

台风外围环流对沿海地区大气边界层结构的影响研究

刘娜娜^{1,2,3}, 罗涛^{2,3*}, 韩亚娟^{2,3,4}, 杨凯旋^{2,3,4}, 巫阳^{1,2,3}, 张坤^{1,2,3},
翁宁泉^{1,2,3**}, 李学彬^{2,3}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;

⁴中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘要 结合茂名外场观测数据以及气象要素再分析数据,对台风外围环流影响和局地海陆风环流(SLBC)影响下沿海地区的大气边界层(ABL)结构识别方法和特征规律展开研究。利用气象要素探空数据和微脉冲激光雷达(MPL)观测数据进行了大气边界层高度(BLH)识别方法的适用性分析,提出了一种新的基于微脉冲激光雷达的BLH识别方法,以有效提高复杂边界层结构情况下激光雷达识别BLH结果的准确性,进而分析了受大尺度和局地环流影响的ABL结构以及BLH的时空变化特征。结果表明:沿海地区在没有大尺度天气系统的控制时,局地SLBC的影响较为显著,会使ABL出现多层复杂结构,BLH表现出波峰和波谷交替出现的日变化规律;BLH开始增长的时间一般出现在白天的陆风-海风转换时刻,最大值一般出现在正午气溶胶层顶的位置,即2 km左右;BLH下降的时间通常伴随着夜间的海风-陆风转换,最小值一般出现在夜间残留层以下稳定边界层顶的位置,低至500 m左右。而台风外围环流控制下,局地SLBC引起的局地对流现象会被抑制,ABL昼夜交替的空气上升、下沉运动减弱甚至消失,整个ABL内气溶胶垂直分布较为均匀,BLH与气溶胶层顶基本重合,维持在2 km左右,BLH变化波动不大且没有比较明显的日变化规律。

关键词 大气光学; 台风外围环流; 海陆风环流; 边界层结构; 边界层高度

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1901004

Influence of Typhoon Peripheral Circulation on Atmospheric Boundary Layer Structure in Coastal Areas

Liu Nana^{1,2,3}, Luo Tao^{2,3*}, Han Yajuan^{2,3,4}, Yang Kaixuan^{2,3,4}, Wu Yang^{1,2,3},
Zhang Kun^{1,2,3}, Weng Ningquan^{1,2,3**}, Li Xuebin^{2,3}

¹School of Environmental Science & Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China;

⁴Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-02-20; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0213101)、自然科学基金面上项目(41875041)、安徽省自然科学基金杰出青年项目(2008085J19)

通信作者: *luotao@aiofm.ac.cn; **wnq@aiofm.ac.cn

Abstract In this paper, we investigate the identification methods and characteristics of the atmospheric boundary layer structure (ABL) in coastal areas under the influence of typhoon peripheral circulation and local sea-land breeze circulation (SLBC) based on the field observation data and the reanalysis data of meteorological elements in Maoming. We use the meteorological element sounding data and the micro-pulse lidar (MPL) observation data to analyze the applicability of the retrieving method of the atmospheric boundary layer height (BLH). Then, we propose a new MPL-based BLH recognition method, which can greatly improve the BLH results with the complex boundary layer structure. Furthermore, we analyze the ABL structure and the characteristics of the temporal and spatial changes in the atmospheric BLH under the influence of large-scale and local SLBC. In coastal areas, the influence of local SLBC is more significant without the control of large-scale weather systems and thus the ABL will have a multi-layered complex structure. In addition, the BLH shows the daily variation of wave crests and troughs. Generally, BLH starts to grow at the time of land-sea breeze transition in the daytime, and the maximum is generally about 2 km at the top of the aerosol layer at noon. Then, BLH decline is usually accompanied by the sea-land breeze transition at night, and the minimum generally appears at the stable boundary layer top below the residual layer, as low as about 500 m. Under the control of typhoon peripheral circulation, the local convection caused by the local SLBC will be suppressed. The air rising and sinking of the ABL alternation will weaken or even disappear. The vertical distribution of aerosols in the ABL is relatively uniform, and BLH and aerosol top basically coincide at about 2 km. The BLH changes little, without obvious diurnal variation.

Key words atmospheric optics; typhoon peripheral circulation; sea-land breeze circulation; boundary layer structure; boundary layer height

OCIS codes 010.3920; 010.4450; 010.7030; 010.1290

1 引 言

大气边界层(ABL)是下垫面与自由大气之间的热量、动量、水汽交换以及垂直混合的重要过渡层。更好地理解大气边界层结构,对了解大气动力学以及气候变化特征具有重要的意义^[1]。大气边界层高度(BLH, H_{BL})作为表征边界层结构的长度尺度,在天气、气候以及空气质量模式中作为重要的输入参数,是判断湍流混合、对流传输、垂直扩散和云的形成的重要指标^[2-4]。

尽管了解大气边界层的结构变化很重要,但是 BLH 很难通过气象测量方法直接获得^[5],需要根据 BLH 的定义,通过分析热力和动力学相关变量或气溶胶相关参数,间接地获得 BLH 的值^[6]。不同的定义,会获得不同的 BLH 结果。已有的研究表明,理查森数(RI)法是计算 BLH 的一种可靠方法^[6]。但是,利用 RI 法时需要利用大气温度和风速廓线等信息,而获得实时的大气廓线是非常困难的。在实际的观测过程中,气溶胶激光雷达可以实时获取边界层气溶胶信息。由于通常边界层气溶胶内气溶胶含量较多,且其垂直分布与边界层热力和动力学结构密切相关,因此气溶胶激光雷达常被用来提供实时的 BLH 信息^[7-9]。研究表明,在湍流较弱的夜间,陆地上稳定边界层之上的残留层仍然有很高的气溶胶含量^[9],因此仅仅通过激光雷达回波信号的数据很难区分边界层的气溶胶和残留层中的气溶

胶,需要结合探空等方法获得边界层的热力和动力学结构特征,来确定合适的激光雷达 BLH 的反演结果^[10]。

研究表明不同的气象和天气过程对 BLH 有重要的影响^[11]。台风是影响我国天气气候重要的天气系统之一,是发生在热带海洋面上的一种强烈的暖性气旋性涡旋,也是中国沿海和一些内陆地区的重大自然灾害之一,对污染物的传输和分布有着重要的影响^[12-13]。了解台风前后大气边界层结构的变化,对加深台风对能量交换、污染物扩散以及对流输送过程影响的认识有重要的意义。前期研究表明:登陆台风能够使大气边界层从 2 km 左右迅速下降,甚至达到 500 m^[12,14];发生台风期间,粗颗粒物水平升高,能见度下降^[15],大陆地区 550 nm 波段的气溶胶光学厚度明显升高,并逐步向海区扩散^[16];而在台风过后,气溶胶光学厚度明显降低,气溶胶单位体积粗质粒所占比重减小^[17]。宋丽莉等^[18]研究了登陆台风的湍流特征,探讨了在登陆台风的中心、靠近中心位置的强烈影响区域和台风外围环流影响地区近地层的湍流特征,研究表明在不同的影响区域,湍流特征有所不同。范绍佳等^[19]用中尺度气象模式 MM5 结合实测资料模拟分析得出结论,认为系统风的强弱对局地环流有显著的影响。研究表明:沿海地区在未受大的天气系统影响时,主要受局地海陆风环流(SLBC)的控制^[20],大气边界层有独特的日变化特征^[21];在受到台风等强对流天

气时,局地 SLBC 会被打破,大气边界层结构也会发生变化。

以往关于台风外围环流的研究主要涉及对 PM_{2.5}、臭氧以及空气质量和边界层特征的影响方面^[12,22-26]。本文将利用茂名地区受台风外围环流以及 SLBC 影响的观测数据,研究在台风外围环流和局地 SLBC 共同作用下大气边界层结构变化和演变特征,建立适用于不同复杂程度边界层结构的 BLH 识别方法,分析两种环流影响下 BLH 的时空变化特征,旨在为进一步研究台风对沿海地区对流传输以及垂直扩散的影响提供数据参考。

2 数据和方法

2.1 实验及数据简介

2018 年 9 月 27 日至 10 月 9 日,中国科学院合肥物质科学研究院在中国气象局广州热带海洋气象研究所茂名博贺海洋气象科学试验基地(21.45°N, 111.31°E)开展了近岸大气边界层气象和环境特性观测。实验开展期间,受两次台风的影响,茂名地区天气变化明显,可以作为研究台风外围环流对局地大气边界层影响的典型地区。

本实验使用了多组外场实验观测数据以及官方发布的气象数据,包括:

1) Vaisala 公司生产的气象变送器 WXT520 采集的近地面气象数据。WXT520 是一个包含 6 个气象传感器的低功耗设备,结构紧凑,易于安装和维护^[27]。WXT520 传感器的具体性能特征见 Victor Villagran^[27]。它被安装在距离地面 2 m 高的通量测量塔上,能够以 5 s⁻¹ 的速率提供平均气压、气温、相对湿度、风向、风速、降水数据。测量数据通过远程传输到控制计算机上,实现数据的远程查看和自动下载。其中,WXT520 测量的风向表示风吹过来的方向,0°、90°、180°和 270°分别代表北风、东风、南风 and 西风。

2) 微脉冲激光雷达(MPL)垂直观测数据。MPL 可以测量 532 nm 的气溶胶后向散射信号,时间分辨率为 5 min、垂直分辨率为 30 m,探测范围在白天为 5 km 左右,而在夜间可以达到 15 km^[28-29]。本次实验期间对茂名地区气溶胶光学特性进行了连续观测,并利用 MPL 观测的回波信号计算了气溶胶消光系数^[30-31],利用原始信号梯度法和消光系数梯度法计算了 BLH^[9]。

3) 气象要素探空数据。我们在实验期间对茂名地区展开了平均一天两次的气象要素探测,主要

包括大气温度、相对湿度、风速和风向等常规气象参数廓线。实验用来测量的微温传感器技术指标为^[32]:统计平均时间为 5 s,带宽为 0.05~20 Hz,垂直分辨率约 20 m。本文利用探空数据的位温梯度法以及 RI 法来识别 BLH^[9,33-34]。

2.2 边界层高度的识别方法

近地表气溶胶因湍流和对流运动而混合于大气边界层中,气溶胶的垂直结构受大气的热力和动力学结构的影响很大。因此,气溶胶的垂直结构被认为是 BLH 的良好示踪剂^[7]。利用激光雷达后向散射信号强度,可以直接反演出垂直方向上的气溶胶消光系数廓线,进而识别出边界层高度。通常使用的方法包括:阈值法、梯度法和方差法等^[9,33]。其中,梯度法简单方便,能够有效地进行 BLH 的识别。本研究讨论了激光雷达原始信号梯度法和消光系数梯度法识别 BLH 的适用性及差异,计算方法可表示为

$$H_{E_gra} = \min\left(\frac{\delta E}{\delta H}\right), \quad (1)$$

$$H_{\sigma_gra} = \min\left(\frac{\delta \sigma}{\delta H}\right), \quad (2)$$

式中: E 为信号强度; σ 为信号消光系数, H 为激光雷达探测高度。

本研究同样利用探空数据进行大气边界层高度的识别,并与 MPL 反演结果作对比。传统的利用探空资料计算 BLH 的方法有很多种,包括 RI 法、总体 RI 法、逆温法、位温梯度法等^[35]。本研究选择了位温梯度法以及 RI 法进行大气边界层高度的识别,表达式为

$$H_{\theta_gra} = \max\left(\frac{\delta \theta}{\delta H}\right), \quad (3)$$

$$\xi_{RI} = \frac{gH[\theta(H) - \theta(s)]}{\theta(s)\{[u(H) - u(s)]^2 + [v(H) - v(s)]^2\}}, \quad (4)$$

式中: θ 表示位温; u 和 v 分别为该气层的纬向、经向风速; s 为所选气层的底层高度; g 为重力加速度; ξ_{RI} 表示理查森数。RI 法将大于临界值($\xi_{RI} = 0.25$)的高度最小值作为 $H_{RI,min}$,该方法既适用于稳定边界层,也适用于对流边界层^[33]。RI 法将 BLH 与地表加热、风切变和逆温等联系起来,赋予了 BLH 更多的物理意义。

目前并没有普适的 BLH 定义^[6,36],由于边界层过程的复杂性,使用不同物理量识别的 BLH 结果往往无法一致。本研究将利用外场实验观测数据对

比不同复杂程度的边界层下不同方法对 BLH 的识别结果,分析 BLH 识别方法的适用性。

3 台风天气过程以及环流形势分析

3.1 台风天气过程简介

2018 年 9 月 21 日联合台风警报中心率先将西北太平洋洋面上生成的热带气旋升格为热带风暴,同日,日本气象厅给予其国际编号 1824,并将其命名为“潭美”,稍后我国中央气象台亦将其认定为热带风暴。此后,“潭美”稳定地向西偏北方向移动,横过西北太平洋。9 月 24 日 5 时许,我国中央气象台将其升格为超强台风。此后,“潭美”陷入鞍场,移速明显减缓。9 月 29 日“潭美”转向北偏东方向移动。10 月 1 日,我国中央气象台认定其已转化为温带气旋并对其停止编号。

2018 年 9 月 29 日联合台风警报中心率先将 2018 年 9 月 22 日在西北太平洋洋面上生成的热带气旋升格为热带风暴,同日,日本气象厅给予其国际编号 1825,并将其命名为“康妮”。此后,“康妮”稳定地向西偏北转西北方向移动,强度逐渐加强。

10 月 1 日 17 时许,我国中央气象台将其升格为超强台风。10 月 2 日 8 时许,其强度开始减弱。10 月 5 日下午,“康妮”向北偏东方向移动,强度继续减弱。10 月 7 日 8 时,我国中央气象台认定其转化为温带气旋并对其停止编号。

台风“潭美”运动过程中,距离实验场地茂名最近时间为 2018 年 9 月 29 日,中心风速为 45 m/s,14 级强台风。台风“康妮”运动过程中,离茂名最近的时间为 2018 年 10 月 4 日,中心风速为 30 m/s 左右,12 级台风。受前后两次台风的影响,期间海南、广东大部普降中到大雨。台风最佳路径数据集可从中国气象局热带气旋资料中心(CMA)获取^[27]。

3.2 两次台风对茂名地区环流形势的影响分析

根据 WXT520 地面气象站观测的外场,观测期间茂名近地面风场随时间的变化(图 1),以及茂名站点的地理位置和海岸线走向,发现 2018 年 9 月 30 日—10 月 3 日、10 月 7 日—10 月 8 日两个时间段茂名受局地 SLBC 的影响,近地面风场呈海陆风昼夜交替出现的特征。

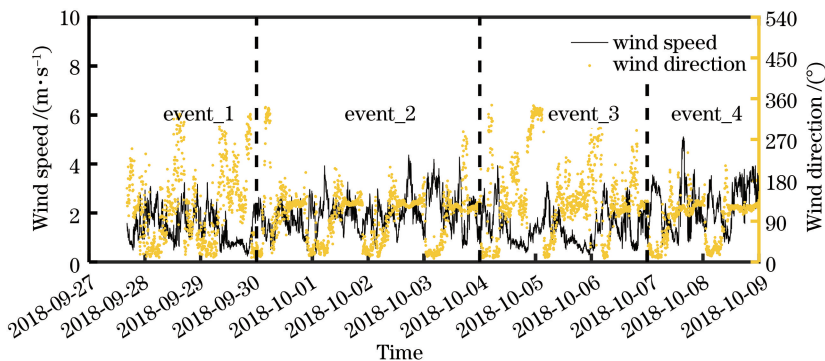


图 1 茂名近地面的风场变化示意图,图中 0°代表正北风

Fig. 1 Near-surface wind field variation in Maoming, in which 0° represents the north wind

因此,本研究将整个实验观测过程分为 4 个阶段。事件 1: 茂名地区大气环流受到台风“潭美”(1824)影响的时间段(2018 年 9 月 27 日—9 月 30 日)。事件 2: 台风“潭美”过后,“康妮”到来前茂名受局地环流影响的阶段(9 月 30 日—10 月 4 日)。事件 3: 茂名地区大气环流受到台风“康妮”(1825)影响的时间段(10 月 4 日—10 月 7 日)。事件 4, 台风“康妮”过后, 茂名受局地 SLBC 影响的阶段(10 月 7 日—10 月 9 日)。即事件 1 和事件 3 为两次受台风影响的时间段,事件 2 和事件 4 为弱天气系统控制下,茂名受局地 SLBC 影响的时间段。

在整个实验开展期间,当地风速较小,在 0~

5 m/s 之间,这是由于两个热带气旋台风距离茂名的位置较远,最近距离也有 2000 km 左右,因此茂名地区仅受到台风外围环流的影响,风速的变化不大。而且在海陆风日,风速整体也偏小^[37]。但是风向变化比较显著,在事件 1 和事件 3 中,茂名近地面风向变化无规律,而在事件 2 和事件 4 中,风向有明显的日变化规律,白天风向在 90°~180°之间(海风),夜间风向<90°(陆风)。每天上午 09:00 和夜间 23:00 左右,各存在一个短暂的海陆风转换时刻,转换时间短且界限分明,转换时刻是由海陆热力差异引起的大气平流现象决定,转换时刻的大气平流场为典型的海陆风日局地环流风场^[20]。

4 结果和讨论

4.1 受台风影响前后 BLH 识别方法的适用性分析

在台风外围环流或 SLBC 的影响下,大气边界层结构有显著的区别,2.2 节所述的 BLH 识别结果也有明显的差异。排除有边界层云存在的数据,本节选择两个典型大气边界层结构下的观测结果[图 2(a)和图 2(b)],对不同 BLH 识别方法的适用性进行分析,寻找合适的识别方法,以尽量减

小基于激光雷达和传统的探空数据识别 BLH 得到的结果之间的差异。图 2(a)表示受台风外围环流影响下的大气边界层结构典型特征以及 BLH 识别结果,数据来源是 2018 年 10 月 6 日 19 时 44 分的探空数据和探空数据前后半小时激光雷达平均廓线。图 2(b)表示受局地 SLBC 影响下的大气边界层结构典型特征以及 BLH 识别结果,选自 2018 年 10 月 2 日 19 时 26 分的探空数据和激光雷达数据。

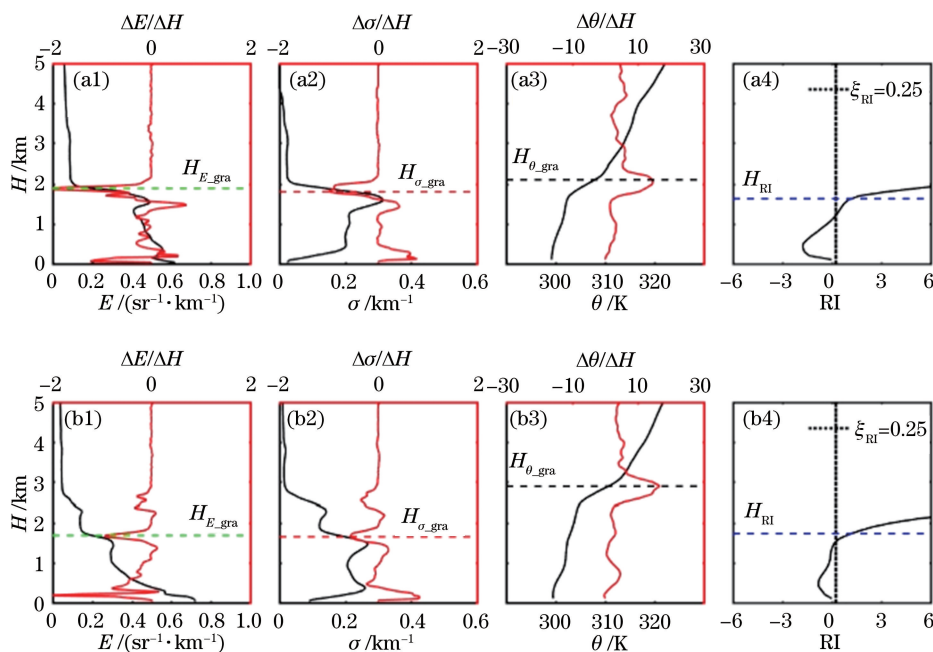


图 2 不同边界层结构下,4 种方法识别 BLH 的结果对比。(a1)(b1)激光雷达原始信号梯度法;
(a2)(b2)消光系数梯度法;(a3)(b3)位温梯度法;(a4)(b4)理查森数法

Fig. 2 Comparison of BLH identification results under different boundary layer structures. (a1)(b1) Original signal gradient method of Lidar; (a2)(b2) extinction coefficient gradient method; (a3)(b3) potential temperature gradient method; (a4)(b4) Richardson number method

根据图 2 的结果,得出以下结论:1)受台风外围环流影响的大气边界层结构均一[图 2(a)],边界层内部气溶胶粒子分布均匀,边界层以上的自由大气中气溶胶含量极低,因此激光雷达回波信号在气溶胶层顶呈现明显的梯度变化。由于湍流混合,边界层内温度垂直分布均匀,同时由于顶盖逆温的存在,边界层顶部出现位温梯度的最大值,因此,激光雷达梯度法以及位温梯度法可以准确识别出 BLH。由于 RI 法适用于稳定边界层和对流边界层,故对于受台风外围环流影响的结构均一的 ABL,2.2 节所述的 4 种 BLH 识别方法均适用,识别的 BLH 结果一致。2)受局地 SLBC 影响的大气边界层结构较为复杂[图 2(b)],ABL 内部气溶胶分布出现分层现象,因此激光雷达回波信号廓线出现大于一个的局

部梯度最小值。 H_{E_gra} 和 H_{σ_gra} 可能会被识别到不同的梯度层上,与 H_{RI} 的结果产生差异,同时 H_{θ_gra} 与传输层高度一致。这说明当 ABL 结构复杂时,位温梯度法不适用,激光雷达梯度法容易受环境噪声的影响,导致边界层高度被错估, H_{E_gra} 和 H_{σ_gra} 的准确性有待进一步验证。3)在两个典型的 ABL 中, H_{E_gra} 和 H_{σ_gra} 的结果基本一致,这说明在本次实验中,激光雷达原始信号梯度法和消光系数梯度法任选其一即可。

4.2 阈值法与梯度法结合识别大气 BLH

本节将致力于寻找一个普适的 BLH 识别方法,以满足不同 ABL 结构下利用激光雷达信号准确识别 BLH 的要求。根据 4.1 节的结论,当 ABL 结构复杂时, H_{E_gra} 的准确性有待验证。同时,在数据

处理的过程中发现,在边界层有云存在的情况下,激光雷达回波信号显著增强, H_{E_gra} 的值等于云底高度,导致 BLH 识别存在误差。因此需要提高边界层结构复杂或有云存在时, H_{E_gra} 结果的准确性。为此本文提出了一个新的方法,利用 H_{RI} 结合阈值法和梯度法来连续准确地识别 BLH。以往研究表明,RI 法是最可靠的识别 BLH 的方法。所以本方法将 H_{RI} 作为 MPL 识别 H_{E_gra} 的初始值。具体操作步骤如下:

1) 利用 RI 法计算 BLH 的值(H_{RI}),在 MPL 原始回波信号中查找 H_{RI} 对应的时刻(t_{RI})。以 t_{RI} 为起始点,向后查找 t_{RI+1} 时刻对应的回波信号。

2) 设置阈值 ΔH ,在 $H_{RI} - \Delta H$ 至 $H_{RI} + \Delta H$ 的高度范围内,使用(1)式描述的梯度法计算 t_{RI+1}

时刻的 BLH 值,记为 $H_{RI,1}$ 。

3) 在 $H_{RI,1} - \Delta H$ 至 $H_{RI,1} + \Delta H$ 的高度范围内计算 t_{RI+2} 时刻的 BLH 值 $H_{RI,2}$ 。以此类推,计算最后一个时刻 BLH 的值 $H_{RI,n}$ 。

4) 重复步骤 2)和步骤 3),依次向前查找 $t_{RI-1}, t_{RI-2}, \dots, t_1$ 时刻的 BLH 值: $H_{RI,-1}, H_{RI,-2}, \dots, H_1$ 。数组 $H_1, H_2 \dots, H_n$ 即为最终的 BLH。

其中,阈值的大小需根据实际情况设置,一般不大于 0.5 km。若一天有 N 条探空数据,则根据探空数据的时间,将 MPL 观测数据分成 $2N$ 个区间,使每个区间内都包含一条探空数据后,再使用上述步骤进行 BLH 的计算。

图 3 为使用新的 BLH 识别方法,最终反演得到 茂名受台风影响期间 BLH 的时空变化图。其中

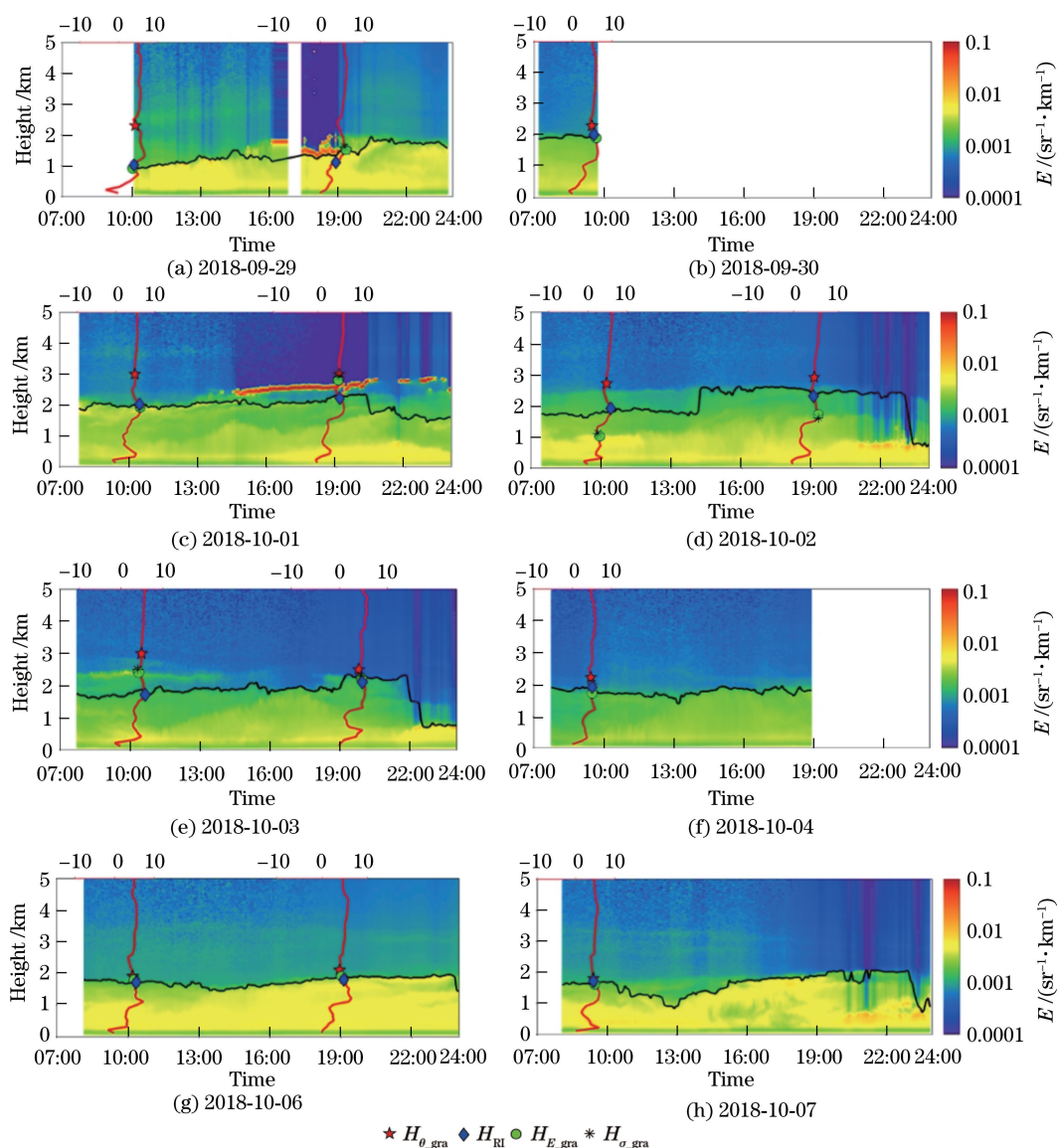


图 3 归一化 MPL 回波信号(填色)以及 BLH(黑线)的时空分布图。(a)~(h)不同观测日期的观测结果

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of normalized MPL signal (coloring) and BLH (black line). (a)~(h) Daily observations

的填色图代表实验期间的归一化 MPL 回波信号,黑色实线代表使用新的识别方法计算的 BLH 结果,五角星、菱形、圆点以及星号分别代表 H_{θ_gra} 、 H_{RI} 、 H_{E_gra} 、 H_{σ_gra} 的值。从图 3 可以看出,使用新的识别方法将 H_{RI} 作为约束条件可以有效提高 ABL 不均一、有多层结构出现时激光雷达梯度法识别 BLH 的准确性。该方法也可以排除掉高层外来输送气溶胶对结果的影响。

4.3 台风外围环流和 SLBC 影响下大气边界层结构和高度变化特征

结合 3.2 节对实验期间茂名环流形势的分析,本节将继续讨论实验期间,茂名地区在台风外围环流和 SLBC 作用下的大气边界层结构以及高度变化特征。同时为了准确识别 ABL 的多层复杂结构,需要找到气溶胶层顶的位置,并与 BLH 作对比。本研究将每条 MPL 回波信号廓线 0~5 km 均分成 4 个高度范围,利用激光雷达原始信号梯度法,查找每个高度区间的局部梯度最小值,最高的局部最小值即为气溶胶层顶的位置。

图 4 所示是利用不同识别方法得到的实验期间茂名地区大气边界层结构以及高度变化。其中黑色实线代表 4.2 节中新方法得到 BLH 识别结果,黄色点线线表示激光雷达探测的气溶胶层顶,五角星、菱形、圆点以及星号分别代表 H_{θ_gra} 、 H_{RI} 、 H_{E_gra} 、

H_{σ_gra} 的值。从图 4 可以看出,在受台风外围环流影响的事件 1 和事件 3 中,BLH 基本稳定在 2 km 左右的高度上,变化波动不大且没有比较明显的日变化规律。而在受局地 SLBC 影响的事件 2 和事件 4 中,BLH 有波峰和波谷交替出现的日变化特征,且 BLH 的峰值基本出现在白天,达到 2 km 左右,而 BLH 的最小值出现在夜间低至 500 m 左右。同时,在受台风外围环流影响的事件 1 和事件 3 中,大气边界层内的气溶胶垂直分布较为均匀,未出现分层现象,大气边界层高度与气溶胶层顶基本重合。而在受局地 SLBC 影响的事件 2 和事件 4 中,大气边界层内的气溶胶垂直分布出现了多层激光雷达回波信号强梯度层,边界层出现了分层现象,气溶胶层顶基本高于 BLH 且变化不大,而 BLH 却存在着明显的日变化。出现这一现象的原因可能与海陆风形成的局地环流输送作用相关,白天由于地表温度高于海表温度,海岸线附近的热陆地空气上升形成对流^[20],而在海陆风日的夜间,地表温度低于海表温度,导致海岸线附近的冷空气下沉;同时从图中可以看出,SLBC 的影响基本局限于边界层内,尤其在夜间存在明显的残留层。但是在大的天气系统的影响下,局地 SLBC 会被破坏。因此可以看到在事件 1 和事件 3 中,在台风外围环流的影响下,茂名地区的大气边界层结构变得较为简单、均一。

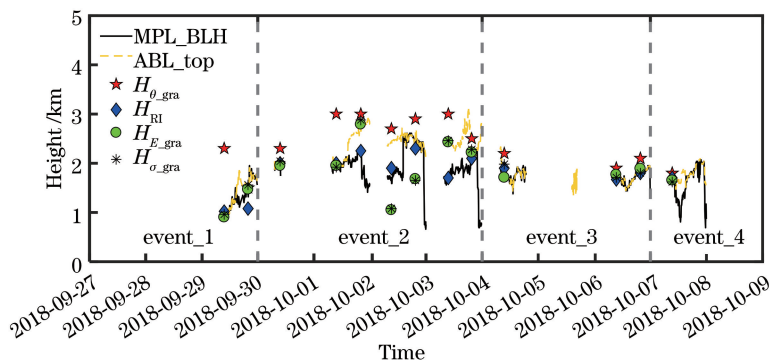


图 4 实验期间茂名地区大气边界层结构以及高度变化特征

Fig. 4 Characteristics of atmospheric boundary layer structure and BLH variation in Maoming in the experiment period

5 结 论

根据茂名地区在受台风外围环流以及 SLBC 影响下的 4 个时段观测数据,进行了 BLH 识别方法的适用性分析,并提出了一种新的基于 MPL 的 BLH 识别方法,提高了激光雷达识别 BLH 结果的准确性,进而分析了受大尺度和尺度环流影响的大气边界层结构以及 BLH 的时空变化特征,并得到以下结论:

1) 当 ABL 结构均一,边界层内部混合均匀且不存在残留层或云层时,位温梯度法、理查森数法、激光雷达原始信号梯度法、消光系数梯度法对 BLH 的识别均适用。但是,当 ABL 结构复杂时位温梯度法、激光雷达原始信号梯度法、消光系数梯度法识别的 BLH 与理查森数法的结果存在较大误差。本文结合阈值法和梯度法进行 BLH 识别,并将理查森数法识别的 BLH 作为约束条件,这一方法可以有效排除高层外来输送气溶胶以及复杂的 ABL 结构

对结果的影响,提高了基于 MPL 原始信号梯度法识别 BLH 结果的准确性。

2) 沿海地区在没有大尺度天气系统的控制下,受局地 SLBC 的影响时,海陆热力差异引起的局地对流运动,会导致 ABL 出现多层的复杂结构。白天地表加热使空气上升,而夜间冷空气呈下沉状态,从而使沿海地区近岸 ABL 的 BLH 呈波峰和波谷交替出现的日变化规律。BLH 开始增长的时间一般出现在白天的陆风-海风转换时刻,最大值一般在正午气溶胶层顶的位置,2 km 左右。BLH 下降的时间通常伴随着夜间的海风-陆风转换,最小值一般出现在夜间残留层以下,稳定边界层顶的位置低至 500 m 左右。

3) 台风外围环流会破坏局地 SLBC 引起的对流现象,昼夜交替造成的局地空气上升、下沉运动减弱甚至消失,边界层内的垂直混合加强,在整个 ABL 内气溶胶垂直分布均匀,结构简单。此时,BLH 与气溶胶层顶基本重合维持在 2 km 左右,BLH 变化波动不大且没有比较明显的日变化规律。

参 考 文 献

- [1] Stull R B. Mean boundary layer characteristics[M]// Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology, atmospheric sciences library. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988, 13: 1-27.
- [2] Garratt J. Review: the atmospheric boundary layer [J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37 (1/2): 89-134.
- [3] Ferrare R, Clayton M, Turner D, et al. Raman lidar retrievals of mixed-layer heights [C] // Proposed for presentation at the American Geophysical Union Fall Meeting held, December 3-7, 2012, San Francisco, CA. Washington D.C.: NASA, 2012.
- [4] Zilitinkevich S S. The height of the atmospheric planetary boundary layer: state of the art and new development [M] // Fernando H J S, Klaić J Z, McCulley L. National security and human health implications of climate change. NATO science for peace and security series C: environmental security. Dordrecht: Springer, 2012: 147-161.
- [5] Tombrou M, Bossioli E, Protonotariou A P, et al. Coupling GEOS-CHEM with a regional air pollution model for Greece [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(31): 4793-4804.
- [6] Seidel D J, Ao C O, Li K. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: comparison of methods and uncertainty analysis [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D16): D16113.
- [7] Boers R, Eloranta E W, Coulter R L. Lidar observations of mixed layer dynamics: tests of parameterized entrainment models of mixed layer growth rate [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(2): 247-266.
- [8] Melfi S H, Spinhirne J D, Chou S H, et al. Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1985, 24(8): 806-821.
- [9] Luo T, Yuan R, Wang Z. Lidar-based remote sensing of atmospheric boundary layer height over land and ocean [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(1): 173-182.
- [10] Medeiros B, Hall A, Stevens B. What controls the mean depth of the PBL? [J]. Journal of Climate, 2005, 18(16): 3157-3172.
- [11] 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.
- [12] Wu M, Fan S J, Wu D. The characteristics of atmospheric boundary layer during tropical cyclone process and its influence on air quality over Pearl River Delta region [J]. China Environmental Science, 2013, 33(9): 1569-1576.
吴蒙, 范绍佳, 吴兑. 台风过程珠江三角洲边界层特征及其对空气质量的影响 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(9): 1569-1576.
- [13] Yu D J. Intuitionistic fuzzy theory based typhoon disaster evaluation in Zhejiang Province, China: a comparative perspective [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2559-2576.
- [14] Liao F, Deng H, Gao Z Q, et al. The research on boundary layer evolution characteristics of typhoon Usagi based on observations by wind profilers [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(9): 39-44.
- [15] Fang G C, Lin S J, Chang S Y, et al. Effect of typhoon on atmospheric particulates in autumn in central Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(38): 6039-6048.
- [16] Qu Y, Chen B J, Ming J, et al. Aerosol impacts on the structure, intensity, and precipitation of the landfalling typhoon Saomai (2006) [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(21): 11825-11842.
- [17] Zhao Q, Yang S Z, Qiao Y L, et al. Analysis of the optical characteristic of littoral aerosol influenced by

- typhoon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2046-2050.
- 赵强, 杨世植, 乔延利, 等. 台风对沿海地区气溶胶光学特性的影响分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2046-2050.
- [18] Song L L, Mao H Q, Huang H H, et al. Analysis on boundary layer turbulent features of landfalling typhoon[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 915-921.
- 宋丽莉, 毛慧琴, 黄浩辉, 等. 登陆台风近地层湍流特征观测分析[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 915-921.
- [19] Fan S J, Wang A Y, Fan Q, et al. Atmospheric boundary layer concept model of the Pearl River Delta and its application [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(3): 286-292.
- 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(3): 286-292.
- [20] Gassmann M I, Pérez C F, Gardiol J M. Sea-land breeze in a coastal city and its effect on pollen transport [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2002, 46(3): 118-125.
- [21] Yu X L, Xie Q, Wang D X. Diurnal cycle of marine atmospheric boundary layer during the 1998 summer monsoon onset over South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(2): 31-35.
- 于晓丽, 谢强, 王东晓. 1998 年季风爆发期南海大气边界层的日变化[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(2): 31-35.
- [22] Yang Y J, Yim S H L, Haywood J, et al. Characteristics of heavy particulate matter pollution events over Hong Kong and their relationships with vertical wind profiles using high-time-resolution Doppler lidar measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(16): 9609-9623.
- [23] Yue H Y, Gu T F, Wang C L, et al. Influence of typhoon Nida process on ozone concentration in Guangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12): 4565-4572.
- 岳海燕, 顾桃峰, 王春林, 等. 台风“妮妲”过程对广州臭氧浓度的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(12): 4565-4572.
- [24] Deng T, Wang T J, Wang S Q, et al. Impact of typhoon periphery on high ozone and high aerosol pollution in the Pearl River Delta region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 617-630.
- [25] Chow E C H, Li R C Y, Zhou W. Influence of tropical cyclones on Hong Kong air quality [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(9): 1177-1188.
- [26] Pérez I A, García M Á, Sánchez M L, et al. Key points in air pollution meteorology[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(22): 8349.
- [27] Villagrán V, Montecinos A, Franco C, et al. Environmental monitoring network along a mountain valley using embedded controllers[J]. *Measurement*, 2017, 106: 221-235.
- [28] Chu Y F, Liu D, Wu D C, et al. Algorithm of retrieving boundary layer height based on Raman lidar water vapor data [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204009.
- 储玉飞, 刘东, 吴德成, 等. 基于拉曼激光雷达水汽数据探测边界层高度的算法[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1204009.
- [29] Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1991, 72(12): 1848-1866.
- [30] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [31] Li H, Wang Z J, Wang H Y, et al. Combined observation of aerosol vertical structure using micro-pulse lidar and compact optical backscatter aerosol detector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 132801.
- 李辉, 王章军, 王颢樾, 等. 微脉冲激光雷达与小型后向散射探空仪对气溶胶垂直结构联合观测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 132801.
- [32] Qing C. Forecast of the optical turbulence with a mesoscale atmospherical model [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- 青春. 利用中尺度数值气象模式预报大气光学湍流[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [33] Vogelesang D H P, Holtslag A A M. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 81(3/4): 245-269.
- [34] Xiang Y, Zhang T S, Liu J G, et al. Evaluation of boundary layer height simulated by WRF mode based on lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0110002.
- 项衍, 张天舒, 刘建国, 等. 基于激光雷达对 WRF 模式模拟边界层高度的评估[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0110002.
- [35] Liu Y, Hu F, Wang S G, et al. Preliminary study of the variety of stable atmospheric boundary layer in Lanzhou city zone[J]. *Journal of the Graduate School*

- of the Chinese Academy of Science, 2003, 20(4): 482-487.
- 刘宇, 胡非, 王式功, 等. 兰州市城区稳定边界层变化规律的初步研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2003, 20(4): 482-487.
- [36] Shi Y, Hu F, Xiao Z S, et al. Comparison of four different types of planetary boundary layer heights during a haze episode in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134928.
- [37] Liu J M, Huang H, Wang X Z. Characteristics and environment effects of land sea breeze along the Huludao Coast [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(1): 79-85.
- 刘吉敏, 黄泓, 王学忠. 葫芦岛沿岸海陆风特征及其环境效应[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(1): 79-85.