

王栋成, 汤子东, 邱黎, 等. 三种方法确定济南夏季日最大边界层高度的对比研究[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(2): 113-124.  
WANG Dongcheng, TANG Zidong, QIU Can, et al. Comparison of three methods in determining the daily maximum boundary layer height in Jinan in summer[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(2): 113-124. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.012. (in Chinese)

## 三种方法确定济南夏季日最大边界层高度的对比研究

王栋成<sup>1</sup>, 汤子东<sup>1</sup>, 邱黎<sup>1,2</sup>, 曹洁<sup>1</sup>, 董旭光<sup>1</sup>

(1. 山东省气候中心, 山东 济南 250031; 2. 上海师范大学地理系, 上海 200234)

**摘要:** 基于济南站边界层风廓线雷达(wind profile radar, WPR)观测的大气折射率结构常数( $C_n^2$ ), 采用偏离度法确定夏季白天边界层高度( $H_{BL}$ ), 分别与基于L波段雷达探空资料的干绝热曲线法、基于地面气象观测资料的国标法确定的 $H_{BL}$ 进行对比。结果表明: 1) 三种方法确定的25 d日最大 $H_{BL}$ 的平均值分别为2 500.0 m、2 529.1 m、2 469.9 m, 总体一致; 25 d同日期比较, 偏离度法与后两者的标准偏差( $\sigma$ )分别为337.1 m、636.7 m; 前两方法结果的相关系数( $R$ )较高为0.668, 但两者与国标法的 $R$ 分别为-0.130、-0.064, 证实国标法 $H_{BL}$ 的均值准确度尚可但实时值准确度低。2) 偏离度法确定的日最大 $H_{BL}$ 出现时间, 25 d平均和最多均在15时, 逐小时 $H_{BL}$  07—15时呈缓慢增高态势、15—19时则快速降低; 但国标法日最大 $H_{BL}$  25 d平均和最多均出现在16时, 且 $H_{BL}$ 在午后13—15时出现坍塌现象, 与对流边界层午后峰值规律显著不同。3) 前两种方法的 $H_{BL}$ 与地表温度、气温的相关性均较好, 与风速的相关性则较差; 而国标法 $H_{BL}$ 与风速的相关性较好, 与地表温度、气温的相关性则较差; 偏离度法日最大 $H_{BL}$ 对最高气温、最高地表温度的平均响应时间分别为1、2 h左右, 符合太阳辐射—地表温度—气温— $H_{BL}$ 的响应关系和次序, 但国标法的日最大 $H_{BL}$ 未能反映这一响应。4) 偏离度法 $H_{BL}$ 与各污染物的逐小时质量浓度均呈显著负相关, 但国标法 $H_{BL}$ 的相关性较差。5) 三种方法综合对比, 偏离度法 $H_{BL}$ 准确度较高, 且能给出时空演变; 干绝热曲线法 $H_{BL}$ 准确度较高, 但不能给出时空演变; 国标法实时 $H_{BL}$ 准确度低, 虽能给出时空演变但午后峰值偏差大。

**关键词:** 最大边界层高度; 偏离度法; 干绝热曲线法; 国标法; 风廓线雷达; 大气折射率结构常数

**中图分类号:** P412.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)02-0113-12

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.012

## Comparison of three methods in determining the daily maximum boundary layer height in Jinan in summer

WANG Dongcheng<sup>1</sup>, TANG Zidong<sup>1</sup>, QIU Can<sup>1,2</sup>, CAO Jie<sup>1</sup>, DONG Xuguang<sup>1</sup>

(1. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 2. Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract** Based on the atmospheric refractive index structure constant ( $C_n^2$ ) observed by the boundary layer wind profile radar (WPR) of Jinan Station, the boundary layer height ( $H_{BL}$ ) during the daytime in summer is determined by the deviation degree method, whose results are compared with those by the dry adiabatic curve method based on L-band sounding data and the national standard method based on surface meteorological observations. The results are shown below. 1) The mean values of the daily maximum  $H_{BL}$

收稿日期: 2020-03-23; 修订日期: 2020-05-03

基金项目: 山东省气象局重点科研项目(2014sdqzx05); 山东省气象科学研究所数值天气预报应用技术开放基金(SDQXKF2015Z02)

作者简介: 王栋成, 男, 高级工程师, 主要从事大气环境与气候应用研究, hjpj2008@163.com。

通信作者: 汤子东, 男, 正高级工程师, 主要从事气候预测、气候变化评估研究, tangzidong2010@163.com。

in the 25 d determined by the three methods are 2 500.0 m, 2 529.1 m, and 2 469.9 m, respectively, which are generally consistent; the standard deviations ( $\sigma$ ) between the results of deviation degree method and those of the latter two are 337.1 m and 636.7 m, respectively; the correlation coefficient ( $R$ ) between the results by the first two methods is 0.668, while the  $R$  between the results by the two methods and those by the national standard method are  $-0.130$  and  $-0.064$ , respectively, which confirms that the accuracy of mean  $H_{BL}$  by the national standard method is acceptable but the accuracy of real-time  $H_{BL}$  is low. 2) The average and most occurrence time of the daily maximum  $H_{BL}$  determined by the deviation degree method are 15:00 during the 25 d and the  $H_{BL}$  increases slowly from 07:00 to 15:00 and decreases rapidly from 15:00 to 19:00; however, the average and most occurrence time of the daily maximum  $H_{BL}$  determined by the national standard method are 16:00 during the 25 d and the  $H_{BL}$  collapses from 13:00 to 15:00, which is significantly different from the afternoon-peak pattern of the convective boundary layer. 3) The  $H_{BL}$  determined by the first two methods has a good correlation with surface temperature and air temperature, but a poor correlation with wind speed; while the  $H_{BL}$  determined by the national standard method has an opposite result. For the deviation degree method, the average response time of the daily maximum  $H_{BL}$  to the highest air temperature and the highest surface temperature are about one h and two h, respectively, which accords with the response relationship and order of solar radiation-surface temperature-air temperature- $H_{BL}$ , but the daily maximum  $H_{BL}$  by the national standard method fails to reflect this response. 4) The  $H_{BL}$  by the deviation degree method has a significantly negative correlation with the hourly mass concentration of each pollutant, but the  $H_{BL}$  by the national standard method has a poor correlation. 5) Through the comparison of these three methods, the  $H_{BL}$  determined by the deviation degree method has higher accuracy to depict the spatio-temporal evolution; the dry adiabatic curve method has good accuracy but cannot give the spatio-temporal evolution; the national standard method has low accuracy of real-time  $H_{BL}$ , and although it can give the spatio-temporal evolution, the deviation of the afternoon peak is large.

**Key words** maximum boundary layer height; deviation degree method; dry adiabatic curve method; national standard method; wind profile radar; atmospheric refractive index structure constant

## 引言

在大气边界层特征物理参数中,边界层高度( $H_{BL}$ )是最为重要的参数之一,它不仅决定着一个大地区的大气环境容量或大气自净能力<sup>[1-2]</sup>,而且还强烈影响着云和对流发展及演变过程,同时也是空气质量监测和天气预报中最为重要的物理参数之一,是数值天气预报模式初始化十分关键的因素<sup>[3-5]</sup>。 $H_{BL}$ 对于天气、气候和大气污染研究是一个至关重要的参量<sup>[6]</sup>。污染扩散等大气环境过程深受边界层特性的影响,如大气边界层流动、湍流、稳定度、 $H_{BL}$ 及日变化等,其中 $H_{BL}$ 参量尤为重要,它指示了污染物在垂直方向上的扩散和稀释能力<sup>[7]</sup>。日最大 $H_{BL}$ ,又称为最大混合层厚度,它所表示的是一天中空气混合较强的最大高度,它越厚,则稀释和扩散空气中污染物质的能力就越强,反之则越弱,因此研究它对于预报空气污染潜势有重要

意义<sup>[8]</sup>。

目前,获得日最大 $H_{BL}$ 的传统方法,主要可分为三类<sup>[9-15]</sup>:一是以地面气象资料为基础的经验公式法,如国标法<sup>[1,14-17]</sup>、罗氏法<sup>[14,18]</sup>、联合频率法-罗氏法 $B^{[14]}$ 、萨默斯(Summents)法<sup>[14]</sup>等,该类方法实用性强,资料易得且数据量大,但由于 $H_{BL}$ 变化的复杂性和以地面常规观测资料判断边界层变化的局限性,各种参数化方案的准确性有待进一步验证和改进<sup>[9-13]</sup>;二是以探空气象资料为基础的廓线测量法,如干绝热曲线法<sup>[19-22]</sup>、实测法<sup>[14]</sup>、风速极值法<sup>[23-25]</sup>、位温法<sup>[14,26]</sup>(虚位温梯度法<sup>[3,27-28]</sup>)、湿度梯度法<sup>[3,29]</sup>、湍流能量法<sup>[10,25]</sup>、综合评定法<sup>[30]</sup>等,廓线测量是确定大气边界层结构最常用的方法,可较准确地判断 $H_{BL}$ ,但由于大气边界层的特性和结构不是常规气象观测的内容,因此对它的研究依赖于特定的试验项目或每日2~3次的L波段雷达探空,观测资料在时间和空间上都非常有限<sup>[7]</sup>;三是以数

值模式参数化为基础的模拟方法,即基于湍流理论的多种大气边界层参数化方案结合数值模式来预报  $H_{BL}$ <sup>[31-34]</sup>,如最常用的中尺度气象模式 WRF (Weather Research and Forecasting Mode) 中有 13 种边界层方案,虽然各方案都能模拟出  $H_{BL}$  的日变化特征,但在不同的下垫面及天气条件下,各方案在模拟  $H_{BL}$  时往往存在不同程度的误差<sup>[35]</sup>。可见,廓线测量应是获得  $H_{BL}$  及相关参量最可靠的方法,也是验证、修正及改进经验理论计算和数值模拟方法与结果的根本依据。

近年来,快速发展的风廓线雷达(wind profile radar, WPR)<sup>[36-37]</sup>、激光雷达<sup>[38-40]</sup>、微波辐射计<sup>[40]</sup>等,可实现连续系统且高时空分辨率获取大气边界层各参数的分布数据,显示出优越性,边界层的观测研究进入了一个新时代<sup>[25]</sup>。其中,WPR 能够快速、细致地反映边界层的结构、厚度、湍流演变过程特征<sup>[36]</sup>。WPR 产品数据中的大气折射率结构常数( $C_n^2$ )是表征湍流变化强弱的一个重要参数, $C_n^2$ 与气温、气压、湿度密切相关,且随着高度的增加呈指数递减规律<sup>[36]</sup>,并表现为在边界层顶出现极大值或者偏离正常值幅度大值<sup>[25,36-46]</sup>,从  $C_n^2$  垂直廓线的时间序列中可以判定  $H_{BL}$ <sup>[36]</sup>。对流边界层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  $H_{BL}$ <sup>[6]</sup>。现阶段基于 WPR 资料进行  $H_{BL}$  确定的研究尚较少,且多属方法探索、个例或短期分析。国外如,BIANCO and WILCZAK<sup>[28]</sup> 提出了基于  $C_n^2$  等综合指标的模糊逻辑判别方法确定对流  $H_{BL}$ ,并给出了三天的结果对比;HEO et al.<sup>[41]</sup> 提出了联合使用  $C_n^2$  和垂直速度方差估计对流  $H_{BL}$  的新方法,并对其适用性进行了初步分析;BIANCO and WILCZAK<sup>[28]</sup> 对模糊逻辑判别方法进行了改进,并提供了个例验证;ALLABAKASH et al.<sup>[43]</sup> 采用改进的模糊逻辑方法给出了 Gadanki 测站两年各月 07—20 时对流  $H_{BL}$  日变化。国内如,曹晓彦等<sup>[44]</sup>、王敏仲等<sup>[45]</sup>、蒋德海等<sup>[46]</sup>、张坚<sup>[25]</sup>、金莉莉等<sup>[10]</sup>、王栋成等<sup>[11]</sup> 对  $C_n^2$  极大值法及求导后放大跃变特征的偏离度法等进行了方法研究或个例验证,张哲等<sup>[6]</sup> 对比分析了  $C_n^2$  最大后向散射法、改进后的  $C_n^2$  和垂直速度方差相结合法两种方法的适用性,但均尚未系统深入研究最大  $H_{BL}$  的较长时期的统计特征和演变规律。

本研究针对 WPR 偏离度法<sup>[11]</sup>、L 波段雷达探

空干绝热曲线法<sup>[19-22]</sup>、国标法<sup>[1,14-17]</sup> 三种方法各自确定的济南夏季同期日最大  $H_{BL}$  进行对比,分析最大  $H_{BL}$  的统计特征和演变规律,研究其与各气象条件的相关性,并评估比较三种方法的优缺点,以期改进  $H_{BL}$  的各种确定方法、研究大气边界层精细化结构与大气污染的关系,提高环境空气质量预报和大气自净能力判定的准确率等提供更好的参考依据,为推动边界层理论研究、实践及应用做出有意义的探索。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

研究采用的 2014 年 6 月 1—30 日和 7 月 15—24 日逐小时整点后 18 min、高度层 100~3 940 m 的  $C_n^2$  等数据,来自济南 WPR 站(经度:117°33'E,纬度:36°41'N,海拔 121.8 m)实时每 6 min 产品数据 ROBS 文件。该站固定式边界层 WPR 型号为 CLC-11-D 型,主要技术指标:雷达工作频率为  $1\ 280\pm 20$  MHz,探测数据时间分辨率  $r\leq 6$  min,有效数据最低探测高度为 100 m、最高探测高度  $h\geq 3$  km,雷达工作模式包括低模式(分辨率为 30、60、120、240 m)、高模式(分辨率为 60、120、240 m),输出产品数据的高度分辨率为 60 m(820 m 以下)、120 m(820~2 020 m)、240 m(2 020 m 以上)三种。济南 WPR 站 2014 年  $C_n^2$  产品数据非原始值,而是  $10\times\log(C_n^2)$  且取整后的结果, $C_n^2$  突变值被削平无法用以判断  $H_{BL}$ ,本研究基于该站经质量控制后业务上传的原始产品数据和 WPR 设备参数等,采用中国气象局《风廓线雷达通用数据格式(V1.2)》《风廓线仪功能规格需求书(试行)》《风廓线雷达观测规定(试行)》、QX/T 78—2007《风廓线雷达信号处理规范》等推荐的雷达气象散射方程(Keeler, 1993)<sup>[36]</sup>,对逐 6 min 的  $C_n^2$  数据进行重新计算,并经一致性平均、时空连续性检验质量控制<sup>[37]</sup>,按通用数据格式的要求统一标准输出。实测  $C_n^2$  廓线数据常出现个别高度层值缺测为 0、连续 2 层以上为同一个数值、异常大值或小值等现象,根据气象场的变化是有连续性的气象原理<sup>[47]</sup>,在各高度上进行上下层、在时间上进行前后 3 个时次的的数据奇异点判断,剔除异常数据并用前后或上下点平均来替代该点的数据,可以得到较为完整连续的随高度变化的  $C_n^2$  廓线。另外,因 WPR 低模式、高模式探测衔接问题,940、2 020 m 层  $C_n^2$  数据常为较大值,导致单一特征高度层的  $C_n^2$  偏大,对此采用上、下层内插方法替代异常值<sup>[11]</sup>。

采用的2014年6月1—30日和7月15—24日每日07、13、19时整点后15 min、高度层0~4 000 m的气温、气压、湿度、气压、虚温等数据,来自济南L波段雷达波段探空雷达记录文件。L波段雷达探空数据均经质量控制,符合《常规高空气象探测规范》<sup>[48]</sup>。L波段雷达探空秒级和分钟级数据的高度分辨率分别为6~7 m、400 m,考虑L波段雷达整点后15 min开始探测,气球按照 $400\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 上升,10 min上升的高度足以涵盖WPR探测每6 min、100~3 940 m的高度范围,因此本研究采用的整点后18 min的ROBS数据与整点后15 min的L波段雷达探空数据的时空匹配基本一致。每10 m高度层间隔的各数据,利用L波段高空气象探测系统数据处理软件内插获取<sup>[49]</sup>。

采用的2014年6月1—30日和7月15—24日每日地面气象观测逐小时气温、地表温度、风速、降水数据,以及总低云量和日最高气温等数据,来自章丘国家基本气象观测站,数据均经自动、人工审核与质量控制,符合《地面气象观测规范》<sup>[50]</sup>要求,其中总低云量采用内插法得到逐小时值<sup>[2]</sup>。章丘国家基本气象观测站与济南WPR观测站、济南L波段雷达探空观测站属于相同站场,观测场经纬度、海拔高度基本一致,本文统称为济南站。

## 1.2 济南夏季日最大 $H_{BL}$ 的三种确定方法

考虑实用性和可操作性,本研究选择采用以下三种方法,各自确定济南2014年夏季6月1—30日和7月15—24日共40 d的逐日最大 $H_{BL}$ ,并进行对比分析。

方法一:偏离度法,基于WPR观测的 $C_n^2$ ,将每一时次的 $10\times\log(C_n^2)$ 廓线的实测值与其拟合曲线值的差定义为偏离度,实际偏离度最大值对应的高度层判断为该时次的实测 $H_{BL}$ <sup>[11]</sup>,然后将每日07—19时的逐小时结果,排序筛选得到日最大 $H_{BL}$ 。

方法二:干绝热曲线法,在温度-高度图上,从每日地面最高气温所在点沿干绝热线上升,与当日07:15的L波段雷达探空温度廓线相交,所得交点距地面的高度即为直接估算的当日最大 $H_{BL}$ <sup>[19-22]</sup>。

方法三:国标法,根据GB/T 13201—91《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》<sup>[16]</sup>,基于地面气象观测的总云量、低云量和距地面10 m高度风速( $U_{10}$ ),通过计算太阳高度角,再查算出Pasquill大气稳定度等级,然后采用公式计算 $H_{BL} = a_s \times U_{10}/f$ ( $a_s$ 为不同大气稳定度对应的混合层系数, $f$ 为地转参数)<sup>[1,14-17]</sup>,最终计算出每日07—19时的逐小时

$H_{BL}$ ,排序筛选得到日最大 $H_{BL}$ 。

因WPR对雨滴很敏感<sup>[3,37]</sup>,当降水出现时各高度层的 $C_n^2$ 均明显增大,所以当有雨时 $H_{BL}$ 无法判别。本研究也证实,地面或空中降雨时段、各高度层相对湿度连续较大时段(多高度层连续大于85%以上),WPR观测的 $C_n^2$ 数据均不适用于判定 $H_{BL}$ ,即方法一适用性有局限;同时L波段雷达探空数据也不适用于判定 $H_{BL}$ ,即方法二适用性同样有局限。因此,首先剔除这两种因素影响的样本,然后得到三种方法确定的日最大 $H_{BL}$ 样本数共 $3\times 25$ 个,同样得到方法一和方法三确定的逐小时 $H_{BL}$ 样本数共 $2\times 303$ 个,基于此进行统一对比分析。

## 2 结果分析

### 2.1 三种方法确定的日最大 $H_{BL}$ 对比

三种方法确定的日最大 $H_{BL}$ 结果对比及相关分析分别见图1、2,图2中若其中二者逐日结果对应相同则所有点应分布在从左下角到右上角的对角线上(下同)。

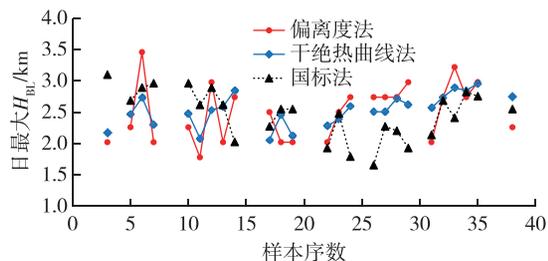


图1 三种方法确定的济南2014年6—7月25 d各日最大 $H_{BL}$ 对比

Fig.1 Comparison of the daily maximum  $H_{BL}$  determined by the three methods in Jinan in 25 d from June to July 2014

1) 偏离度法、干绝热曲线法、国标法三种方法确定的济南夏季25 d的日最大 $H_{BL}$ 平均值分别为2 500.0 m、2 529.1 m、2 469.9 m,三种方法总体一致、差异较小,偏离度法与后两者分别相差-29.1 m、+30.1 m。25 d同日期的日最大 $H_{BL}$ 比较,偏离度法、国标法分别与干绝热曲线法的日最大偏差为+722.6 m(6月6日)、+928.2 m(6月3日),标准偏差( $\sigma$ )分别为337.1 m、485.4 m,显示国标法的偏差较偏离度法的大;且国标法与偏离度法的日最大偏差+1 079.9 m(6月3日)、 $\sigma=636.7\text{ m}$ 更大(图2)。

2) 偏离度法与干绝热曲线法结果的相关系数 $R$ 较高,为0.668(图2a),通过0.01信度检验,说明两方法确定的25组日最大 $H_{BL}$ 相关性较好。但国标

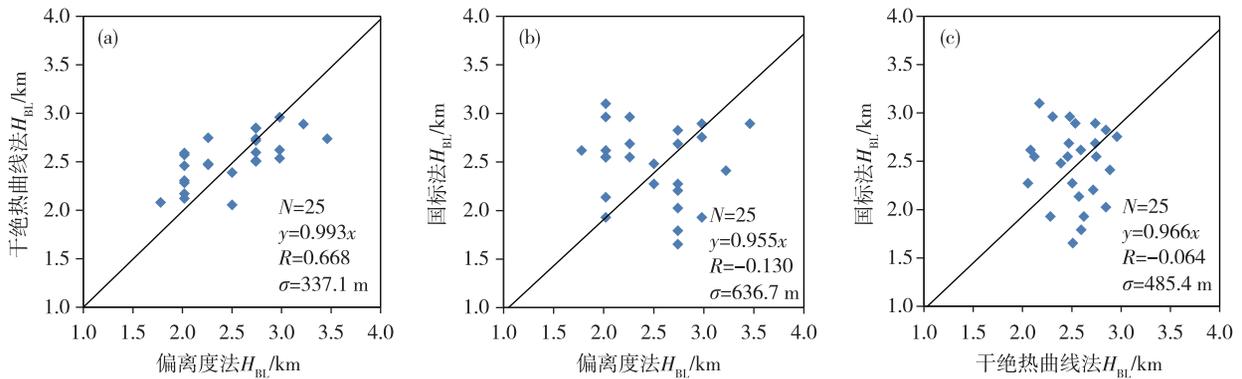


图 2 三种方法确定的济南 2014 年 6—7 月 25 d 各日最大  $H_{BL}$  相关性对比(a.偏离度法与干绝热曲线法的相关性,b.偏离度法与国际法的相关性,c.干绝热曲线法与国际法的相关性)

Fig.2 Comparison of correlations of the daily maximum  $H_{BL}$  determined by the three methods in Jinan in 25 d from June to July 2014 (a. correlation between the deviation degree method and the dry adiabatic curve method, b. correlation between the deviation degree method and the national standard method, c. correlation between the dry adiabatic curve method and the national standard method)

法与偏离度法、干绝热曲线法结果的  $R$  均为负值,分别为-0.130、-0.064(图 2b、c),均未能通过 0.10 信度检验,相关性不好。两组基于探空实测资料诊断确定的日最大  $H_{BL}$  相关性较好,但均与基于地面观测资料半经验公式计算的  $H_{BL}$  相关性不好,显示国标法并不能很好地反映  $H_{BL}$  实时变化的实际状况。

3) 基于实测资料确定日最大  $H_{BL}$ , 应是获得  $H_{BL}$  及相关参量最可靠的方法, 虽然偏离度法、干绝热曲线法, 不同确定方法的结果会有一些差异, 但两者总体上都有较好的代表性。囿于国标法是基于多年均值的地面风向、风速、稳定度联合概率分布推导的<sup>[17]</sup>, 原理上该方法只适用于平均状况下的  $H_{BL}$  估算, 而对于实时  $H_{BL}$  的判定准确度低、代表性也相对较差。

### 2.2 偏离度法与国标法两种方法确定的 $H_{BL}$ 演变规律对比

干绝热曲线法只能给出直接估算的每日最大  $H_{BL}$ , 并不能给出其出现的确切时间, 而其他两种方法可给出。偏离度法和国标法确定的 25 d 每日 07—19 时逐小时的  $H_{BL}$  演变分别见图 3a 和图 3b, 日最大  $H_{BL}$  出现时间对比见图 4, 同时在图 3 中给出了 07、13、19 时 L 波段雷达探空实测虚位温梯度法<sup>[3,11,27-28]</sup> 的确定结果, 以进行对比。

1) 方法一(偏离度法)确定的济南夏季日最大  $H_{BL}$  为 3 460.0 m, 出现在 6 月 6 日 15 时(图 3a); 25 d 的逐小时  $H_{BL}$  最大值出现时间相对集中, 在午后 13—16 时均有出现(图 4), 其中以 15 时最多, 为 13

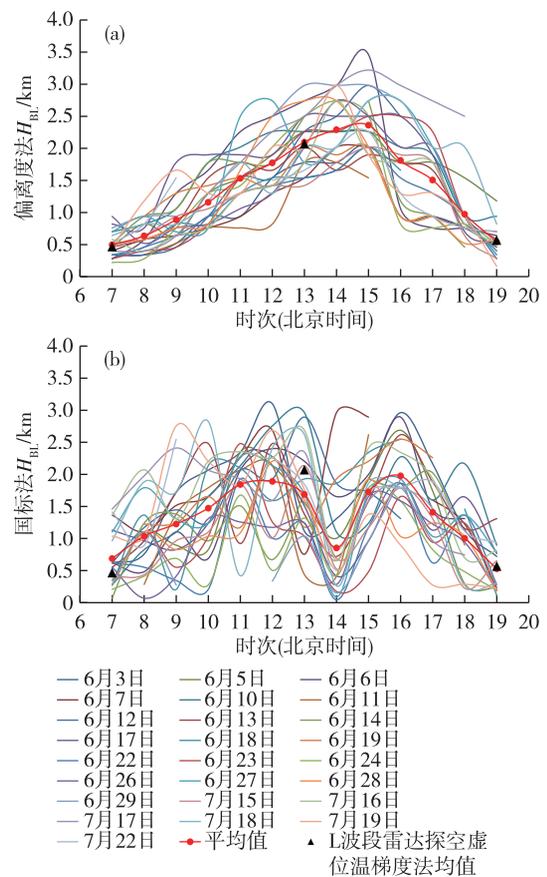


图 3 偏离度法(a)和国标法(b)确定的济南 2014 年 6—7 月 25 d 中 07—19 时逐小时  $H_{BL}$  演变

Fig.3 Evolution of the hourly  $H_{BL}$  determined by the deviation degree method (a) and the national standard method (b) in Jinan from 07:00 to 19:00 in 25 d from June to July 2014

d(占比 52.0%), 其次是 14 时 6 d(占比 24.0%)、16

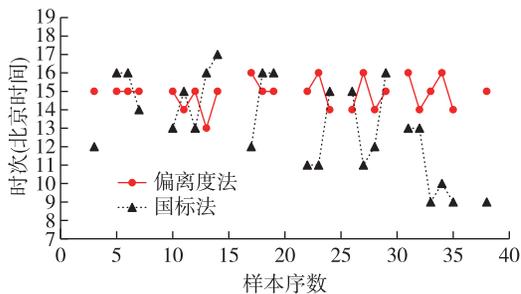


图4 偏离度法和国标法确定的济南2014年6—7月25 d日最大 $H_{BL}$ 出现时间对比

Fig.4 Comparison of the occurrence time of the daily maximum  $H_{BL}$  determined by the deviation degree method and the national standard method in Jinan in 25 d from June to July 2014

时5 d(占比20.0%)、13时1 d(占比4.0%),符合对流边界层演变的一般规律<sup>[23,33,35]</sup>。25 d平均的 $H_{BL}$ (图3a),最大值2360.8 m出现在15时,07—15时 $H_{BL}$ 呈缓慢增高态势,而15—19时 $H_{BL}$ 则快速降低。逐日实时和25 d平均的 $H_{BL}$ 演变规律基本一致,但25 d各日 $H_{BL}$ 逐小时值是波浪起伏式变化的,而非平均值那样的持续增高或降低,07—15时 $H_{BL}$ 总体呈现缓慢增高态势,而15时后有一些 $H_{BL}$ 是断崖式降低的,如6月3、6、24、28日和7月19、22日等,而另一些则是延续滞后至16时才迅速降低的,如6月17、23、27日和7月15、16日等。分析原因是,对流边界层的形成阶段是由于热力抬升增强导致的热泡式起伏增长,而崩溃阶段则是热力抬升减弱导致坍塌式快速降低<sup>[3]</sup>。

2)方法三(国标法)计算的济南夏季日最大 $H_{BL}$ 为3099.9 m,出现在6月3日12时(图3b);25 d的逐小时 $H_{BL}$ 最大值出现时间相对分散,在09—17时均有出现(图4),其中以16时最多,为6 d(占比24.0%),其次是13时4 d(占比16.0%),09、11、12、13、15时均为3 d(占比12.0%),10、14、17时均为1 d(占比4.0%)。25 d平均 $H_{BL}$ 最大值为1976.7 m,出现在16时,07—12时 $H_{BL}$ 缓慢增高,16—19时 $H_{BL}$ 快速降低(图3b)。逐日实时和25 d平均的 $H_{BL}$ 演变,都在午后13—15时出现坍塌现象(图3b),且自13时开始与偏离度法、L波段雷达探空虚位温梯度法的结果也差异较大,这与对流边界层演变的午后峰值规律显著不同。分析原因是,受近地面观测风速和近地面大气稳定度等级的影响权重过大,导致国标法估算的实时 $H_{BL}$ 准确度低,尤其是在午后峰值时段不适用,如6月11、17、22、24、

27、29日和7月18日等(图3b),其中6月27日14时距地面10 m高度的风速为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,大气稳定度等级为D类,国标法计算 $H_{BL}$ 仅为87.3 m;而偏离度法确定的14时 $H_{BL}$ 为2020 m,L波段雷达探空虚位温梯度法确定该日13:15的 $H_{BL}$ 为1740 m,干绝热曲线法确定的该日午后最大 $H_{BL}$ 为2505.1 m。

3)偏离度法与L波段雷达探空虚位温梯度法确定的 $H_{BL}$ 平均值在早晨、中午、傍晚均基本一致(图3a),两者07、13、19时的差值均很小,分别为+28.4 m、+24.3 m、-29.2 m;而国标法与L波段雷达探空虚位温梯度法确定的 $H_{BL}$ 平均值仅在傍晚基本一致(图3b),早晨、中午则差异较大,两者07、13、19时的差值分别为+220.0 m、-385.3 m、-43.1 m。

### 2.3 不同方法确定的日最大 $H_{BL}$ 与各气象条件的相关关系

#### 2.3.1 $H_{BL}$ 与气温、地表温度、风速的相关关系

1)三种方法确定的济南2014年6—7月25 d的日最大 $H_{BL}$ ,其中与日最高气温的相关性最好的是干绝热曲线法( $R=0.965$ ),其次是偏离度法( $R=0.693$ ),而国标法最差( $R=-0.067$ ,未通过0.05信度检验,即不相关);与日最高地表温度的相关性最好的是干绝热曲线法( $R=0.736$ ),其次是偏离度法( $R=0.423$ ),而国标法最差( $R=0.340$ ,未通过0.05信度检验,即不相关);但是,与距地面10 m高度风速的相关性最好的是国标法( $R=0.880$ ),而偏离度法( $R=-0.148$ )和干绝热曲线法( $R=-0.085$ )都较差,未通过0.05信度检验,即不相关(图5)。

2)两种方法确定的25 d每日07—19时逐小时的 $H_{BL}$ ,其中偏离度法 $H_{BL}$ 与气温、地表温度的相关性25 d总体均较好, $R$ 分别在0.521~0.970、0.542~0.958之间,较为稳定一致、波动幅度小,且均通过0.05信度检验;但是,偏离度法 $H_{BL}$ 与风速的相关性总体较差, $R$ 在-0.673~0.919之间,不稳定且波动幅度大,仅有8组(占比32.0%)通过0.05信度检验,其余17组均未通过(图6a)。国标法 $H_{BL}$ 与气温、地表温度的相关性25 d总体均较差, $R$ 分别在-0.330~0.778、0.091~0.872之间,不稳定且波动幅度较大,分别有10组(占比40.0%)、14组(占比56.0%)通过0.05信度检验,其余15、11组均未通过;国标法 $H_{BL}$ 与风速的相关性总体较好但不稳定,有20组(占比80.0%)通过了0.05信度检验且 $R$ 在0.568~0.959之间,其余5组未通过且 $R$ 在-0.513~0.411之间(图6b)。

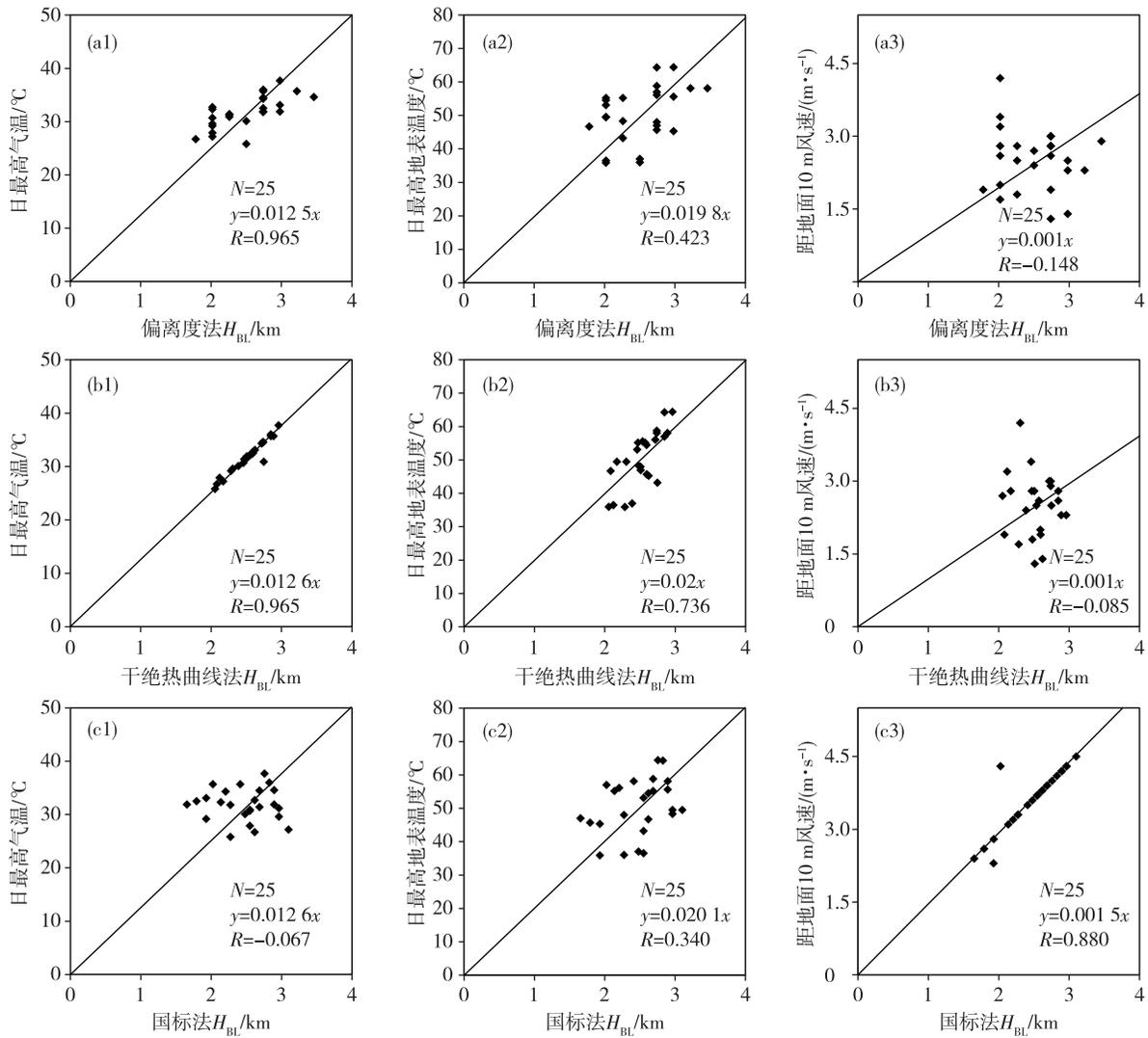


图 5 三种方法确定的济南 2014 年 6—7 月 25 d 中日最大  $H_{BL}$  与各气象要素的相关性对比 (a1/a2/a3. 偏离度法, b1/b2/b3. 干绝热曲线法, c1/c2/c3. 国标法; a1/b1/c1. 日最高气温, a2/b2/c2. 日最高地表温度, a3/b3/c3. 距地面 10 m 风速)

Fig.5 Comparison of correlations between the daily maximum  $H_{BL}$  determined by the three methods and various meteorological elements in Jinan in 25 d from June to July 2014 (a1/a2/a3. the deviation degree method, b1/b2/b3. the dry adiabatic curve method, c1/c2/c3. the national standard method; a1/b1/c1. the daily maximum air temperature, a2/b2/c2. the daily maximum surface temperature, a3/b3/c3. wind speed at 10 m)

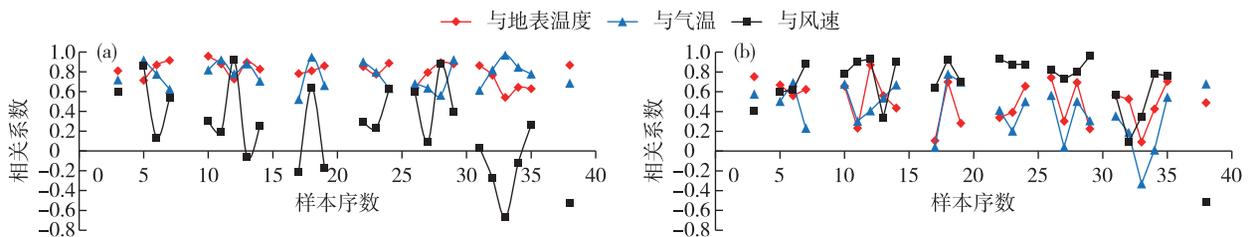


图 6 偏离度法 (a) 和国标法 (b) 确定的济南 2014 年 6—7 月 25 d 中 07—19 时逐小时  $H_{BL}$  与各气象要素的相关系数对比

Fig.6 Comparison of correlations between various meteorological elements and the hourly  $H_{BL}$  determined by the deviation degree method (a) and the national standard method (b) in Jinan from 07:00 to 19:00 in 25 d from June to July 2014

以上结果是三种方法的确定原理和采用的基础资料的直接反映, 偏离度法确定  $H_{BL}$  是基于 WPR

观测的高空的  $C_n^2$ , 判定时与地面气象要素没有直接计算关联; 干绝热曲线法确定  $H_{BL}$  则借助于每日

地面最高气温,故与气温的相关性最好;而国标法确定  $H_{BL}$  则直接引用距地面 10 m 高度的风速计算,故与风速的相关性最好。由于影响  $H_{BL}$  的主要因素是太阳直接辐射,太阳直接辐射加热地面引起向上的感热通量,然后加热近地面层空气,形成对流,使边界层得到发展<sup>[51]</sup>,可见偏离度法、干绝热曲线法确定的  $H_{BL}$  与地表温度、气温的相关性均较好,且两方法的  $H_{BL}$  与气温的相关系数总体上高于与地表温度的相关系数,即符合太阳辐射—地表温度—气温— $H_{BL}$  的响应关系和响应次序,而国标法确定的  $H_{BL}$  与地表温度、气温的相关性均较差,未能反映这一响应。

### 2.3.2 $H_{BL}$ 与气温、地表温度、风速的时间响应关系

由图 7 中 25 d 的 07—19 时逐小时平均值变化来看,日地表温度最高值出现在 13 时,日气温最高值则延迟 2 h 至 15 时出现,偏离度法确定的日最大  $H_{BL}$  也是出现在 15 时,即平均状态下,日最大  $H_{BL}$  对

最高气温的响应时间在 1 h 左右,而对最高地表温度的响应时间为 2 h 左右,这符合大气边界层理论中关于太阳辐射—地表温度—气温— $H_{BL}$  的响应关系和次序<sup>[25,51-54]</sup>。由图 8 中 25 d 逐日出现时间来看,日最高地表温度在 11—15 时均有出现且较为集中,最多出现在 13 时(占比 48.0%);日最高气温在 12—17 时均有出现,最多出现在 15 时(占比 48.0%);偏离度法日最大  $H_{BL}$  在 13—16 时均有出现且较为集中,最多也出现在 15 时(占比 52.0%),即自统计概率角度分析也显示这一响应。但是,国标法确定的平均状态下日最大  $H_{BL}$  出现在 16 时(图 7),逐日的日最大  $H_{BL}$  在 09—17 时均有出现且较为分散(图 8),最多出现在 16 时(占比 24.0%),受近地面风速和稳定度等级影响大、午后 13—15 时的坍塌是导致国标法日最大  $H_{BL}$  出现时间偏差较大的主要原因,即国标法不能准确反映地表温度—气温— $H_{BL}$  的响应关系和次序。

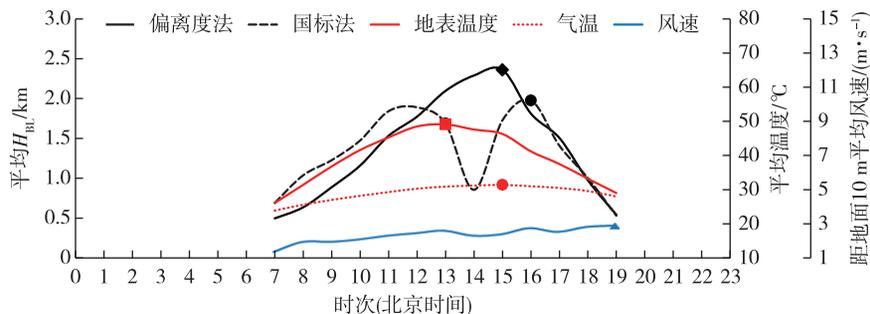


图 7 济南 2014 年 6—7 月 25 d 平均的逐小时  $H_{BL}$  与各气象条件演变对比

Fig.7 Comparison of the evolution of the average hourly  $H_{BL}$  and various meteorological conditions in Jinan in 25 d from June to July 2014

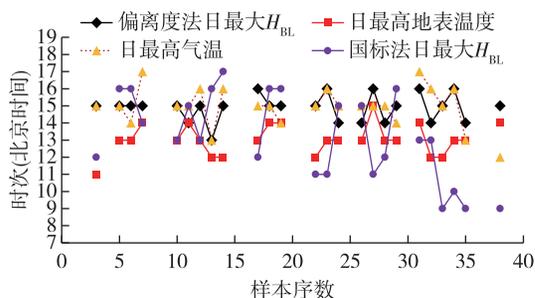


图 8 济南 2014 年 6—7 月 25 d 的逐日最大  $H_{BL}$ 、最高地表温度、最高气温出现时间对比

Fig.8 Comparison of the occurrence time of the daily maximum  $H_{BL}$ , maximum surface temperature, and maximum air temperature in Jinan in 25 d from June to July 2014

平均状态下的距地面 10 m 高度的风速最大值出现在 19 时(图 7),显然偏离度法和国标法确定的

$H_{BL}$  与平均风速的响应关系和次序均不明显。

### 2.4 两种方法确定的 $H_{BL}$ 与污染物浓度的关系

SCHÄFER et al.<sup>[55]</sup>认为  $H_{BL}$  可以解释 50% 以上的近地面污染物浓度变化, WAGNER and KUTTLER<sup>[56]</sup>揭示  $H_{BL}$  与污染物平均浓度以及最大浓度均具有强相关性。研究  $H_{BL}$  的变化特征及其与污染物浓度的相关性,可为空气质量预测、环境容量评估、环境规划及污染物排放标准的制定提供重要依据<sup>[57-61]</sup>。偏离度法确定的济南 2014 年 7 月 18 日 07—19 时逐小时  $H_{BL}$ (图 9),与当地环境空气质量例行监测点  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  逐小时质量浓度(距地面 1.5 m)均呈显著负相关,  $R$  分别为  $-0.685$ 、 $-0.544$ 、 $-0.573$ 、 $-0.525$ ,均通过 0.05 信度检验;而国标法确定的逐小时  $H_{BL}$ ,与  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  浓度的  $R$  分别为  $0.241$ 、 $-0.237$ 、

-0.216、-0.365,均未通过 0.05 信度检验;以决定系数( $R^2$ )判断,偏离度法  $H_{BL}$  分别可以解释 46.9%、29.6%、32.8%、27.6% 的近地面污染物浓度变化,而国标法  $H_{BL}$  分别仅可以解释 5.8%、5.6%、4.7%、

13.3%的。对比可见,各污染物的逐小时质量浓度与偏离度法  $H_{BL}$  的相关性更好,与国标法  $H_{BL}$  的相关性则较差,偏离度法  $H_{BL}$  能更好地反映对流边界层逐小时变化及解释近地面污染物浓度的变化。

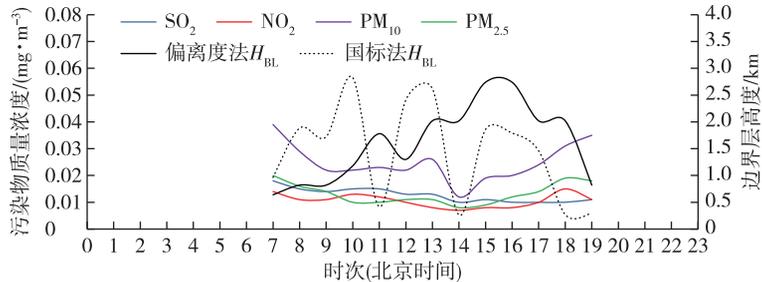


图 9 济南 2014 年 7 月 18 日 07—19 时逐小时  $H_{BL}$  与各污染物浓度变化对比

Fig.9 Comparison of changes in the hourly  $H_{BL}$  and pollutant concentrations in Jinan from 07:00 to 19:00 on 18 July 2014

另外,近地面各污染物质量浓度的最低值均出现在 14 时,而偏离度法最大  $H_{BL}$  出现在 15—16 时,相差 1~2 h,即两者并非同步负相关,这对于空气质量模型的改进十分关键。分析原因,应是与前述的对流边界层发展机制和各要素响应次序有关,近地面热浮力和动力抬升造成的湍流运动最强应是在 14 时前后,近地面污染物的扩散和稀释显然受此影

响更大一些;而持续向上传递的热通量滞后造成最大  $H_{BL}$  的出现时间延迟。

### 3 讨论与小结

基于上述结果的对比分析,结合三种方法的原理和相关文献研究资料,对比评估结果见表 1。

表 1 确定日最大  $H_{BL}$  的三种方法综合对比评估

Table 1 Comprehensive comparison and evaluation of the three methods in determining the daily maximum  $H_{BL}$

| 对比评估项       | 方法一(偏离度法)  | 方法二(干绝热曲线法)                              | 方法三(国标法)  |
|-------------|--|--|---|
| 方法原理        | 实测法,以 WPR 实时探空资料为基础,基于 $C_n^{-2}$ 廓线可直接表征湍流强弱的突变 | 实测估算,以每日 07:15 L 波段雷达探空资料为基础,估算热力湍流的最大影响 | 半经验估算法,以地面气象资料为基础,估算高空 1~4 km 的大气湍流状况   |
| 方法可操作性      | 实时,简单,易操作  | 每日一次,简单,可操作                              | 逐小时,计算简便,可操作  |
| 方法的影响因素及适用性 | 易受杂波干扰<br>降水或多高度层的湿度大于 85% 情形不适用                 | 受大风影响<br>降水或多高度层的湿度大于 85% 情形不适用          | 不确定性因素多<br>适用于定常边界层, $U_{10} > 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的非定常天气过程不适用 <sup>[17]</sup> |
| 需要的基础数据     | 100~3 940 m 的 $C_n^{-2}$                         | 0~4 000 m 温度、地面日最高气温                     | 10 m 风速、总低云量、大气稳定度  |
| 基础数据可获得性    | WPR 站,较多   | L 波段雷达探空站,很少                             | 地面气象站,很多  |
| 基础数据数量      | 多  | 少  | 较多  |
| 基础数据质量      | 较好,需严格的质量控制                                      | 好,需质量控制                                  | 好,一般不需质量控制  |
| 数据时间分辨率     | 高:逐日,逐小时,逐 6 min                                 | 低:逐日 07:15 资料                            | 较高:逐日,逐小时   |
| 数据空间垂直分辨率   | 较高:60、120、240 m 级                                | 高:10 m 级                                 | —   |
| 确定结果准确度     | 较高;能给出时空演变                                       | 较高;但不能给出时空演变                             | 低;能给出时空演变但午后峰值偏差大   |
| 与污染物浓度相关性   | 显著负相关  | —  | 较差  |
| 方法综合评估      | 较好,但有局限  | 较好,但局限大                                  | 较差  |

1) 偏离度法突出的优点是: a)  $C_n^{-2}$  观测数据量大且时间分辨率高,可实现逐 6 min 的实时  $H_{BL}$  确

定;b) 囿于  $C_n^2$  就是表征湍流变化强弱的一个参数<sup>[36]</sup>, 因此依据其廓线在边界层顶的突变或跃变特征确定出的  $H_{BL}$  结果准确度较高, 原理上优于其他两种方法;c) 能判断给出  $H_{BL}$  出现的具体时间, 且可给出时空演变, 确定的  $H_{BL}$  符合对流边界层发展的规律, 从而可为边界层精细化结构和演变特征的研究、应用, 提供很好的实测和验证基础。但该方法也有缺陷:a) 观测数据的空间垂直分辨率不如其他两种方法的高, 导致确定的  $H_{BL}$  在高度上的精度尚偏低;b)  $C_n^2$  观测数据质量需严格控制, 这是制约  $H_{BL}$  确定的关键因素, 最大程度地剔除杂波干扰、修正异常数据是亟待解决的问题;c) 降水或多高度层的湿度大于 85% 情形下该方法并不适用, 且该判别需借助于地面和探空观测资料, 应用尚有局限;d) 属于单一指标判断法, 基于 WPR 观测的  $C_n^2$ 、信噪比 ( $S_{NR}$ )、速度谱宽、垂直径向速度等产品数据的综合指标判定  $H_{BL}$ , 可进一步提高准确度并实现自动判别<sup>[11, 28, 42-43]</sup>。

2) 干绝热曲线法的优点是:a) L 波段雷达探空数据的高度层分辨率高, 可达 10 m 级, 得到的  $H_{BL}$  准确度较高;b) 仅需要探空温度资料和地面日最高气温, 资料易得且方法简易可操作, 易于应用与推广;c) 结果与方法一差异不大, 相关性较好, 证实确定结果较为接近实际的  $H_{BL}$ <sup>[52]</sup>。但缺陷也很突出:a) 该方法是基于将大气边界层内热力结构的显著变化仅仅归结为地面上热量输入重新分配的结果, 而不考虑动力的作用<sup>[8]</sup>, 07:15 后只考虑了热力湍流的影响, 而忽略平流、下沉以及机械湍流等的影响, 因此晴天时  $H_{BL}$  估算的精确度较高, 而阴天时  $H_{BL}$  估算的精确度较差<sup>[20, 52]</sup>; b) L 波段雷达探空站数量很少, 远不能满足应用需求;c) 只能直接估算日最大  $H_{BL}$ , 不能确定  $H_{BL}$  出现的具体时间, 也不能给出  $H_{BL}$  的时空演变, 已不能满足日益精细化边界层结构研究和应用需求。

3) 国标法的优点是: 地面气象台站多、资料易于获取、计算简便。但缺陷很突出:a) 能给出  $H_{BL}$  出现时间但存在较大偏差, 可给出  $H_{BL}$  时空演变但午后峰值偏差大, 存在坍塌现象, 确定的  $H_{BL}$  不符合对流边界层演变规律, 尤其在午后 13—15 时偏差更显著, 实时准确度低;b) 囿于是基于多年均值的风向、风速、稳定度联合概率分布推导的<sup>[17]</sup>, 原理上该方法只适用于平均状况下的  $H_{BL}$  确定, 对于实时  $H_{BL}$  的确定, 适用性不好;c) 仅依据地面观测数据判断高空 1~4 km 的大气湍流状况, 导致与实际对流边界

层的演变存在较大偏差;d) 属于半经验公式, 适用于定常边界层, 对  $U_{10} > 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的非定常天气过程不适用<sup>[17]</sup>。

4) 偏离度法确定的济南夏季 25 d 日最大  $H_{BL}$  的平均值为 2 500.0 m; 逐小时  $H_{BL}$  演变是波浪起伏式的, 07—15 时  $H_{BL}$  缓慢增高、15 时后有一些  $H_{BL}$  是断崖式降低的; 日最大  $H_{BL}$  对最高气温、最高地表温度的平均响应时间分别为 1、2 h 左右;  $H_{BL}$  逐小时值与各污染物质量浓度的相关性更好, 但两者并非同步负相关。这可为研究边界层精细化结构, 提高空气质量预报和大气自净能力判定的准确率等提供更好的参考。

5) 冬季大气层结稳定、空气污染的程度较重, 日最大  $H_{BL}$  是人们更为关心的, 但目前 L 波段雷达探空加密观测业务是在夏季三个月, 建议冬季也应进行观测; 并结合 WPR、激光雷达、微波辐射计等的观测资料, 探索确定边界层精细化结构的更好方法, 以不断推进理论研究及业务应用。

## 参考文献:

- [1] 朱蓉, 张存杰, 梅梅. 大气自净能力指数的气候特征与应用研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3601-3610.
- [2] 董旭光, 刘焕彬, 汤子东, 等. 气候变化背景下山东大气自净能力特征分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 93-102.
- [3] ANGEVINE W M, WHITE A B, AVERY S K. Boundary-layer depth and entrainment zone characterization with a boundary-layer profiler[J]. Bound-Layer Meteorol, 1994, 68(4): 375-385.
- [4] 蔡芴宁, 寿绍文, 钟青. 边界层参数化方案对暴雨数值模拟的影响[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(3): 364-370.
- [5] 乔梁, 张强, 岳平, 等. 由非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 251-265.
- [6] 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[J]. 气象科学, 2019, 39(3): 359-367.
- [7] SEIBERT P, BEYRICH F, GRYNING S E, et al. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height[J]. Atmos Environ, 2000, 34(7): 1001-1027.
- [8] 安顺清, 陆业传. 最大混合层厚度的一种计算方法及北京的某些统计结果[J]. 气象, 1983, 9(1): 24-26.
- [9] 王耀庭, 李威, 张小玲, 等. 北京城区夏季静稳天气下大气边界层与大气污染的关系[J]. 环境科学研究, 2012, 25(10): 1092-1098.

- [10] 金莉莉,李振杰,何清,等.乌鲁木齐市边界层日变化特征[J].气象科技,2017,45(4):686-697.
- [11] 王栋成,邱黎,董旭光,等.偏离度法确定济南夏季对流边界层高度研究[J].气象与环境学报,2019,35(3):29-36.
- [12] 陆正奇,韩永翔,夏俊荣,等.WRF模式对污染天气下边界层高度的模拟研究[J].中国环境科学,2018,38(3):822-829.
- [13] 杜川利,唐晓,李星敏,等.城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J].高原气象,2014,33(5):1383-1392.
- [14] 廖国莲.大气混合层厚度的计算方法及影响因子[J].中山大学研究生学刊(自然科学、医学版),2005,26(4):66-73.
- [15] 程水源,席德立,张宝宁,等.大气混合层高度的确定与计算方法研究[J].中国环境科学,1997,17(6):512-516.
- [16] 制定地方大气污染物排放标准的技术方法:GB/T 13201—91[S].北京:中国标准出版社,1992:17-18.
- [17] 徐大海.风向、风速、稳定度类别联合概率分布及混合层深度的诊断估计初探[J].环境科学,1990,11(1):11-18.
- [18] 马金,郑向东.混合层厚度的经验计算及与探空观测对比分析[J].应用气象学报,2011,22(5):567-576.
- [19] HOLZWORTH G C. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States[J].Mon Wea Rev, 1964,92(5):235-242.
- [20] 吴祖常,董保群.我国陆域大气最大混合层厚度的地理分布与季节变化[J].科技通报,1998,14(3):158-163.
- [21] 王式功,姜大膀,杨德保,等.兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J].高原气象,2000,19(3):363-370.
- [22] 尤焕苓,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[J].气象,2010,36(5):51-55.
- [23] 赵鸣,苗曼倩,王彦昌.边界层气象学教程[M].北京:气象出版社,1991:218-219.
- [24] 洪钟祥,钱敏伟,胡非.由地基遥感资料确定大气边界层特征[J].大气科学,1998,22(4):613-624.
- [25] 张坚.风廓线雷达在南海季风边界层结构及深圳海陆风研究中的应用[D].南京:南京信息工程大学,2013:1-35.
- [26] 宫庆龙,刁一娜.冷空气过程对黄海东海区域海洋大气边界层结构影响的个例分析[J].海洋气象学报,2018,38(1):51-61.
- [27] HYUN Y K, KIM K E, HA K J. A comparison of methods to estimate the height of stable boundary layer over a temperate grass-land [J]. Agric For Meteorol, 2005,132(1/2):132-142.
- [28] BIANCO L, WILCZAK J M. Convective boundary layer depth: Improved measurement by doppler radar wind profiler using fuzzy logic methods [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2002,19(11):1745-1758.
- [29] 魏浩,胡明宝,艾未华.小波变换在风廓线雷达探测大气边界层高度中的应用研究[J].热带气象学报,2015,31(6):811-820.
- [30] 刘北平.确定大气混合层高度方法的研究[J].环境科学研究,1990,3(1):8-12.
- [31] SEIDEL D, ZHANG Y H, BELJAARS A, et al. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe [J]. J Geophys Res, 2012,117(D17): D17106.
- [32] VOGELEZANG D H P, HOLTSLAG A A M. Evaluation and model impacts of alternative boundary-layer height formulations [J]. Bound-Layer Meteorol, 1996, 81(3/4):245-269.
- [33] 陆正奇,韩永翔,夏俊荣,等.WRF模式对污染天气下边界层高度的模拟研究[J].中国环境科学,2018,38(3):822-829.
- [34] 孙文奇,李昌义.数值模式中的大气边界层参数化方案综述[J].海洋气象学报,2018,38(3):11-19.
- [35] 张碧辉,刘树华,LIU H P,等.MYJ和YSU方案对WRF边界层气象要素模拟的影响[J].地球物理学报,2012,55(7):2239-2248.
- [36] 何平.相控阵风廓线雷达[M].北京:气象出版社,2006:46-115.
- [37] 胡明宝.风廓线雷达探测与应用[M].北京:气象出版社,2015:95-113.
- [38] 王琳,谢晨波,韩永,等.测量大气边界层高度的激光雷达数据反演方法研究[J].大气与环境光学学报,2012,7(4):241-247.
- [39] 李红,马媛媛,杨毅.基于激光雷达资料的小波变换法反演边界层高度的方法[J].干旱气象,2015,33(1):78-88.
- [40] 杨富燕,张宁,朱莲芳,等.基于激光雷达和微波辐射计观测确定混合层高度方法的比较[J].高原气象,2016,35(4):1102-1111.
- [41] 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]. J Atmos Oceanic Technol, 2003,20(3):408-424.
- [42] 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]. J Atmos Oceanic Technol, 2008,25(8):1397-1413.
- [43] ALLABAKASH S, YASODHA P, BIANCO L, et al.

- Improved boundary layer height measurement using a fuzzy logic method: Diurnal and seasonal variabilities of the convective boundary layer over a tropical station[J]. *J Geophys Res*, 2017, 122(17): 9211-9232.
- [44] 曹晓彦,李炬,张京江,等.由风廓线数据分析北京地区夏季边界层高度的特征[C]//中国气象学会.2007年中国气象年会气象综合探测技术分会场论文集.广州:中国气象学会,2007:68-77.
- [45] 王敏仲,魏文寿,何清,等.风廓线雷达对塔克拉玛干沙漠晴天边界层的探测分析[J].*气象*, 2012, 38(5): 577-584.
- [46] 蒋德海,王成刚,吴兑,等.利用风廓线雷达资料对广州地区边界层日变化特征的分析研究[J].*热带气象学报*, 2013, 29(1): 129-135.
- [47] 周雯嫣,王凌震,胡帆,等.干扰对边界层风廓线的影响及对策[J].*气象水文海洋仪器*, 2011(2): 90-95.
- [48] 中国气象局.常规高空气象观测业务规范[M].北京:气象出版社,2010.
- [49] 李伟,刘凤琴,徐伟,等.L波段高空气象探测系统软件[J].*气象科技*, 2008, 36(2): 237-239.
- [50] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003.
- [51] 袁仁民,马成胜,范爱媛.混合层顶覆盖逆温层变化规律研究[J].*中国科学技术大学学报*, 2003, 33(2): 247-252.
- [52] 贾健,杨佩琪,蒋慧敏.乌鲁木齐市日最大边界层高度变化特征分析及其与空气质量的关系[J].*气象与环境学报*, 2019, 35(2): 55-60.
- [53] 张强,张杰,乔娟,等.我国干旱区深厚大气边界层与地面热力过程的关系研究[J].*中国科学:地球科学*, 2011, 41(9): 1365-1374.
- [54] STULL R B.边界层气象学导论[M].杨长新,译.北京:气象出版社,1991:1-519.
- [55] SCHÄFER K, EMEIS S, HOFFMANN H, et al. Influence of mixing layer height upon air pollution in urban and sub-urban areas[J]. *Meteor Z*, 2006, 15(6): 647-658.
- [56] WAGNER P, KUTTLER W. Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere: A case study in Essen, Germany [J]. *Sci Total Environ*, 2014(475): 104-115.
- [57] 廖志恒,许欣祺,谢洁岚,等.珠三角地区日最大混合层高度及其对区域空气质量的影响[J].*气象与环境学报*, 2019, 35(5): 85-92.
- [58] 祝薇,李浩文,王宝民,等.多遥感设备联用在区域空气质量变化与边界层结构关系研究中的应用[J].*环境科学学报*, 2018, 38(5): 1689-1698.
- [59] 张舒婷,苏德斌,徐文静,等.利用风廓线雷达资料对北京地区边界层日变化特征的分析研究[J].*大气与环境光学学报*, 2017, 12(1): 1-7.
- [60] 张莹,贾旭伟,杨旭,等.中国典型代表城市空气污染特征及其与气象参数的关系[J].*气象与环境学报*, 2017, 33(2): 70-79.
- [61] 蒋伊蓉,朱蓉,朱克云,等.京津冀地区重污染天气过程的污染气象条件数值模拟研究[J].*环境科学学报*, 2015, 35(9): 2681-2692.