大。

3) 大气边界层高度均方根误差的季节变化,春季明显大于夏、秋、冬3个季节,春、夏、秋、冬4个季节也呈递减的趋势。总体看来,4个季节的BP神经网络算法反演结果与激光雷达探测结果的相关系数均接近0.80,优于全体样本反演结果(0.77),划分

季节有利于提高大气边界层高度的反演精度。

本文采用非线性神经网络算法可得到更好的边界层高度反演结果,这也表明,可以直接利用地基微波辐射计观测亮温得到高时间分辨率的大气边界层高度。今后,还需要利用更长时间的观测数据,或开展多设备的综合探测试验,进一步改进和完善微波辐射计反演算法,目前正在编译软件,扩展地基微波辐射计应用。

致谢:感谢中国科学院中层大气与全球环境探测重点实验室王普才研究员、孙丽博士、王婷博士、冉靓博士和李军博士提供激光雷达和地基微波辐射计资料。

参考文献

- [1] Stull R B. 边界层气象学导论. 杨长新,译. 北京:气象出版社, 1991.
- [2] Liu S, Liang X Z. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height. *J Climate*, 2010, 22: 5790-5809.
- [3] Scarino A J, Obland M D, Fast J D, et al. Comparison of mixed layer heights from airborne high spectral resolution lidar, ground-based measurements, and the WRF-Chem model during CalNex and CARES. *Atmos Chem Phys*, 2014, 14: 5547-5560.
- [4] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. Review and intercom-

- parison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmos Environ*, 2000, 34:1001-1027.
- [5] 王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 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.
- [6] 贺千山, 毛节泰. 微脉冲激光雷达及其应用研究进展. *气象科技*, 2004, 32(4):219-224.
- [7] 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.
- [8] Fabio D F, Giovanni S. A combined natural orthogonal functions I neural network technique for the radiometric estimation of atmospheric profiles. *Radio Science*, 1998(2):405-410.
- [9] 雷恒池, 魏重, 沈志来. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊 I):73-79.
- [10] 姚展予, 王广河, 游来光, 等. 寿县地区云中液态水含量的微波遥感. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊 I):88-95.
- [11] 魏重, 雷恒池, 沈志来. 地基微波辐射计的雨天探测. *应用气象学报*, 2001, 12(增刊 I):65-72.
- [12] 陈洪滨, 林龙福. 从 118.75 GHz 附近六通道亮温反演大气温度廓线的数值模拟研究. *大气科学*, 2003, 27(5):894-899.
- [13] 姚志刚, 陈洪滨. 利用神经网络从 118.75 GHz 附近通道亮温反演大气温度. *气象科学*, 2006, 26(3):252-259.
- [14] Cimini D, De Angelis J C, Dupont S P, et al. Mixing layer height retrievals by multichannel microwave radiometer observations. *Atmos Meas Tech Discuss*, 2013, 6:4971-4998.
- [15] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用. *应用气象学报*, 2013, 24(5):576-584.
- [16] 王振会, 李青, 楚艳丽, 等. 地基微波辐射计工作环境对 k 波段亮温观测影响. *应用气象学报*, 2014, 25(6):711-721.
- [17] 车云飞, 马舒庆, 杨玲, 等. 云对地基微波辐射计反演温度廓线的影响. *应用气象学报*, 2015, 26(2):193-202.
- [18] 夏俊荣. 华北地区大气气溶胶垂直分布特性的观测与分析. 北京:中国科学院大气物理研究所, 2010.
- [19] 蒋维楣, 徐玉貌, 于洪彬. *边界层气象学基础*. 南京:南京大学出版社, 1994.
- [20] Simon Hayki. *神经网络原理*. 叶世伟, 史忠植, 译. 北京:机械工业出版社, 2004:33-175.
- [21] Hagan M T, Demuth H B, Beale M H. *神经网络设计*. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [22] 刘旸, 官莉. 人工神经网络法反演晴空大气湿度廓线的研究. *气象*, 2011, 37(3):318-324.
- [23] 谷良雷, 胡泽勇, 吕世华, 等. 敦煌和酒泉夏季晴天和阴天边界层气象要素特征分析. *干旱区地理*, 2007, 30(6):871-878.

Retrieval of Atmospheric Boundary Layer Height from Ground-based Microwave Radiometer Measurements

Liu Sib¹⁾²⁾ He Wenyin²⁾ Liu Hongyan³⁾ Chen Hongbin²⁾

¹⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

²⁾ (LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

³⁾ (Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089)

Abstract

Atmospheric boundary layer is a key parameter for boundary layer studies, including meteorology, air quality and climate. The atmospheric boundary layer height estimates are inferred from local radiosonde measurements or remote sensing observations from instruments like laser radar, wind profiling radar or sodar. Methods used to estimate atmospheric boundary layer height from radiosonde profiles are also used with atmospheric temperature and humidity profiles retrieved by microwave radiometers. An alternative approach to estimate atmospheric boundary layer height from microwave radiometer data is proposed based on microwave brightness temperatures, instead of retrieved profiles. Using the ground-based microwave radiometer and laser radar atmospheric boundary layer height obtained in 2013 at Xianghe Station, algorithms for retrieving atmospheric boundary layer height from 14-channel microwave brightness temperatures are developed based on the nonlinear neural network and multiple linear regression methods. The atmospheric boundary layer height is derived from laser radar backscattering data using the algorithm that retrieves the most significant gradients in profiles using gradient method. Root mean square errors (RMSEs) and correlation coefficient with two kinds of method are obtained to analyze which method is better through comparison. Retrieval results with the neural network method are compared in different periods of time and weather conditions. It shows that neural network algorithm is better than the multiple linear regression algorithm because results are more consistent with the observation. The correlation coefficient between the lidar-detected and neural network algorithm retrieved boundary layer height is 0.83, which is about 26% higher than the multiple linear regression algorithm retrieved result. Also, RMSEs of the neural network algorithm retrieved values (268.8 m) are less than the multiple linear regression algorithm retrieved values (365.1 m). For different time periods and weather conditions, retrievals in spring are best of four seasons, retrievals in the clear sky are better than those in the cloudy sky. But RMSEs in the cloud sky are less than those in the clear sky. Overall, correlation coefficients in four seasons are close to 0.80. It suggests that in order to improve the retrieval precision, specific retrievals under different conditions (such as different seasons and different skies) should be carried out.

Key words: microwave brightness temperature; atmospheric boundary layer height; laser radar; neural network; multiple linear regression