

张哲,师宇,王咏薇,等.基于风廓线雷达的对流边界层高度的确定.气象科学,2019,39(3):359-367.

ZHANG Zhe, SHI Yu, WANG Yongwei, et al. Determination of convective boundary layer height based on wind profile radar. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(3): 359-367.

基于风廓线雷达的对流边界层高度的确定

张哲^{1,2} 师宇^{1,2} 王咏薇³ 刘磊¹ 胡非^{1,2}

(1 中国科学院 大气物理研究所/大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049;
3 南京信息工程大学 大气物理学院, 南京 210044)

摘要 大气边界层高度对于天气、气候和大气污染研究是一个至关重要的参量。对流边界层 (Convective Boundary Layer, CBL) 顶部的夹卷过程造成温度和湿度垂直梯度增强, 导致这一层的折射率结构常数 C_n^2 变高。 C_n^2 的这种垂直分布特征经常被用来定位出 CBL 高度 Z_i 。本文利用 2010 年 7—8 月天津大港的风廓线雷达数据推断出 CBL 高度 Z_i , 对于多重 C_n^2 峰值或不明确的 C_n^2 峰值, 本文改进了对 Z_i 的测定, 分别讨论了 C_n^2 最大后向散射法与 C_n^2 和垂直速度方差 (σ_w^2) 相结合的新方法的适用性。研究显示: (1) C_n^2 廓线具有单峰时, 最大后向散射强度法能正确估计 CBL 高度, 这种情况往往对应的是晴天。CBL 上存在的残留层或云层引起的温湿起伏变化导致 C_n^2 廓线具有双峰甚至多峰时, 最大后向散射强度法可能会错误估计 CBL 高度; (2) C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法不仅与晴天时 C_n^2 最大后向散射法有较好的一致性, 而且可以将 CBL 造成的 C_n^2 峰值从云层造成的 C_n^2 峰值中区分出来, 从而正确估计 CBL 高度; (3) 一般而言, 对流边界层中存在有明显的、破碎或者分散不明显的云时, C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法都能较好地识别出 CBL 对应的 C_n^2 峰值。但由于边界层中的情况极为复杂, C_n^2 和 σ_w^2 结合法也会因不同的原因而错误估计 CBL 高度。

关键词 边界层高度; 风廓线雷达; 折射率结构常数

分类号: P412.25

doi: 10.3969/2018jms.0015

文献标识码: A

Determination of convective boundary layer height based on wind profile radar

ZHANG Zhe^{1,2} SHI Yu^{1,2} WANG Yongwei³ LIU Lei¹ HU Fei^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China; 2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;)

Abstract The atmospheric boundary layer height is a critical parameter for studies of weather, climate and air pollution. The entrainment process at the top of the Convective Boundary Layer (CBL) results in an increased vertical gradient of temperature and humidity, thus enhancing the refractive index structure constant C_n^2 for this layer. This vertical distribution feature of C_n^2 is often used to locate the CBL height Z_i . In this paper, the CBL height Z_i is deduced from the wind profile radar data of Grand Port District of Tianjin from July to August in 2010. For the multiple or unclear C_n^2 peaks, this paper improves the measurement of Z_i , and discusses the applicability of the maximum backscattered intensity method and the method combining C_n^2 and the vertical velocity variance σ_w^2 . The results show that: (1) When the C_n^2 profile has a single peak, the maximum backscattered intensity method can correctly estimate the height

收稿日期 (Received): 2017-10-23; 修改稿日期 (Revised): 2018-02-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0208802; 2017YFC0209600); 国家自然科学基金资助项目 (41675012)

通信作者 (Corresponding author): 胡非 (HU Fei). hufei@mail.iap.ac.cn

of CBL. This situation often corresponds to a sunny day. The maximum backscattered intensity method may incorrectly estimate the height of CBL when the temperature and humidity fluctuation caused by the residual layer or the cloud layer in the CBL leads to a C_n^2 profile with double peaks or even multiple peaks; (2) The method combining C_n^2 and σ_w^2 is not only consistent with the maximum backscattered method at sunny days, but also distinguishes the C_n^2 peak caused by CBL from the C_n^2 peak caused by the cloud layer, thus correctly estimating the CBL height; (3) In general, the method combining C_n^2 and σ_w^2 can well identify the C_n^2 peak corresponding to CBL when there are obvious, broken or undisclosed clouds in the convective boundary layer. However, because the situation in the boundary layer is extremely complex, this method may also incorrectly estimate the CBL height for different reasons.

Key words boundary layer height; wind profile radar; refractive index structure constant

引言

大气边界层 (Atmospheric Boundary Layer, ABL) 是大气中距离地面最低 (1~2 km) 的部分。ABL 的厚度直接受到行星表面和日常辐射交换过程的影响。白天有对流边界层 (Convective Boundary Layer, CBL) 或混合层 (Mixing Layer, MH), 而夜间出现稳定边界层 (Stable Boundary Layer, SBL)^[1]。ABL 高度 Z_i 是表征对流层低层结构^[2]、控制大气污染物的垂直混合以及空气污染监测和边界层研究的重要参数。对于边界层参数, 例如通量和包括风、位温和湿度的垂直梯度方差的归一化, 边界层高度也是重要的度量尺度。作为边界层数值天气和气候预测模式中的基本输入参数, 这种典型的标准是必需的^[1,3]。根据 Stull^[1], CBL 高度是 MH 的顶部, 通常定义为上部稳定层的平均底高度并且对面强迫做出响应的时间尺度大约为 1 h 或更短的时间。因此, Z_i 的准确确定具有重要的意义。

Emeis, et al^[4] 已经给出了对 MH 进行地基遥感探测的概述。对于大气边界层高度的确定来说, 现在地基遥感探测技术主要有声学 (声雷达)、光学 (激光雷达、云高仪) 和电磁 (多普勒雷达、风廓线雷达) 遥感探测方法或者是这些方法的适当结合。本文讨论边界层风廓线雷达在 CBL 确定中的应用。边界层风廓线雷达似乎是深 CBL 中直接和连续测量 CBL 的非常有前景的装置^[5-8]。它的时间分辨率为 30 min 或更短, 高度分辨率通常为 60~100 m, 具有提供 CBL 高度连续测量的能力^[5]。其探测原理是电磁信号后向散射强度与电磁折射率结构参数 C_n^2 成正比, 该结构参数取决于温度特别是湿度场的小尺度波动。 C_n^2 的垂直廓线通常在充分混合的 CBL 的顶部显示出最大值^[2]。基于数值模拟和/或实验数据的大量研究已经表明折射率结构参数 C_n^2 的垂

直廓线在顶盖逆温层的底部或者湿度梯度大处附近具有明显的最大值^[5,9,10-12]。所以风廓线雷达得到的 CBL 高度是一个由于存在湍流而发生混合的与地球表面接触的湍流边界层的深度^[13]。然而, 水分分布往往不像温度一样能够较好的混合均匀, 如上升的湿气流被下沉的干气流阻碍时, 也可能导致一些大的 C_n^2 极值出现^[14]。

白天低层和较浅的层云可以存在于 CBL 中也可以存在于 CBL 顶部, 并且经常占据了 CBL 的大部分。然而, 对于如何在有云的情况下定义 CBL 高度, 至今并没有一致意见。在这种情况下, 我们可以识别出两个特征。第一个是云底, 与较干的混合层高度相关; 第二个是云顶, 一般与逆温层相关联。确定多云边界层高度的困难是由于云层中的辐射和凝结/蒸发等过程往往会出现了新的湍流源。当云层变得分散时, 这个湍流源可能在云顶和云的边缘上变得很强^[15]。因为云中强烈的湍流混合和云边界附近的夹带混合导致反射率增加, 后向散射强度廓线最大值也可以在云中发现^[5]。Grimsdell, et al^[16] 研究表明较厚云层出现在 CBL 顶时, C_n^2 峰值很难被定义或者被移到了云顶高度或者云的边缘。此外, 雷达后向散射强度廓线也可以在与前一天形成的 CBL 相关联的残余层的顶部处呈现最大值^[17]。Lee, et al^[18] 发现因残留层或最低探测高度的原因, 早晨前期的 CBL 高度倾向于被高估。晚上, CBL 被稳定的夜间边界层所取代, 而它通常处于或低于风廓线雷达的最小探测高度, 所以边界层风廓线雷达不能测量夜间边界层高度^[5]。

本文检查了常用于估计 CBL 高度的 C_n^2 峰值表现, 并对 Heo, et al^[15] 提出的新方法的适用性进行了讨论。这种方法通过联合使用 C_n^2 峰值与垂直风速方差 σ_w^2 来提高云存在的情况下风廓线雷达估计 CBL 高度值的准确性。

1 数据与方法

1.1 实验设计和仪器简介

2010 年 7 至 8 月,京津冀地区开展了综合观测实验,王丙兰^[19]详细描述了其细节。从海边到内陆的 100 多千米的范围内的天津大港、天津武清、河北香河、北京榆堡、北京南郊观象台、北京海淀到北京小汤山共 7 个观测点上布置相同型号(Airda3000 型)的风廓线雷达。该实验的目的是同步观测海陆风、山谷风、城市热岛环流和边界层结构。本文研究选用的是天津大港站的风廓线雷达资料,观测位置如图 1 所示。观测使用了 Airda3000 型边界层风廓线雷达。

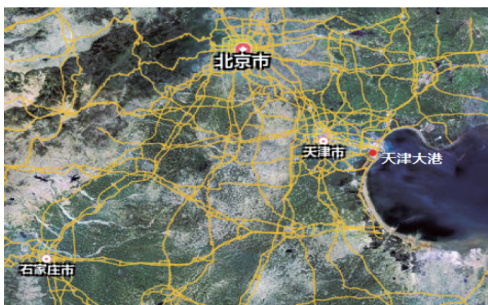


图 1 观测地点

Fig.1 The location of observation sites

其工作频率为 1 297 MHz,垂直探测范围是 50 ~ 3 450 m,垂直分辨率为 50 m 或 100 m,时间分辨率:可设,本文设为 5 min。边界层风廓线仪有最高与最低探测高度,计算得到的最低探测高度 50 m,0.5~3 km 左右的高度范围是风廓线雷达探测的最佳区间^[20]。因 250 m 以下数据受地面影响较大,所以采用 450~3 000 m 以保证数据质量;为了反映整个白天对流边界层的状况,以及讨论处理白天边界层高度方法适用性以便将来更好地改进方法,所以仅考虑白天 06:00—18:00 边界层的情况。

1.2 边界层高度确定的方法

1.2.1 使用 C_n^2 和 σ_w^2 估计 CBL 高度

CBL 顶部的夹卷过程造成温度和湿度垂直梯度增强,导致这一层的折射率结构常数 C_n^2 变高。 C_n^2 的这种垂直分布特征经常被用来定位出 CBL 高度 Z_i 。White^[21]简单地将瞬时垂直廓线中 C_n^2 最大值的位置作为 CBL 高度。但由于最大后向散射强度法将 C_n^2 主峰(即 C_n^2 廓线最大值)作为 CBL 高度,所以当云层或稳定残留层使得反射率的增强而导致 C_n^2 廓线会出现双峰甚至多峰结构时,这种方法可能会出现误判。然而,该方法可以在 CBL 高度的估计中提供良好的时间分辨率,因为它可以从单个 C_n^2 廓线

最大值估计边界层高度^[15]。

Heo, et al^[15]提出了使用 C_n^2 和 σ_w^2 估计 CBL 高度的新方法并对这种方法的适用性进行了初步分析。这种方法是通过利用风廓线雷达多普勒频谱宽来对现有方法进行改进的。因此,本文对这种方法的一些细节处做了修改并对其适用性做进一步的探讨。

当 C_n^2 廓线具有双峰并且每个廓线中的主峰出现在云层或残留层的顶部而不是混合层的顶部时,发现其最大后向散射强度法在 CBL 高度的估计中是不完备的^[15]。本文使用 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法将 CBL 顶部造成的峰值从其他由于云层造成的峰值中区分出来。这是通过使用由风廓线雷达测量的垂直空气速度的方差来完成的。在干燥、对流良好的混合层中,热通量从地面到 CBL 顶部随高度线性减小,并在 CBL 顶达到最小值。热通量廓线与垂直速度的标准偏差相关^[22]。

$$\frac{\sigma_w^3}{z} \approx \alpha^{2/3} \frac{g}{\theta} (\overline{w'\theta_v'}). \quad (1)$$

其中: σ_w 、 z 和 α 分别表示湍流垂直速度标准差、高度和通用常数($\alpha = 1.4$)。(g/θ) $\overline{w'\theta_v'}$ 表示局部浮力项,其中 g 、 θ 、 θ_v 和 w' 分别是重力加速度、位温、虚位温和扰动垂直速度。隐含地,这种关系意味着垂直速度标准差的廓线与 CBL 感热通量廓线相关联。在良好混合的层中,热通量随高度线性减小。因此,公式(1)中 σ_w^3/z 从近地层的顶部线性地减小到 CBL 顶部。为了找到 CBL 高度,这里采用 C_n^2 峰值高度与“零通量水平”对应的高度(其中 σ_w^3/z 变为零的水平)比较,这个零通量高度推导来自 σ_w^3/z 的垂直廓线(图 2)。将与零通量水平的最接近的 C_n^2 峰值高度作为 CBL 高度。这个水平意味着在地面和所选水平面之间存在湍流运动的连续性。在多云的条件下,这个条件在混合层直到云底是正确的^[15]。

本方法遵循 3 个步骤来使用 σ_w^3/z 廓线找到参考高度,然后从 C_n^2 峰值中确定 CBL 高度。首先,在每个 C_n^2 廓线中选择主峰和次峰(本文选取每条廓线中最大值与次最大值作为主峰与次峰,而不考虑两峰相对大小,Heo, et al^[15]所提原方法并未提到如何选取),并且选择靠近地面的峰值的高度作为 CBL 高度 Z_i 的第一猜测值(记为 Z_1)。最低峰的选择确保其下面的数据位于混合层内。其次,方程(1)的线性回归线通过在 Z_1 和 $0.2 Z_1$ 的前述估计之间的最小二乘拟合获得。最后,如图 3 所示,热通量零值高度 Z_0 通过回归线外推估计。因此,将最接近

Z_0 的 C_n^2 峰值高度作为 CBL 高度。

由于公式(1)在干燥、对流良好的混合层中高度范围比较适用,所以为了确保下面的数据不影响拟合效果,取 $0.2 Z_i$ 作为选取可能的边界层高度 C_n^2 极值的下限。250 m 以下数据有较多异常大值,并且和这个高度以上数据相比有明显不同的递减斜率,表明这些数据受到了地面和其他因素的影响,为了避免下面的数据可能会影响拟合的效果,当拟合起始高度 $0.2 Z_i$ 低于 250 m 时,就将 250 m 作为拟合的起始高度。所以综合考虑,极值的选取和最低拟合高度的下限都为 250 m。

2 结果分析

图 2a 给出了大港 2010 年 8 月 1 日 06—18 时(北京时,下同)的 C_n^2 时间—高度剖面图,CBL 高度由最大后向散射强度法计算得到,

其中边界层高度 Z_i 主要都落在 500~2 000 m 之间的 C_n^2 大值区。图 2、3、4、5a 显示上午 Z_i 被明显高估,主要有 4 个原因:(1)可能有降水过程发生,降水粒子的瑞利散射信号强度会超过晴空回波信号

的强度^[23];(2)边界层风廓线雷达除了能接收到降水粒子的散射信号,还能接收到云的回波信号;残留层上部有云出现,云中剧烈的湍流变化和云边界强烈的温湿梯度又会造成 C_n^2 值的增大,另外大云滴粒子也能使回波增强从而使 C_n^2 增强;(3)残留层上部的仍然存在的温湿波动使得 C_n^2 值的增大;(4)由于较低高度信号易受到地面影响而舍去了较低高度的数据,从而也舍去高度信号。Lee, et al^[18] 也发现因残留层或最低探测高度的原因,早晨前期的 CBL 高度倾向于被高估。

图 2b 分别显示了对应于图 2a 中的 08:00、10:00、12:00、15:00、17:00 5 个时刻的 C_n^2 廓线。图 2b-b*、d* 显示 C_n^2 廓线具有较显著峰值存在,这种情况下最大后向散射法可以将 C_n^2 最大峰值高度作为边界层高度 Z_i 。但是当出现两个数值接近的峰值(图 2b-a*)或不明确的峰值(图 2b-b*)时,最大后向散射法可能有错误判断的趋势。如图 2 所示,因为是在晴天或只有较少云层出现,所以廓线出现多峰值的频率并不高,进而最大后向散射法可能误判的频率也不是很高。但是边界层中出现较多的云

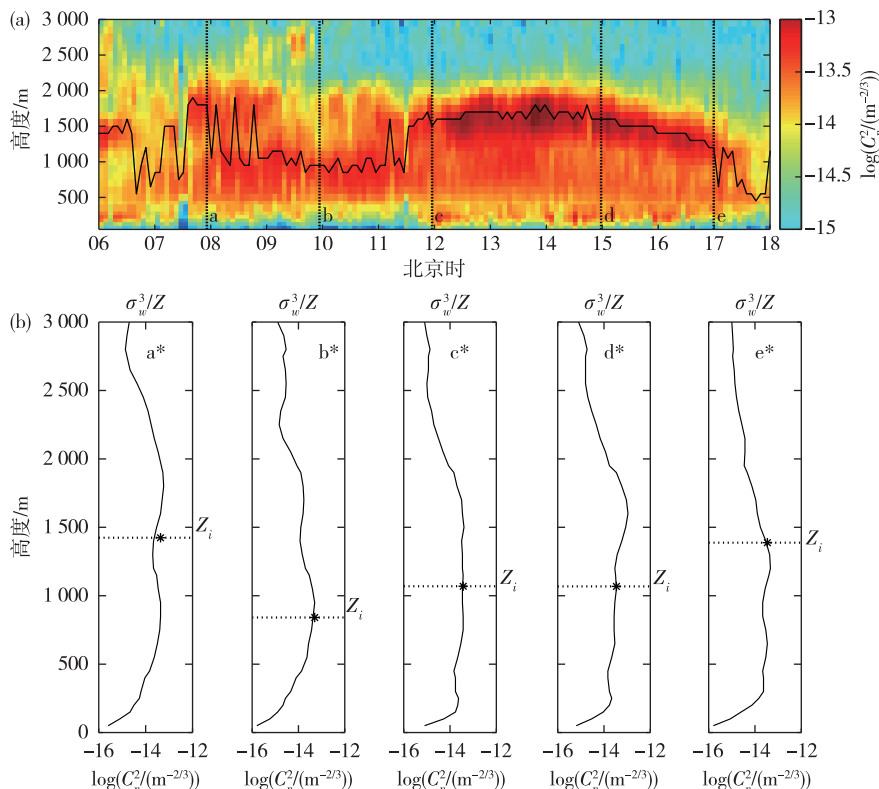


图 2 2010 年 8 月 1 日大港 C_n^2 时间—高度剖面 (a)、由最大后向散射强度法得到的 Z_i (黑实线); (b) 分别显示了 (a) 中 a*、b*、c*、d*、e* 五个时刻 (08:00、10:00、12:00、15:00、17:00) 的 C_n^2 廓线图 (黑实线), 线中星号表示 C_n^2 最大值
Fig.2 Time-height cross section of the refractive index structure parameter C_n^2 (a), Z_i (solid) estimated by the maximum backscatter intensity method on 1 Aug 2010; Fig.2b shows the C_n^2 profiles (black solid line) for five moments (08:00 BST, 10:00 BST, 12:00 BST, 15:00 BST, 17:00 BST) corresponding to a, b, c, d and e in Fig.2a. Parameters Z_i denotes the CBL height and the asterisks represents the maximum value of the C_n^2

层时,云层的出现对这种确定方法的影响会非常巨大。

图 3a 给出了大港 2010 年 7 月 22 日 06 时—18 时 C_n^2 时间—高度剖面,由最大后向散射强度法得到的 Z_i (黑实线)、使用 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法得到的 Z_i (蓝点线)。可以看到两条分别位于 500~1 000 m 之间和 2 000 m 附近的 C_n^2 大值带。其中最大后向散射强度法得到的 Z_i (黑实线) 大部分落在较高大值带中,小部分落在较低大值带中。这种 Z_i 来回跳跃达 1 000 m 以上的波动明显的不合理。图 3a 给出了使用 C_n^2 和 σ_w^2 来修正最大后向散射法后的 Z_i (蓝点线)。可以看到,蓝线几乎全部落在了较低的大值带中。除了图 3b-a* 外,图 3b-b*、c*、d*、e* 4 个时刻的 C_n^2 廓线都显示出了两个幅度几乎相同的明显的峰值,所以除非考虑更多的信息,否则这是一种典型的 C_n^2 最大后向散射法可能在选择与 Z_i 高度相

对应的峰值时失败的情况。图 3a、b 表明最大后向散射法高估了 a*、b*、c*、d* 4 个时刻的 Z_i ,而 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法能够较好的从两个甚至多个 C_n^2 峰值中选出与边界层高度对应的 C_n^2 峰值。

然而,图 3b 也显示了 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法的局限性。图 3b-a* 显示 Z_i 高度以下靠近地面的一些较散乱的 σ_w^3/z 点影响拟合的准确性,因此 σ_w^3/z 零值高度 Z_0 被拟合到了较低的高度上。这里拟合效果不好的原因是 $0.2 Z_i$ (约 400 m) 以上有部分点依然散乱,但还未错误估计 Z_i 。图 3b-d* 则错误估计了 Z_i ,与图 3b-a* 的情况不同,这里出现错误的原因是靠近地面的 C_n^2 峰值高度较低,使得拟合的起始高度 $0.2 Z_i$ 较低,所以部分受近地面影响的数据落入拟合区间或者较短的拟合区间包含了质量较差的数据而出现了拟合偏差。

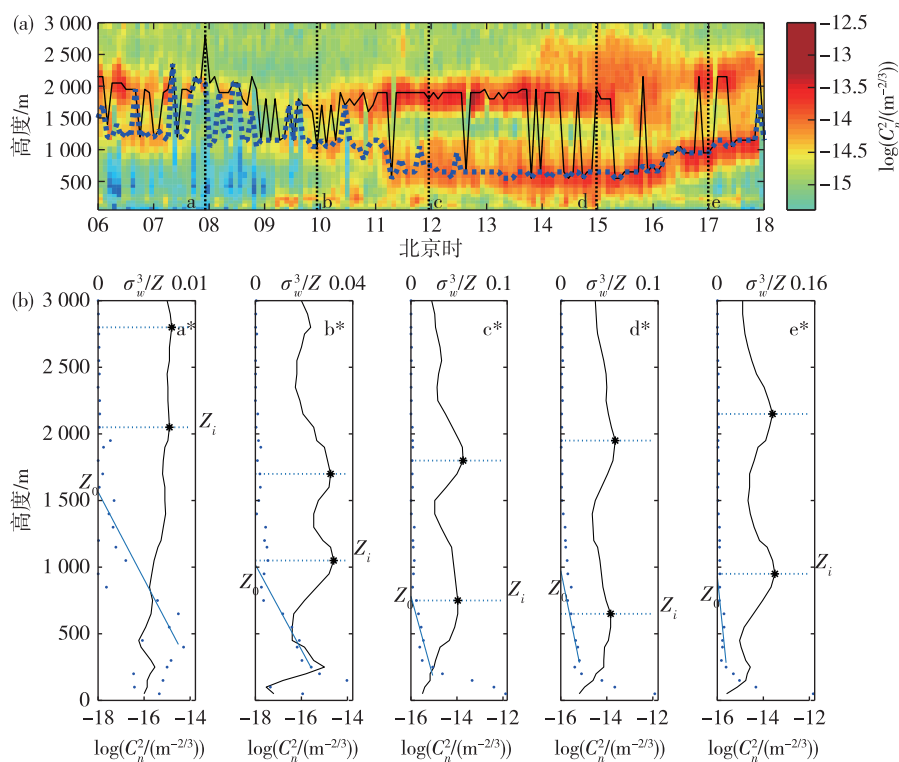


图 3 2010 年 7 月 22 日大港 C_n^2 时间—高度剖面 (a), 由最大后向散射强度法得到的 Z_i (黑实线)、使用 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法得到的 Z_i (蓝点线); (b) 分别显示了 (a) 中 5 个时刻的廓线 (黑实线) 和 σ_w^3/z 廓线 (蓝点线), 线中星号表示 C_n^2 极值, 直实线和 Z_0 分别表示由热通量高度数据得到的线性拟合直线和由线性直线外推得到的热通量零值高度

Fig.3 As in Fig.2, except for Z_i (blue solid line) estimated by the method using the C_n^2 and σ_w^2 in Fig.3a and the σ_w^3/z profiles (Blue dotted line) in Fig.3b on 22 July 2010. The asterisks, the straight solid lines and Z_0 represent the peaks of the C_n^2 , lines of linear regression of the heat flux from the velocity variance against the height and zero heat flux height estimated by extrapolation of the linear line, respectively

图 4a 给出了大港 2010 年 7 月 27 日 06—18 时 C_n^2 时间—高度剖面,由最大后向散射强度法得到的 Z_i (黑实线)、使用 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法得到的 Z_i (蓝

点线)。其显示 10:00 之前可能有降水,之为后晴朗天气。在 10:00 之后,图 4a 显示大部分时刻两种方法得到的高度重合,只有部分时刻两种方法估计

的高度不同,这说明 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法在有云与晴天都能够较好地估计边界层高度,比仅使用最大后向散射法具有更广的适用范围。为了更具体分析 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法,本文给出了图 4b。图 4b-a* 显示这种方法低估了 Z_i (图 6b-g* 同样如此),这里低估的原因不是对 σ_w^3/z 的拟合错误,而是因为图 4b-a* 将相对较小的 C_n^2 极值高度作为参考高度 Z_1 而没有将较大的 C_n^2 极值高度作为 Z_1 。正如 1.2 中所述,本文选取最大的极值与次极值而不管极值有多大,所以会出现这种错误。但是云和边界层高度处产生的 C_n^2 极值大小的相互关系并不是很清楚,两者可能相差较大(图 4b-a*、c*、e*),两者也可能相

近(如图 4b-b*、d*、图 3b-a*、b*、c*、d*),所以本文选择全部考虑这些情况而没有加以甄别。图 4b-b*、c*、d*,尤其是 b*、d* 显示新方法可以甄别出 Z_i 处的峰值。与图 3b-b*、d* 类似,图 4b-d* 中 σ_w^3/z 不是严格线性递减到混合层顶的而是以波动的形式递减。在 Z_i 高度以上 σ_w^3/z 仍然以波动形式出现,这个波动是递减还是在零值周围波动可能影响到对外推的热通量零值高度 Z_0 的准确判断。本文认为图 3b-b*, 图 4b-d* 在 Z_i 处 σ_w^3/z 已经减到了零值而在 Z_i 以上只是围绕 0 值波动,而图 3b-d* 在 Z_i 以上仍有递减的趋势。

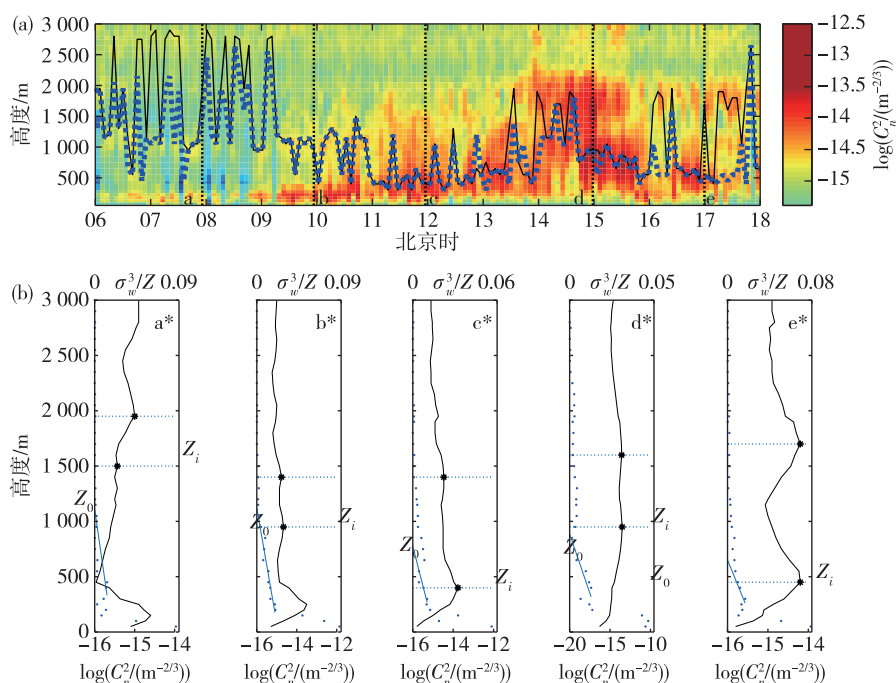


图 4 2010 年 7 月 27 日大港 C_n^2 时间—高度剖面 (a) 和 C_n^2 廓线 (黑实线) 与 σ_w^3/z 廓线 (蓝点线), 其他与图 3 相同

Fig.4 As in Fig.3, except for 27 July 2010

与图 4 对晴天边界层高度估计一样,图 5 也显示了两种方法较好的一致性。但图 5b-c* 显示拟合方程出现了严重的偏差。这是由于 250 m 到 Z 拟合区间的数据由低到高波动性的先增大后减小,即斜率由正变负,其中斜率为正的数据影响了拟合的整体效果。图 5b-d* (与图 6b-i* 一样) 考虑了相对较小的 C_n^2 极值作为参考高度而造成了低估。

图 6 是 2010 年 8 月 14 日大港 C_n^2 时间—高度剖面,如图所示实际中云和边界层顶的位置并不是严格分离的,情况比较复杂。所以本文从这一时段挑选出 10 个时刻分析 C_n^2 和 σ_w^2 结合法的适用性以便能够提出改进。图 6b-d*, g* 和 i* 显示 C_n^2 和 σ_w^2 结

合的方法均低估了 CBL 高度,但这 3 个时刻低估的原因并不相同。图 6b-d* 的低估可能是因为参考高度 Z_1 太低从而使得拟合区间 ($0.2 Z_1 \sim Z_1$) 内数据较少而出现偏差。但是图 6b-c*, e* 同样是 Z_1 太低却没有低估 CBL 高度,这是因为这两个时刻近地层的影响高度较小,从 σ_w^3/z 较低高度起便以线性规律向上递减。这表明 $0.2 Z_1$ 起始拟合高度并不能完全排除掉高度不断变化的近地层影响。图 6b-g* 和 i* 低估的原因似乎和 d* 相同,事实上 Z_1 处的 C_n^2 极值相对较小而不足以作为考虑的对象,如果考虑相对较大的 C_n^2 极值则不会造成低估。而图 6b-b* 同样考虑了较小的 C_n^2 极值,但由于热通量零值高度接

近实际边界层高度而没有出现低估。然而如果忽略掉相对较小极值,则图 6b-a* 这样的情况又会出现高估。将来应该在这个地方做出相应的改进工作。但不管考虑不考虑相对较小的 C_n^2 极值,图 6b-d* 的情况不可避免,它们低估的根本原因是拟合区

间内数据较少。如果能够有更好的方法考虑较多的拟合数据从而拟合得到热通量零值高度或发展其他算法得到热通量零值高度,则不仅可以避免图 6b-d* 的情况,而且可以避免部分图 6b-i* 的情况。这也是另一个将来应该考虑解决的问题。

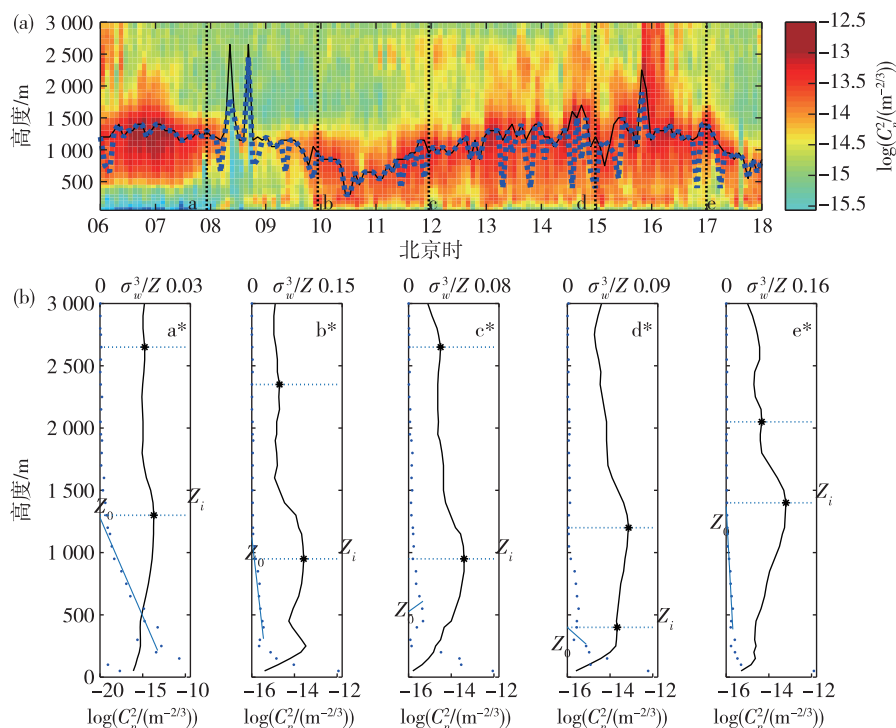


图5 2010年8月16日大港 C_n^2 时间—高度剖面图(a)和 C_n^2 廓线(黑实线)与 σ_w^3/z 廓线(蓝点线),其他与图3相同

Fig.5 As in Fig.3, except for 16 Aug. 2010

3 结论

本文利用2010年7—8月天津大港的风廓线雷达数据研究了由风廓线雷达数据估计CBL高度的 C_n^2 最大后向散射法和 C_n^2 与 σ_w^2 相结合法,通过对两种方法的适用性进行了分析比较得到如下主要结论:

(1)当 C_n^2 廓线具有单峰时,最大后向散射强度法能够正确估计CBL高度,这种情况往往对应晴天。但是当CBL上存在的残留层或云层引起的温湿起伏变化导致 C_n^2 廓线具有双峰甚至多峰时,这种方法可能会错误估计CBL高度。而 C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法不仅与晴天时 C_n^2 最大后向散射法有较好的一致性,而且可以将CBL造成的 C_n^2 峰值从云层造成的 C_n^2 峰值中区分出来从而正确估计CBL高度;

(2)大部分情况下,当对流边界层中存在有明显的、破碎或者分散不明显的云时, C_n^2 和 σ_w^2 结合的方法都能够较好地识别出CBL对应的 C_n^2 峰值。但

由于边界层中的情况极为复杂, C_n^2 和 σ_w^2 结合法也会因不同的原因而错误估计CBL高度。最主要的原因是拟合数据较少,其次是考虑了相对较小的 C_n^2 极值;

(3)将来的进一步的工作可能是寻求更好的方法考虑较多的拟合数据从而拟合得到或者发展其他算法得到热通量零值高度。更重要的趋势可能是使用多种仪器和相应的算法来克服单一仪器的缺点,进而准确确定CBL高度^[4,24]。另外,目前还没有对比探空与风廓线雷达确定CBL高度的两种方法,将来的工作也需要包括这方面的内容。

参 考 文 献

- [1] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Springer, 1988: 515-520.
- [2] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. Atmos. Environ., 2000, 34(7): 1001-1027.

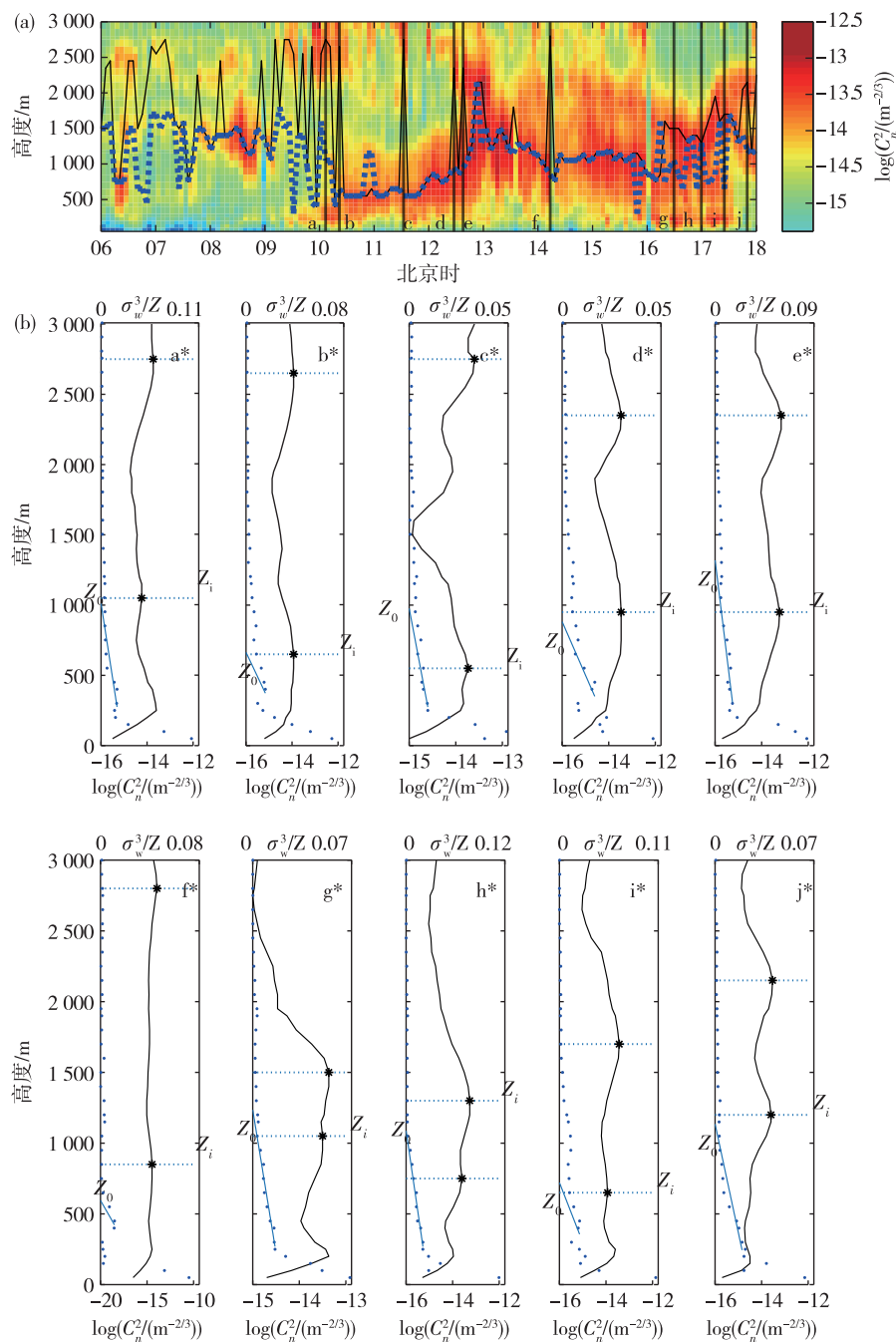


图6 2010年8月14日大港 C_n^2 时间—高度剖面(a)和 C_n^2 廓线(黑实线)与 σ_w^3/z 廓线(蓝点线),其他与图3相同
Fig.6 As in Fig.3, except for 14 Aug. 2010

[3] Beyrich F, Weill A. Some aspects of determining the stable boundary layer depth from sodar data. *Bound.-Layer Meteor.*, 1993, 63(1/2): 97-116.

[4] Emeis S, Schäfer K, Münkel C. Surface-based remote sensing of the mixing-layer height a review. *Meteor. Z.*, 2008, 17(15): 621-630.

[5] Angevine W M, White A B, Avery S K. Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler. *Bound.-Layer Meteor.*, 1994, 68(4): 375-385.

[6] Angevine W M, Trainer M, Parrish D D, et al. Wind profiler mixing depth and entrainment measurements with chemical

applications. Nashville, TN: American Meteorological Society Annual Meeting, 1994.

[7] Gaynor J E, PING Yejing, White A B. Determining mixing depths in complex terrain near a power plant with radar profiler reflectivities//Proc. 8th AMS Conf. Air Poll. Meteorol. & AWMA, 1994.

[8] 胡明宝, 李妙英. 风廓线雷达的发展与现状. *气象科学*, 2010, 30(5): 724-729.

HU Mingbao, LI Miaoying. The development and technologic status of wind profiling radar. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2010, 30(5): 724-729.

- [9] Burk S D. Refractive index structure parameters: time-dependent calculations using a numerical boundary-layer model. *J. Appl. Meteor.*, 1980, 19(5): 562-576.
- [10] Wyngaard J C, LeMone M A. Behavior of the refractive index structure parameter in the entraining convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 1980, 37(7): 1573-1585.
- [11] Fairall C W. The humidity and temperature sensitivity of clear-air radars in the convective boundary layer. *J. Appl. Meteor.*, 1991, 30(8): 1064-1074.
- [12] Muschinski A, Sullivan P P, Wuertz D B, et al. First synthesis of wind-profiler signals on the basis of large-eddy simulation data. *Radio Sci.*, 2016, 34(6): 1437-1459.
- [13] Bianco L, Wilczak J M, White A B. Convective boundary layer depth estimation from wind profilers: statistical comparison between an automated algorithm and expert estimations. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2008, 25(8): 1397-1413.
- [14] Compton J C, Delgado R, Berkoff T A, et al. Determination of planetary boundary layer height on short spatial and temporal scales: a demonstration of the covariance wavelet transform in ground-based wind profiler and Lidar measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2013, 30(7): 1566-1575.
- [15] Heo B H, Jacoby-Koaly S, Kim K E, et al. Use of the Doppler spectral width to improve the estimation of the convective boundary layer height from UHF wind profiler observations. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 2003, 20(3): 408-424.
- [16] Grimsdell A W, Angevine W M. Convective boundary layer height measurement with wind profilers and comparison to cloud base. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1998, 15(6): 1331-1338.
- [17] Dye T S, Lindsay C G, Anderson J A. Estimates of mixing depth from "boundary layer" radar profilers//Preprints of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation. Charlotte, NC: American Meteorological Society, 1995: 156-160.
- [18] Lee S J, Kawai H. Mixing depth estimation from operational JMA and KMA wind-profiler data and its preliminary applications; examples from four selected sites. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 2011, 89(1): 15-28.
- [19] 王丙兰. 城市边界层湍流统计特征和环流结构研究[博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011: 11-12.
WANG Binglan. Statistic characteristics of urban boundary layer turbulence and circulation structure [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 2011: 11-12.
- [20] 何平. 相控阵风廓线雷达. 北京: 气象出版社, 2006: 92-96.
HE Ping. Phased array wind profiler radar. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 2006: 92-96.
- [21] White A B. Mixing depth detection using 915-MHz radar reflectivity data//8th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation. Anaheim, California: American Meteorological Society, 1993: 248-250.
- [22] Weill A, Klapisz C, Strauss B, et al. Measuring heat flux and structure functions of temperature fluctuations with an acoustic doppler sodar. *J. Appl. Meteor.*, 1980, 19(2): 199-205.
- [23] 杨馨蕊, 马舒庆, 吴蕾. UHF 风廓线雷达降水数据判别方法的比较与评价. *大气科学学报*, 2010, 33(5): 576-581.
YANG Xinrui, MA Shuqing, WU Lei. Comparison and evaluation of analysis methods of UHF wind profiler data contaminated by precipitation. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2010, 33(5): 576-581.
- [24] WANG Chenggang, SHI Hongrong, JIN Lianji, et al. Measuring boundary-layer height under clear and cloudy conditions using three instruments. *Particuology*, 2016, 28: 15-21.