

丁辉,牛生杰,张泽娇.2015.利用微脉冲激光雷达探测大气混合层高度和气溶胶垂直结构的初步研究[J].大气科学学报,38(1):85-92.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20120112001.

Ding Hui, Niu Sheng-jie, Zhang Ze-jiao. 2015. Measurements of mixed layer height and aerosol vertical profiles using a micro pulse lidar[J]. Trans Atmos Sci, 38(1):85-92. (in Chinese)

利用微脉冲激光雷达探测大气混合层高度 和气溶胶垂直结构的初步研究

丁辉,牛生杰,张泽娇

(南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,江苏 南京 210044)

摘要:采用 2008 年 5 月 14 日—12 月 28 日安徽寿县地区(116°46′55.02″E,32°33′30.18″N)MPL (micro pulse lidar,微脉冲激光雷达)资料,分析了当地混合层高度(mixed layer height,MLH)的日变化特征。利用梯度法、拐点法及归一化梯度法反演了当地混合层高度,并将 3 种方法的反演结果与 SONDE 探空确定的 MLH 做相关性分析,结果表明:由梯度法反演得到的 MLH 与探空资料确定的 MLH 高度相关(相关系数为 0.976),是 3 种方法中最适合确定寿县地区 MLH 的反演算法。利用梯度法反演了晴天无云天气条件下 MLH 的日变化,研究了当地气象条件对 MLH 的影响,结果发现:MLH 增长率与前 1 h 地表温度增长率有很好的相关性;地表风速的变化也会导致 MLH 的急剧变化;MLH 的发展滞后于气溶胶光学厚度 0.5~3 h。

关键词:微脉冲激光雷达;混合层高度;归一化相对后向散射;反演方法

文章编号:1674-7097(2015)01-0085-08 中图分类号:P407.5 文献标志码:A

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20120112001

Measurements of mixed layer height and aerosol vertical profiles using a micro pulse lidar

DING Hui, NIU Sheng-jie, ZHANG Ze-jiao

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the MPL (micro pulse lidar) data over Shouxian area (32°33′30.18″N, 116°46′55.02″E), Anhui Province from 14 May to 28 December 2008, this paper analyzes the diurnal variation of mixed layer height (MLH). Comparisons are made between MLHs retrieved by MPL retrieval methods (the gradient method, the inflection point method and the normalized gradient method) and MLH determined by the sounding data measured by SONDE. Results show that MLH retrieved from the lidar data using the gradient method are highly correlated with MLH measured by SONDE (the correlation coefficient is 0.976), and the gradient method is the most suitable retrieval algorithm in Shouxian area. The diurnal cycle of MLH on sunny days are retrieved by the gradient method, and the effect of meteorological conditions on MLH are also studied. Results show that the growth rate of MLH agrees well with the hourly increase of surface temperature one hour before. Surface wind speed and direction can also lead to rapid change of MLH. The development of MLH exhibits temporal behavior similar to that of the aerosol optical thickness, but with 0.5—3 h lag time.

Key words: micro pulse lidar; mixed layer height; normalized relative backscatter; retrieval method

收稿日期:2012-01-12;改回日期:2014-11-06

基金项目:江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究”创新团队项目资助;江苏省高校优势学科建设工程资助(PAPD);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006036)

通信作者:牛生杰,教授,博士生导师,研究方向为云雾降水物理学,niusj@nuist.ecu.cn.

0 引言

大气边界层指最靠近下垫表面的对流层底层,厚度从数百米到一两千米,是大气与下垫面直接发生相互作用的层次,是地球大气之间物质和能量交换的桥梁,和人类关系最为密切。大气边界层的科学进展是气象发展的重要标志之一(熊超超等,2010)。由于大气边界层结构,如混合层高度、卷夹层厚度等,与气象预报、气候预测、环境保护等密切相关,大气边界层的研究一直是大气科学研究的热点问题之一(Emeis et al.,2004)。

目前,通过实测资料确定混合层高度主要是利用探空资料获得的位温廓线(陆春松等,2011),这种方法切实可行且有一定的可靠性,但其观测手段难以进行连续观测。大气激光雷达精细的空间分辨率、时间上可连续测量以及较高的探测精度,可实现对大气边界层结构的实时监测。MPL(micro pulse lidar,微脉冲激光雷达)是一种弹性后向散射激光雷达,该系统结构紧凑,发射能量对人眼安全,其可靠性已在国内外很多大型试验中得到了验证,并部署在世界各处进行大气气溶胶和云层的长期自动监测。MPL因其测量准确度高、时空分辨率高及探测范围广,是当前一种重要的主动遥感工具,被广泛应用于大气气溶胶以及云层的连续、自动观测。MPL区别于传统激光雷达的收发共享光学路径,也会引发其他的问题,诸如探测器驻留脉冲修正和近端填充函数确定等,这些问题在数据处理过程中必须仔细考虑。

Chen et al.(2001)在日本驻波市进行了一年的微脉冲激光雷达连续观测,发现混合层高度(mixed layer height,MLH)的变化趋势与气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness,AOT)一致,只是时间上略有滞后。对MLH日变化及年变化的分析发现,城市混合层的变化与气象条件的季节变化有很好的相关性。Welton et al.(2002)在印度洋上空进行了气溶胶垂直廓线及光学特性的观测研究,发现在此区域海洋性边界层的高度低于1 km,并提出了一个污染性海洋大气气溶胶垂直消光的新模式。郭本军等(2008)利用微脉冲激光雷达观测了大连地区2005年11月6日的一次沙尘天气过程,发现PM₁₀的时间变化与由MPL反演的近地面消光系数相当一致,它们之间的转换系数在1.94到6.50 mg·m⁻³·km⁻¹之间,说明MPL可以实现近地面气溶胶消光系数的有效观测。Voss et al.(2001)在1999年1月14

日—2月8日进行的Aerosols99移动观测计划中,通过对微脉冲激光雷达和太阳光度计同时观测得到的气溶胶光学厚度的比较,发现两者的观测结果具有较好的一致性。贺千山和毛节泰(2005)利用北京地区的微脉冲激光雷达遥感资料及325 m铁塔的观测资料,基于导数法提出了一种自动判别边界层高度的归一化梯度法,并探讨了利用MPL的遥感结果提高对流混合层发展模式预报精度的可行性。Campbell et al.(2008)利用改进的微脉冲激光雷达数据,提出了一个基于阈值法计算云及气溶胶层高度的新算法。Huang et al.(2008)利用2007年4—5月共55 d的微脉冲激光雷达数据,结合太阳光度计资料,分析了黄土高原上空气溶胶的垂直分布特征。

1 MPL 基本原理及资料来源

MPL的探测原理可以用米散射激光雷达方程说明,其形式如下(Campbell et al.,2002):

$$n_r(r) = [(O_c(r)CE\beta(r)T^2/r^2) + n_b(r) + n_{ap}(r)]/D[n(r)]. \quad (1)$$

表示了发射功率与回波功率之间的关系,其中: $T^2 = \exp[-2\int_0^r \sigma(r')dr']$ 是大气透过率; $n_r(r)$ 是雷达探测器接收到的光电子数; $O_c(r)$ 是填充修正函数; C 是系统常数; E 为激光脉冲能量; r 是探测器到探测体之间的距离; $n_b(r)$ 是背景噪音; $n_{ap}(r)$ 是探测器驻留脉冲修正函数; $D[n(r)]$ 是探测器延时修正函数。 $\beta(r) = \beta_m(r) + \beta_a(r)$, $\sigma(r) = \sigma_m(r) + \sigma_a(r)$ 。 $\beta_m(r)$ 和 $\sigma_m(r)$ 分别为大气分子后向散射系数及消光系数,利用美国标准大气模式或探空资料,通过散射理论可得到这两个量的精确值。MPL原始数据经各项修正之后,即得到归一化相对后向散射(normalized relative backscatter,NRB)信号:

$$B_{NR}(r) = C\beta(r)T^2(r). \quad (2)$$

可见NRB信号只受大气总后向散射系数或消光系数的影响,表明该信号的时空分布能够在一定程度上反映气溶胶浓度的变化趋势,它随高度的变化表征了实际大气中气溶胶的垂直分布特征,是计算边界层高度和相关大气光学参数的基本量,可用于计算云滴散射截面、云的光学厚度、行星边界层高度、气溶胶消光系数廓线及光学厚度等(Campbell et al.,2002)。而线性去偏振比 δ_L 可作为区分气溶胶粒子类型及形状的一个潜在工具(Flynn et al.,2007)。研究发现:液态球形粒子对线性去偏振光的后向散射信号是完全去极化的 $\delta_L = 0$;纯分子大气

δ_L 典型值为 1.4%;大气气溶胶 δ_L 量级小于 10%;非球形颗粒物的 δ_L 值在 40%~70%之间;简单冰晶 δ_L 值为 50%,当有液体颗粒物存在时这个值会显著减小(Mishra et al.,2010)。结合 NRB 信号与线性去偏振比可以有效地分析边界层结构的日变化趋势。

随着雷达探测灵敏度的提高,使得人们有可能在晴空条件下获得更多的大气结构细节(魏鸣等,2007)。本文根据安徽寿县地区 2008 年 5 月 14 日—12 月 28 日晴天无云条件下的 MPL 遥感探测

$$\sigma_a(i-1) + \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(i) = \frac{X(i-1) \exp\left(\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) (\sigma_m(i-1) + \sigma_m(i)) * l\right)}{\frac{X(i)}{\sigma_a(i) + \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(i)} + \left(X(i) + X(i-1) \exp\left(\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) (\sigma_m(i-1) + \sigma_m(i)) * l\right) * l\right)} \quad (3)$$

其中: $X(i)$ 为 NRB 信号强度; l 为 MPL 的距离分辨率(0.015 km); $S_a = 50$ (单位:sr); $S_m = \sigma_m(z) / \beta_m(z) = 8\pi/3$ (单位:sr)(袁松等,2005)。 $\sigma_m(z)$ 利用 SONDE 探空资料根据大气分子瑞利散射相关理论计算。参考高度 z_c 选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度(邱金桓等,2003),在此高度上 $X(i) / \beta_m(z)$ 值应最小,一般在对流层顶附近,受 MPL 信噪比的限制,本文 z_c 的选取如下:白天(08—18 时) z_c 在 3~6 km 内寻找,夜晚 z_c 在 5~10 km 内寻找。参考高度处的气溶胶后向散射系数通过气溶胶散射比: $R(z_c) = \beta_a(z_c) / \beta_m(z_c) = 1.02$ 来确定。

资料,结合 SONDE 探空资料、常规气象资料以及 Micaps 资料分析当地混合层的变化特征。

2 气溶胶消光系数的反演

2.1 Fernald 反演方法

根据 Fernald 方法(Fernald et al.,1972),如果已知某一高度 z_c 处气溶胶粒子消光系数,则 z_c 高度以下各高度上气溶胶粒子的消光系数的后向积分公式为:

2.2 大气分子光学参数的确定

按照瑞利散射理论,考虑到非各向同性,在同性球形小粒子的散射系数公式的基础上增加一个订正项(贺千山,2006)后,得到根据 SONDE 探空资料反演大气分子消光系数的公式为:

$$\sigma_m(r) = 1.0125 \times 10^{27} \frac{1}{\lambda^4 P_0} \frac{T_0 P(z)}{T(z)}$$

$$T_0 = 288 \text{ K},$$

$$P_0 = 1013.25 \text{ hPa}, \lambda = 532 \text{ nm}. \quad (4)$$

其中: r 是粒子半径; λ 是激光波长。图 1 给出了由 NRB 信号反演得到的 2008 年 11 月 29 日 17 时和 12 月 9 日 13 时的 1 h 平均气溶胶消光系数垂直廓

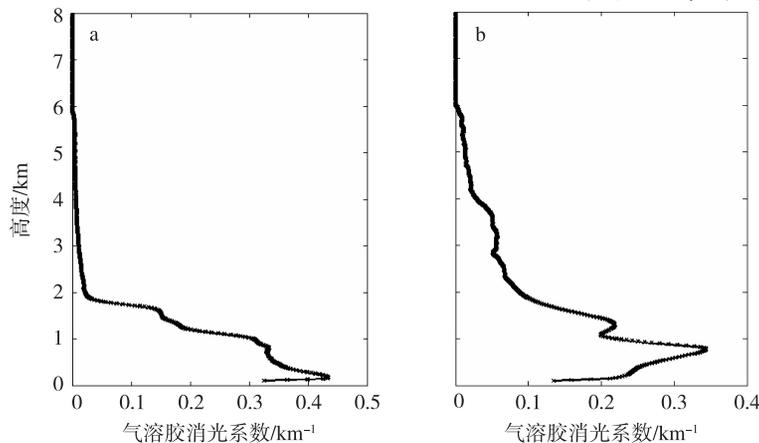


图 1 由 NRB 信号反演得到的 2008 年 11 月 29 日 17 时(a)和 12 月 9 日 13 时(b)1 h 平均气溶胶消光系数的垂直廓线(单位:km⁻¹)

Fig.1 Vertical profiles of hourly aerosol extinction coefficient retrieved from NRB (normalized relative backscatter) signal observed at (a) 17:00 BST 29 November and (b) 13:00 BST 9 December 2008(units:km⁻¹)

线。相应时刻的 AOT 分别为 0.39 和 0.57。11 月 29 日 17 时(图 1a)对流层下部有一充分发展的较厚的气溶胶层即混合层,厚度约为 2 km。大气气溶胶主要集中在混合层中,混合层以上大气比较清洁,气溶胶消光系数垂直廓线呈指数递减,其变化趋势接近于瑞利散射。12 月 9 日(图 1b)气溶胶消光系数随高度的增加降低较缓慢,污染物的垂直延伸范围较大。气溶胶消光系数垂直分布是一个明显的多层结构,1.3 km、2.8~4.0 km 处存在消光系数较大的抬升气溶胶层,图 2 可以看出 12 月 9 日 15 时之前在 1.5~4.0 km 持续存在着线性去偏振比较大的抬升气溶胶层,此气溶胶层有可能是外地移入本地或者前一天残留的污染物。

3 混合层高度的反演

3.1 混合层高度反演方法

混合层与自由大气层相比更潮湿、气溶胶含量更大,对激光束的散射量更大,因此,激光雷达很容易探测到混合层与自由大气之间的边界(Melfi et al., 1985)。Flamant et al.(1997)将激光雷达距离订正信号对高度的一阶导数最小值所在的高度定义为混合层顶高,即为梯度法。Menut et al.(1999)提出的拐点法将距离订正信号对高度的二阶导数最小值所在高度定义为混合层顶高。贺千山和毛节泰(2005)提出了归一化梯度法,去除了信号强度随高度变化对反演结果的影响。

本文首先对 NRB 信号做 6 min 平均,此平均时间与边界层中大气湍流的特征时间尺度一致,分别利用上述三种方法反演 MLH,并将反演结果与探空

资料进行比较。SONDE 探空得到的温度、位温、相对湿度及风速等特征量在混合层顶均会表现出较大的梯度,可验证 MLH 反演方法的正确性(李丽平等,2013)。图 3a、b、c 是上述 3 种方法得到的 11 月 12 日 13 时 25 分的 MLH,分别为 0.877、0.832 及 0.892 km,与图 3d、e、f、g 中强逆温出现的高度(0.867 km)比较一致,拐点法的结果稍低于梯度法,与 Dupont et al.(1994)的研究结果一致。温度及位温垂直廓线在 0.867 km 处开始出现强逆温,此高度以上为顶盖逆温层,该层之下水汽几乎均匀混合,同时刻的 NRB 垂直廓线也有相似的变化趋势,表明大气气溶胶在混合层中的分布类似于水汽分布较均匀。其中,位温廓线是利用探空资料中温度与气压垂直廓线根据位温定义的计算值而非实测值。

选择 10—12 月共 31 d 的数据,分别对由上述 3 种方法反演得到的 MLH 与 SONDE 探空确定的 MLH 做相关性分析(图 4),结果发现:梯度法反演得到的 MLH 与探空资料确定的 MLH 相关性最好, $r=0.976$;其次为归一化梯度法, $r=0.835$;拐点法的结果最差。其中梯度法与归一化梯度法确定的 MLH 之间的相关系数 $r=0.851$,说明梯度法和归一化梯度法均可以很好地确定寿县地区的 MLH。本文选择相关性最好的梯度法反演 MLH 的日变化,由于 MPL 的低信噪比,有时这种反演方法会产生错的 MLH 值。另外,其他气象原因,如:云层、霾等也会偶尔阻碍 MLH 的反演。为了去除上述错误值,检查整个 MLH 数据列去除其中被认为是错误的数点,最后对整个 MLH 数据列做 5 点滑动平均得到 MLH 的日变化。

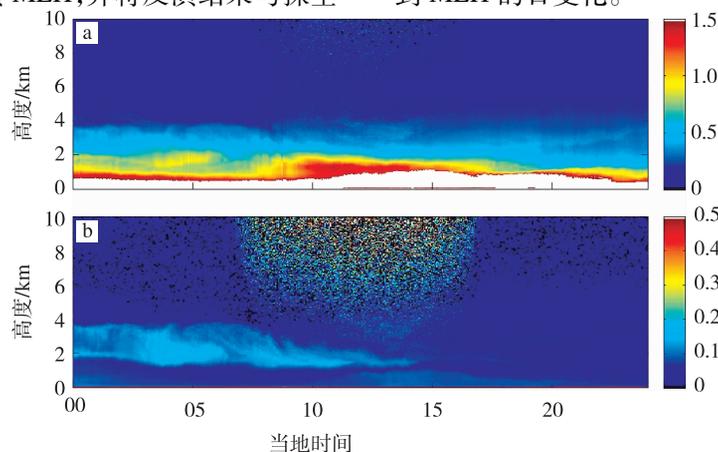


图 2 2008 年 12 月 9 日归一化相对后向散射信号(a)及线性去偏振比(b)的时间—高度剖面

Fig.2 Time-altitude cross-sections of (a) normalized relative backscatter signal and (b) linear depolarization ratio on 9 December 2008

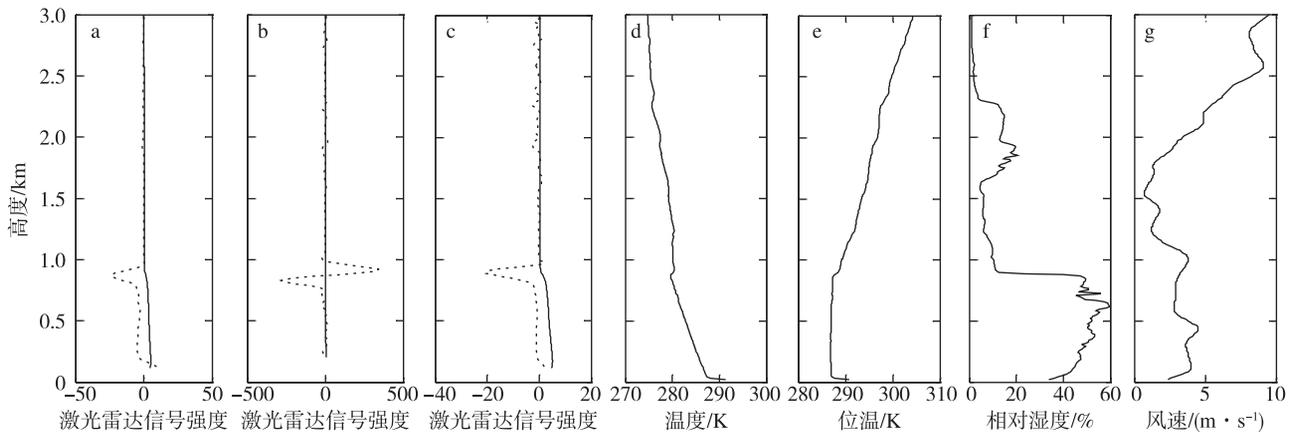


图 3 梯度法、拐点法及归一化梯度法反演的混合层高度与探空廓线的对比 a.梯度法由 NRB 信号(实线)得到的一阶导数(虚线);b.拐点法由 NRB 信号(实线)得到的二阶导数(虚线);c.归一化梯度法由 NRB 距离订正信号(实线)得到的一阶导数(虚线);d.温度(K)的垂直廓线;e.位温(K)的垂直廓线;f.相对湿度(%)的垂直廓线;g.风速(m/s)的垂直廓线

Fig.3 Comparisons between MLHs retrieved by (a) the gradient method, (b) the inflection point method and (c) the normalized gradient method(a.the first order derivative(dashed) of NRB signal(solid); b.the second derivative(dashed) of NRB signal(solid); c. the first order derivative (dashed) of normalized NRB signal (solid)) and vertical profiles of (d) temperature(K), (e) potential temperature(K), (f) relative humidity(%) and (g) wind speed(m/s) from SONDE

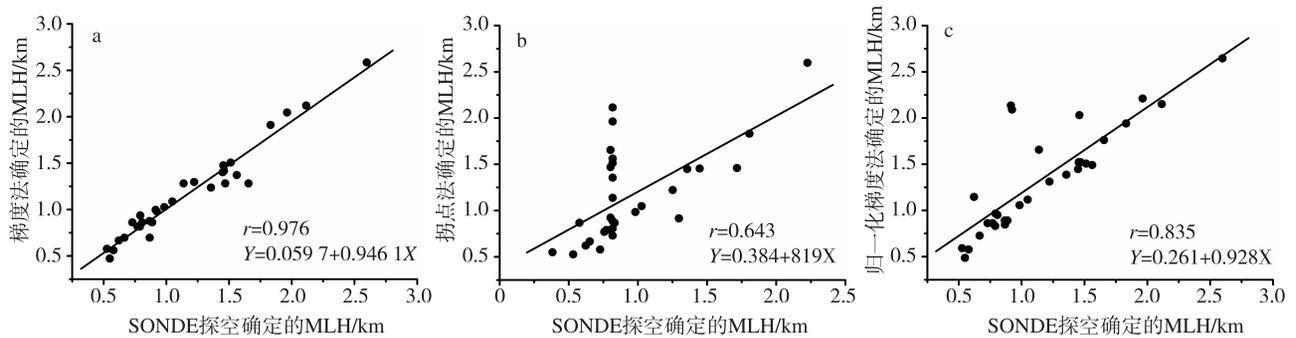


图 4 由梯度法(a)、拐点法(b)及归一化梯度法(c)反演得到的 MLH 与 SONDE 探空廓线确定的 MLH 的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between MLHs retrieved by (a) the gradient method, (b) the inflection point method and (c) the normalized gradient method and MLH measured by SONDE

3.2 MLH 日变化

图 5 给出了 NRB 信号及由 3 种方法反演得到的 MLH 的日变化特征:日出前,边界层比较稳定,混合层较浅;08 时之后逆温层被打破混合层开始缓慢加厚,10 时左右混合层开始迅速发展且残余层被完全破坏,边界层结构从早晨的分层结构转变为充分混合的混合层,12 时左右 MLH 达到最大值并一直维持至 20 时左右。从图 5 中可以看出:3 种反演方法得到的 MLH 在白天比较一致,当有残余层存在时,梯度法追踪的是沉降层的边界,而归一化梯度法追踪的是残余层顶的高度,拐点法的结果介于梯度法与归一化梯度法之间。图 6a 是 12 月 6 日 MLH 与地表温度的日变化,白天(10—18 时) MLH 的变化趋势与地表温度的变化趋势比较一致,只是

MLH 的增长略滞后于地表温度 1~2 h。利用 11 月 11—13 日的数据分析了 MLH 增长率与前 1 h 地表温度之间的相关性(图 6b),两者的线性相关系数 $r=0.787$,与 Stull(1985)的研究结果一致,说明边界层中热力强迫是混合层发展的主导动力。

在分析的过程中发现地表风速是控制 MLH 发展的另一个重要因素,地表风速、风向的变化也会导致 MLH 的剧烈变化。从图 7 可以看出,08 时 30 分之后风向由偏南风转为北风,且风速急剧增加,导致相应时刻 MLH 的急剧增长。11—16 时风速保持在 3 m/s 左右,MLH 也持续在 1.2 km 高度以上,比较稳定,此后风速与 MLH 表现出了相似的波动性。

图 8 给出了对流层中气溶胶光学厚度 AOT 的日变化,MLH 与 AOT 的变化趋势基本一致,只是

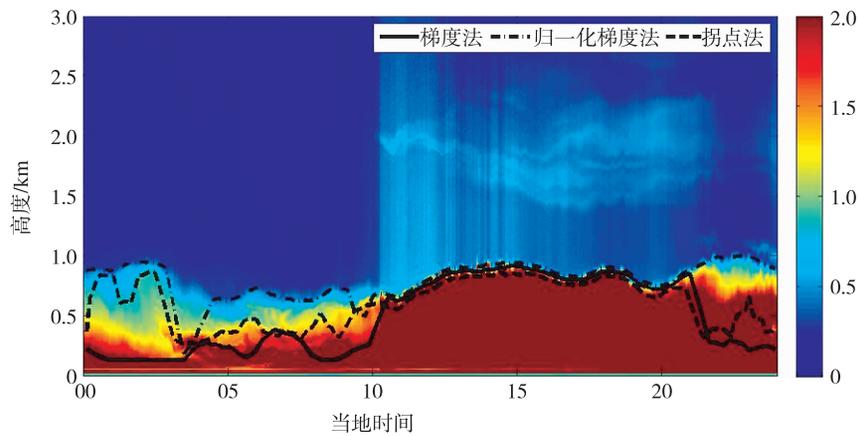


图 5 2008 年 11 月 12 日 NRB 时间—高度剖面以及由梯度法、归一化梯度法及拐点法反演得到的 MLH 的日变化(单位:km)

Fig.5 Time-altitude cross-section of NRB and the diurnal variations of MLHs retrieved by the gradient method, the normalized gradient method and the inflection point method on 12 November 2008(units: km)

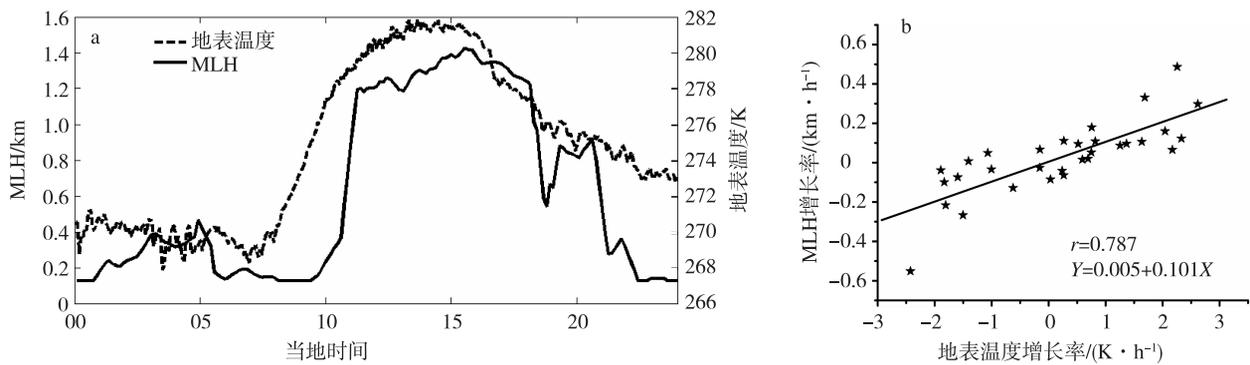


图 6 MLH(km)和地表温度(K)的日变化(a)以及 MLH 增长率与前 1 h 地表温度增长率的相关性分析(b)

Fig.6 (a)Diurnal variations of MLH(km) and surface temperature(K), and (b)correlation analysis between the growth rate of MLH and the hourly increase of surface temperature one hour before

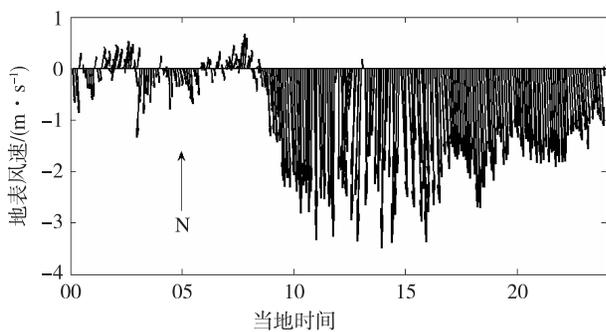


图 7 2008 年 12 月 6 日地表风速(m/s)及风向的日变化
Fig.7 Diurnal variations of surface wind speed(m/s) and wind direction observed on 6 December 2008

MLH 的发展在时间上略有滞后。通过对长期资料的分析研究发现,MLH 略滞后于 AOT 的发展 0.5~3 h,MLH 这种滞后性的可能原因是清晨近地面霾的扩散速度比边界层中热力对流快。

3.3 MLH 的逐月变化

根据 Micaps 云量数据选择 MPL 观测期间晴天无云条件下的 MPL 数据(其中,7 月没有符合要求的观测数据),利用梯度法反演每日的 MLH 并计算月平均值,分析 MLH 的逐月变化特征。图 9 给出了 2008 年 5—12 月寿县地区 MLH 及地表温度的逐月变化,发现 MLH 开始急剧增加的时间由从 5 月的 06 时左右逐渐推迟到了 12 月的 09 时左右。最大混合层高度也逐月推迟,10 月月平均 MLH 最大值为 1.23 km,出现于 13 时;11 月月平均 MLH 最大值为 1.24 km,出现于 14 时;12 月月平均 MLH 的最大值为 0.834 km,出现于 14 时。地表温度月平均值的增长提前于 MLH 月平均值 1~2 h,与日平均值得变化趋势一致。12 月混合层发展最弱,平均 MLH 低于 0.834 km。5—9 月由于数据样本资料较少,不能够反映真实的月变化趋势。

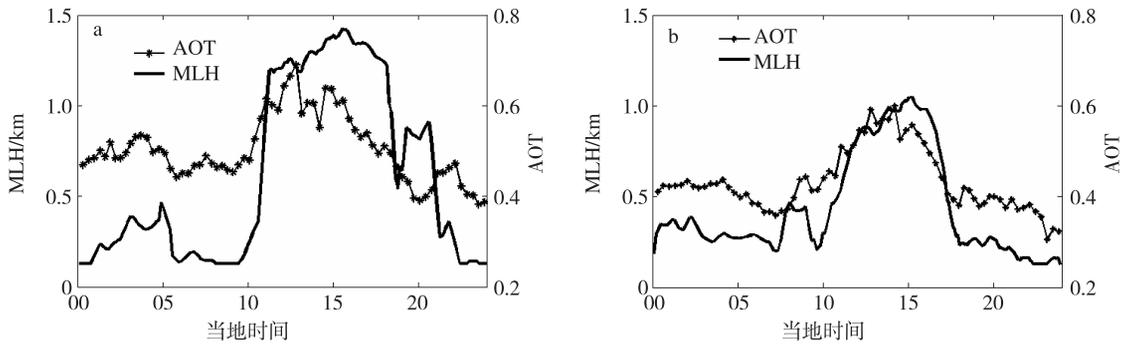


图 8 2008 年 12 月 6 日(a)和 9 日(b)MLH(km)和 AOT 的日变化

Fig.8 Diurnal variations of MLH (km) and AOT (aerosol optical thickness) observed on (a) 6 and (b) 9 December 2008

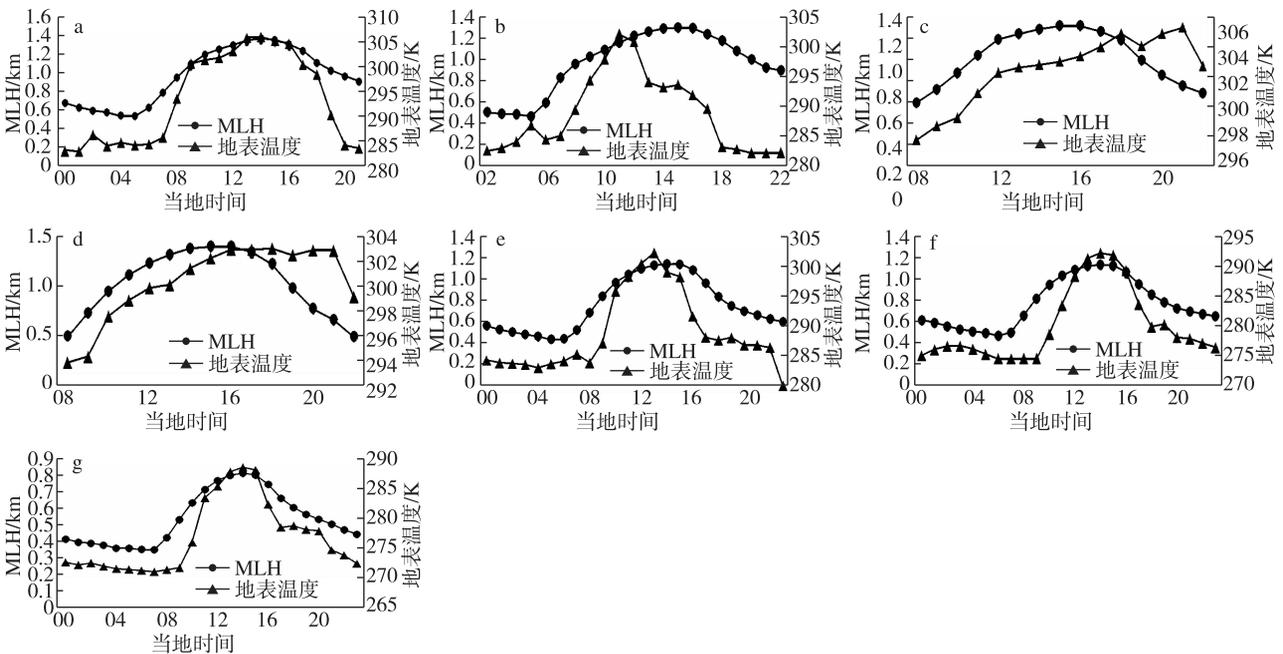


图 9 2008 年 5 月(a)、6 月(b)、8 月(c)、9 月(d)、10 月(e)、11 月(f)、12 月(g)月平均的 MLH(km)和地表温度(K)的日变化(7 月无符合要求的观测数据)

Fig.9 Diurnal cycles of monthly averaged MLH (km) and surface temperature(K) in (a) May, (b) June, (c) August, (d) September, (e) October, (f) November, and (g) December 2008 (there are no qualified data in July)

4 结论

1) 线性去偏振比作为气溶胶粒子类型及形状的指示剂,可结合 NRB 时间高度分布来分析大气气溶胶及边界层的结构特征。

2) 用梯度法、拐点法及归一化梯度法反演了 MLH,选择晴天无云天气条件下的 MLH 与探空资料确定的 MLH 做相关性分析,结果表明梯度法是 3 种方法中最适合寿县地区的 MLH 反演算法。

3) 通过对长期资料的分析发现,MLH 与 AOT 的日变化趋势基本一致,只是 MLH 的发展滞后于 AOT 约 0.5~3 h;地表风速、风向的变化也会导致

MLH 的剧烈变化。

4) 结合地表温度、风速、能见度等常规气象资料分析 MLH 的日变化,结果发现相同气象条件下 MLH 的日变化趋势有可能会表现出较大的差异,即 MLH 的日变化与引发它的气象条件并不一一对应。

由于有的月数据样本较少,MLH 月平均值的结果缺少代表性,因此,MLH 逐月变化特征还有待进一步研究。

参考文献:

郭本军,贺千山,李成才,等.2008.大连一次沙尘天气的遥感研究[J].大气科学学报,31(5):624-632.

- 贺千山.2006.微脉冲激光雷达研究对流层气溶胶光学属性和分布特征[D].北京:北京大学.
- 贺千山,毛节泰.2005.北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究[J].气象学报,63(3):374-384.
- 李丽平,成丽萍,靳莉莉,等.2013.北太平洋混合层深度异常及其与中国夏季降水的关系[J].大气科学学报,36(1):20-28.
- 陆春松,牛生杰,岳平,等.2011.南京冬季雾多发期边界层结构观测分析[J].大气科学学报,34(1):58-65.
- 邱金桓,郑斯平,黄其荣,等.2003.北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J].大气科学,27(1):1-7.
- 魏鸣,秦学,王啸华,等.2007.南京地区大气边界层晴空回波研究[J].大气科学学报,30(6):736-744.
- 熊超超,谢丽萍,吴维.2010.大气边界层探测技术初步分析[J].气象水文海洋仪器,3:77-80.
- 袁松,辛雨,周军.2005.合肥市郊低层大气的激光雷达研究[J].大气科学,29(3):387-395.
- Campbell J R, Hlavka D L, Welton E J, et al. 2002. Full-time, eye-safe cloud and aerosol lidar observation at atmospheric radiation measurement program sites; Instrument and data processing[J]. J Atmos Oceanic Technol, 19:431-442.
- Campbell J R, Sassen K, Welton E J, et al. 2008. Elevated cloud and aerosol layer retrievals from micropulse lidar signal profiles[J]. American Meteorological Society, 25:685-700.
- Chen W, Kuze H, Uchiyama A, et al. 2001. One-year observation of urban mixed layer characteristics at Tsukuba Japan using a micro pulse lidar[J]. Atmos Environ, 35:4273-4280.
- Dupont E, Pelon J, Flamant C, et al. 1994. Study of the moist convective boundary layer structure by backscatter lidar[J]. Bound-layer Meteor, 69:1-25.
- Emeis S, Munkel C, Vogt S, et al. 2004. Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous sodar, rass, and ceilometer measurements[J]. Atmos Environ, 38(2):273-286.
- Fernald F G, Herman B H, Reagan J A, et al. 1972. Determination of aerosol height distribution by lidar[J]. J Appl Meteor, 11:482-489.
- Flamant C, Pelon J, Flamant P H, et al. 1997. Lidar determination of the entrainment zone thickness at the top of the unstable marine atmospheric boundary layer[J]. Bound-layer Meteor, 83:247-284.
- Flynn C J, Mendoza A, Zheng Y H, et al. 2007. Novel polarization-sensitive micropulse lidar measurement technique[J]. Optics Express, 15(6):2785-2790.
- Huang J P, Huang Z W, Bi J R, et al. 2008. Micro-pulse lidar measurements of aerosol vertical structure over the Loess Plateau [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 1(1):8-11.
- Melfi S H, Sphinhirne J D, Chou S H, et al. 1985. Lidar observations of the vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean[J]. Climate Appl Meteor, 24:806-821.
- Menut L, Flamant C, Pelon J, et al. 1999. Urban boundary layer height determination from lidar measurements over the Paris area[J]. Applied Optics, 38(6):945-954.
- Mishra M K, Rajeev K, Bijoy V, et al. 2010. Micropulse lidar observations of mineral dust layer in the lower troposphere over the southwest coast of Peninsular India during the Asian summer monsoon season[J]. Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics, 72(17):1251-1259.
- Stull R B. 1985. An introduction to boundary layer meteorology [M]. Netherlands; Kluwer Academic Publisher.
- Voss K J, Welton E J, Quinn P K, et al. 2001. Lidar measurements during aerosols99 [J]. J Geophys Res, 106(D18):20821-20831.
- Welton E J, Voss K J, Quinn P K, et al. 2002. Measurements of aerosol vertical profiles and optical properties during INDOEX 1999 using micropulse lidars[J]. J Geophys Res, 107(D19):1029-1049.

(责任编辑:张福颖)