

蔡子颖,张敏,韩素芹,等,2018.天津重污染天气混合层厚度阈值及应用研究[J].气象,44(7):911-920.

# 天津重污染天气混合层厚度阈值及应用研究\*

蔡子颖<sup>1,2</sup> 张 敏<sup>1,2</sup> 韩素芹<sup>2</sup> 李培彦<sup>2</sup> 刘敬乐<sup>2</sup> 姚 青<sup>1,2</sup>

1 天津市环境气象中心,天津 300074

2 天津市气象科学研究所,天津 300074

**提 要:** 在对比云高仪反演数据和中尺度模式不同边界层方案模拟数据的基础上,构建天津地区混合层厚度数据集,并收集2009—2015年天津地区PM<sub>2.5</sub>质量浓度和能见度资料,开展天津地区重污染天气混合层厚度阈值和相关规律研究。结果表明:2000—2015年期间天津地区混合层厚度呈现波动性逐年增加趋势,与255 m气象塔观测近年天津地区逆温层底升高以及夜间边界层高度增加有较强的一致性。统计显示PM<sub>2.5</sub>日均质量浓度和混合层厚度呈现指数关系,混合层厚度越低PM<sub>2.5</sub>质量浓度越高,其阈值天津地区可以以200、400、600和800 m作为界限判断大气污染垂直扩散能力,当日均混合层厚度<200 m时,天津地区重污染天气出现概率52%,中度以上霾出现概率46%,需要特别关注。PM<sub>2.5</sub>日均质量浓度和混合层厚度的负相关并不适用于所有过程,对于输送型过程由于大气污染的输送一般由高空影响地面,在污染的起始阶段,混合层厚度的增加,反而有利于上层大气污染物向下的传输,使得近地面PM<sub>2.5</sub>质量浓度升高,在运用混合层厚度阈值指标时需要特别考虑。

**关键词:** 天津,混合层厚度,污染天气分析

**中图分类号:** P427,X511

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.006

## Research on Threshold and Regularity of Mixed Layer Thickness in Heavy Pollution Weather in Tianjin

CAI Ziyang<sup>1,2</sup> Zhang Min<sup>1,2</sup> HAN Suqin<sup>2</sup> Li Peiyan<sup>2</sup> Liu Jingle<sup>2</sup> YAO Qing<sup>1,2</sup>

1 Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074

2 Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074

**Abstract:** Based on ceilometers inversion data and simulation data, the dataset of mixed layer thickness in Tianjin were constructed, the data of PM<sub>2.5</sub> mass concentration and visibility in Tianjin during 2009—2015 were collected, and the threshold and regularity of mixed layer thickness in heavy pollution weather in Tianjin were researched in this paper. The results show that the thickness of mixed layer kept increasing during 2000—2015, having a strong consistency with the increase of nocturnal boundary layer height and the increase of inversion base observed by meteorological tower. Statistics show that PM<sub>2.5</sub> mass concentration has exponential relationship with the thickness of mixed layer. The lower the mixed layer thickness, the higher the PM<sub>2.5</sub> mass concentration. The thresholds of mixed layer thickness can be 200 m, 400 m, 600 m and 800 m, which can be used as limits to determine the vertical diffusion of atmospheric pollution. When the thickness of mixed layer is less than 200 m, probability of heavy pollution weather is 52%, and probability of moderate haze is 46%. The negative correlation between PM<sub>2.5</sub> average mass concentration and mixed layer thickness is not applicable to all pollution processes. For the transport of air pollution,

\* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-005和CMAYBY2017-006)、国家科技支撑计划(2014BAC16B04和2014BAC23B01)及天津市气象局课题(201716ybxm10)共同资助

2017年2月27日收稿; 2018年5月22日收修定稿

第一作者:蔡子颖,主要从事大气物理与大气环境方面的研究. Email:120078030@163.com

the impact is from high altitude to ground surface. In the initial stage of pollution, the increase of mixed layer thickness is beneficial to pollutant transmission, causing the near-surface  $PM_{2.5}$  mass concentration to increase, which need to be considered carefully when the threshold of mixed layer thickness is used.

**Key words:** Tianjin, mixed layer thickness, pollution weather analysis

## 引 言

近年来,空气污染日益严重,霾和沙尘天气频繁出现,已严重影响到人民群众的健康,受到各级政府和气象部门的高度关注,党中央、国务院及地方政府把改善空气质量和控制空气污染作为重要任务。国务院于 2013 年 9 月 10 日公布了《大气污染防治行动计划》,力争逐步消除重污染天气,全国空气质量明显改善。经过 3 年努力,全国城市空气质量总体改善, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$  和 CO 年均浓度和超标率逐年下降,大多数城市重污染天数减少。但大气环境面临形势依旧严峻,冬季重污染问题突出,尤其京津冀及周边地区是全国重污染天气高发的地区,占全国重污染总天数 44.1%。为减轻重污染天气影响,确保重污染天气应急高效有序进行,消减污染峰值,降低污染频次,保障公众健康,国务院和各地方政府积极推动重污染天气预警工作开展。中国气象局要求到 2020 年实现重污染天气和霾预警时效提前至 48 h,天津市政府要求市环保局和气象局联合组织开展本市重污染天气监测预警和会商工作。提供本市空气污染物的监测预警及动态趋势分析,提供空气污染气象条件等级预报,大雾、霾和沙尘暴天气监测预警。基于上述的现实需求,重污染天气预报预警成为气象部门重要业务之一。重污染天气的预报技术大致可以分为四类:一是潜势预报技术,如建立 PLAM(parameter linking air-quality to meteorological conditions)指数(Yang et al, 2016),静稳指数以及基于权重指标构建的污染气象等级预报等;二是主观天气分析预报技术,包括污染天气概念模型构建和天气形势场分析(汪靖等, 2015;陈龙等,2016;俞科爱等,2015);三是统计预报技术(熊亚军等,2015;程一帆等,2011;翟晓芳等,2014),如线性回归预报、滑动预报和神经网络预报(朱亚杰等,2016)等;四是数值模式预报技术:如 CMAQ(Community Multiscale Air Quality)模型(邓涛等,2012)、CMAX(Comprehensive Air Quality Model with Extension)模型(薛文博等,2014)、

WRF/Chem(Weather Research and Forecasting model Coupled to Chemistry)模型(徐敬等,2015;赵秀娟等,2016)、CUACE(CMA Unified Atmospheric Chemistry Environment)模型(周春红,2013)和 NAQPMS(Nested Air Quality Prediction Model System)模型(王自发等,2014;潘锦秀等,2016)等。

上述无论哪种重污染预报技术的发展,都离不开对边界层指标的把握,边界层是贴近地球表面、受地面摩擦阻力影响的大气区域,是地气相互作用和大气污染主要发生地,湍流垂直交换是其最显著的特征。作为大气污染主要发生的气层,边界层对大气污染的扩散、积累和反应影响显著。边界层内湍流的强弱(邓雪娇等,2011)直接表征大气污染的垂直混合能力。当湍流较弱时,近地面的大气污染不易向垂直方向混合;边界层内的温度层结与大气污染的扩散能力直接相关(郭丽君等,2015;张人禾等,2014;花丛等,2015);边界层热力和动力结构对近地面水平风也有显著的影响,当大气处于稳定层结时,高空风不易通过湍流切应力传导到地面,往往使得近地面呈现静风特征,不利于大气污染的水平扩散。混合层厚度是边界层分析的重要指标,可作为衡量污染扩散能力的指标之一,反映大气污染物可以达到的混合高度以及大气污染物垂直方向的扩散能力,在重污染天气分析中有重要的指导价值。如蒋伊蓉等(2015)研究显示 2013 年 12 月和 2014 年 2 月两次重污染过程中日平均混合层高度低于 200 m,是形成重污染天气的重要原因;李梦等(2015)基于云高仪反演数据研究显示,2014 年 2 月京津冀区域的北京、天津、石家庄和秦皇岛当混合层低于 800 m 时细颗粒物浓度均会超过  $75 \mu g \cdot m^{-3}$ 。王珊等(2015)对 2013 年 12 月西南一次重污染分析时指出低的混合层厚度抑制了垂直方向上的对流输送,严重削弱了大气垂直扩散能力,造成了大气中各类污染物浓度的大量积聚,是造成此次霾重污染过程的重要原因之一。多数研究普遍揭示混合层厚度与近地面  $PM_{2.5}$  质量浓度的反相关性,但具体到定量影响程度仍不明确,与气象部门在降水指标上积累的经验相比,污染天气分析指标定量化研究仍然

需要进一步加强。

本文通过构建云高仪的反演算法,获取相对准确的混合层厚度监测数据,以此为基础对 WRF/Chem 四种边界层方案进行分析比对,选取最优结果构建天津地区混合层厚度的数据集。收集 2009—2015 年 7 年天津地区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度资料,在大数据样本的基础上,统计分析天津地区污染天气分析中混合层厚度的阈值指标,并结合具体过程探寻构建指标的适用性及需要特别考虑的污染过程,研究结果与天津边界层物理量预报系统结合,为天津市气象局重污染天气预报预警业务提供支撑。

## 1 资料和方法

本文使用资料包括三部分:(1)云高仪监测数据:2015 年 1 月 14 日至 2 月 3 日天津边界层观测站(39.04°N、117.12°E)CL31 云高仪监测数据,其中云高仪直接监测数据为大气后向散射系数,混合层厚度为根据大气后向散射系数廓线反演产品,具体方法见 2.1 节;(2)数值模式模拟输出混合层厚度:模型以 WRF/Chem3.5 版本为核心,气相化学过程采用 CBMZ 机制(José et al, 2015),气溶胶过程采用 MOSAIC 模型(郝子龙等, 2014),主要物理过程设置:积云对流方案采用 GRELL-3D 方案(Lin et al, 2010),微物理过程采用 WSM5 方案,长波辐射方案和短波辐射方案均采用 RRTMG 方案,考虑气溶胶直接辐射反馈,模式水平分辨率为 15 km,水平网格为 121×121,中心经纬度为 39°N、117°E,垂直方向分为 41 层。模式的人为排放源使用清华大学 MEIC(Multi-Resolution Emission Inventory for China)排放源,分辨率为 0.25°×0.25°,气象初始场和背景场均使用 NECP FNL 全球 1°×1°数据,模拟时间为 2000 年 1 月 1 日至 2016 年 10 月 31 日,采用 24 h 滚动计算,每 24 h 重新使用一次 NECP FNL 气象初始场,大气污染初始场为上一次的模拟值,边界层方案采用 YSU(Yonsei-University)方案。在对比测试时,模拟 2015 年 1 月 1 日至 12 月 31 日数据,边界层方案采用 YSU、BouLac(Bougeault and Lacarrere)、MYJ(Mellor-Yamada-Janjic scheme)和 MYNN3(MYNN 3rd level TKE)四种边界层方案,其中 YSU 是非局地 K 理论方案,该方案加入反梯度项表示局地通量,通过理查森数临界值的增大提升稳定边界层的混合过程,边界层

高度由理查森数为 0.25 的临界高度确定。MYJ 方案是一种局地闭合方案,通过湍流闭合方法描述表面层以上的湍流运用,湍流扩散系数依据湍流动能计算,混合层厚度根据湍流动能廓线确定。MYNN3 方案的基本原理是利用 Mellor-Yamada 湍流模式中的预报方程来预测 TKE 和垂直混合能力,从而用来计算湍流摩擦速度和垂直扩散能力。BouLac 方案是在借鉴 TKE 预测技术基础上产生的,2009 年 BouLac 方案引入到 WRF 模式中,主要是为 BEP 模式而设计的,对下垫面的信息更为敏感。(3)近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度监测数据:2014 年 1 月 1 日至 2016 年 10 月 31 日为天津环境监站发布的逐小时 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度监测数据,监测站点 27 个,监测方法采用震荡天平法;2009 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日为中国气象局天津大气边界层观测站(39°06'N、117°10'E,海拔高度 2.2 m,台站编号:54517)逐小时监测数据,监测方法采用震荡天平法,两者数据通过 2014—2016 年 3 年同步观测,进行归一化修正。在文中使用天津地区描述时表示天津地区平均值,天津城区为天津边界层观测站(39.04°N、117.12°E)观测数据。

## 2 分析结果

### 2.1 基于云高仪天津混合层厚度的反演

混合层厚度是指对流边界层的高度,与上层自由大气相比具有较高的湿度和丰富的气溶胶,因此边界层顶处激光信号回波强度往往表现出明显的突变,由此通过查找这个返回信号衰减最快的高度,就可以识别出混合层厚度,并通过连续探测来反演混合层发展的时空变化。选用中国气象局天津大气边界层观测站维萨拉云高仪 CL31,并基于梯度法反演混合层厚度(图 1),梯度法计算见式(1)和式(2)。

$$D[x(z)] = d[X(z)]/d(z) \quad (1)$$

$$H = \min\{D[x(z)]\} \quad (2)$$

式中,云高仪输出的信号  $X(z)$  为经过距离订正的回波信号, $z$  为高度,混合层厚度取负梯度值最大的高度。

为提高数据的信噪比,需要进行时间和空间平均:时间平滑以 8 min 为平滑移动窗口,取 16 min 的数据进行平均空间(高度方向)采用 5 点滑动平均。

### 2.2 中尺度模式不同边界层方案混合层厚度模拟对比

基于 CL31 云高仪数据反演天津城区 2015 年 1 月 14 日至 2 月 3 日的混合层厚度,并采用中尺度模式的四种边界层方案模拟同期相关数据,确定构建天津地区混合层厚度数据集的模拟参数。考虑 CL31 云高仪夜间混合层厚度反演误差较大(低空存有盲区,观测数据易受到干扰),选取白天混合层厚度(每日 09—15 时)作为研究对象。由图 2 显示大部分时段四种边界层方案输出的混合层厚度与云高仪反演的混合层厚度趋势基本一致,并且数值上较为接近,WRF/Chem 模拟输出的混合层厚度可信度

较高。但在具体过程中有所差异,表现比较明显的一是部分时段冷空气影响天气,如 1 月 21 日云高仪反演的混合层厚度要显著高于数值模式输出结果;二是在分布上,09—10 时数值模式输出的混合层厚度普遍低于实况值,午后混合层发展比较旺盛时,数值模式输出值则略低。比对四种边界层方案,2015 年 1 月 14 日至 2 月 2 日监测数据(表 1)反映 YSU 方案模拟值与云高仪反演数据的相关性最高,相关系数达到 0.79,相对误差(29%)最小。如果认为云高仪反演的混合层高度更接近实况值,YSU 方案输出的混合层高度可信度可能更高,而 MYJ 方案作为局地闭合的边界层方案,09—10 时输出的混合层厚度有时显著的偏低于云高仪反演的混合层厚度,

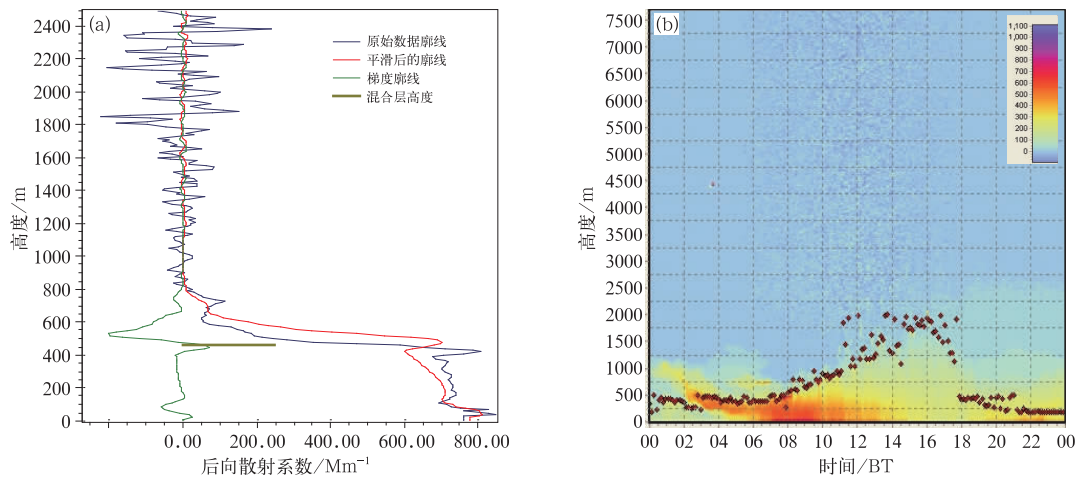


图 1 基于 CL31 云高仪反演的混合层厚度(单位:m)

(a)原始后向散射数据,(b)梯度法反演的混合层厚度

Fig. 1 The mixed layer thickness retrieved by CL31 ceilometers (unit: m)

(a) original backscattering data, (b) mixed layer thickness retrieved with gradient method

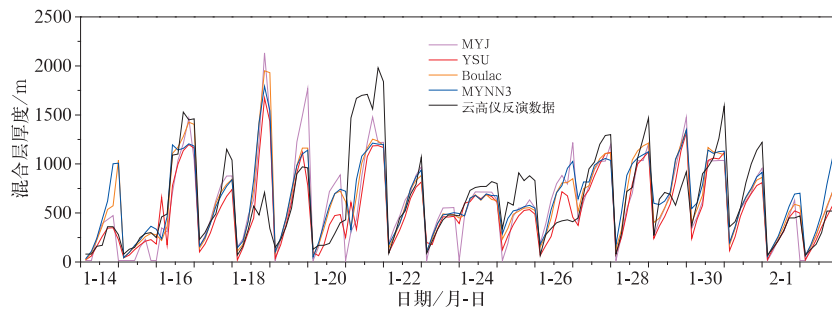


图 2 2015 年 1 月 14 日至 2 月 2 日天津城区 CL31 云高仪反演的混合层厚度和四种边界层方案模拟的混合层厚度趋势变化

(天津边界层观测站:39.04°N、117.12°E)

Fig. 2 The mixed layer thickness retrieved by CL31 ceilometers and the variation of thicknesses simulated by four boundary layer schemes from 14 January to 2 February 2015

(Atmospheric Boundary Observation Station of Tianjin: 39.04°N, 117.12°E)

表 1 不同边界层方案模拟混合层厚度与 CL31 云高仪反演数据比较

Table 1 Comparison of different boundary layer simulation and the CL31 ceilometer retrieved thickness of mixed layer

|        | 相关系数 | 相对误差/% |
|--------|------|--------|
| MYJ    | 0.70 | 35.81  |
| YSU    | 0.79 | 29.26  |
| BouLac | 0.73 | 30.38  |
| MYNN3  | 0.72 | 33.51  |

其数据偏离度在四种边界层方案中也最大,但上述的分析均需要考虑云高仪本身反演混合层厚度的不确定性。

为进一步确定构建天津地区混合层厚度数据集的模式边界层参数方案,基于 WRF/Chem 模型模拟四种边界层方案条件下 2015 年全年(1 月 1 日至 12 月 31 日)数据。图 3 显示  $PM_{2.5}$  日均质量浓度与混合层厚度呈现指数关系,其中 BouLac 方案的混合层厚度与  $PM_{2.5}$  质量浓度相关系数最高,达到 0.64,YSU 方案和 MYJ 方案为 0.62,MYNN3 仅

为 0.50,四种边界层方案模式输出的混合层厚度平均标准偏差 83 m,平均标准偏差为混合层厚度均值的 16%,其中 MYNN3 模拟值最高,为 597 m,MYJ 方案为 533 m,YSU 方案为 501 m,BouLac 方案为 494 m。从日变化规律上分析(图 4),尽管 BouLac 方案模拟的混合层厚度与  $PM_{2.5}$  质量浓度相关系数最高,但其夜间混合层厚度与其他方案相比明显偏低,可信度需要进一步研究。

综合而言,YSU 方案模拟混合层厚度与云高仪反演数据的相关性最高,相对误差最小,其模拟混合层厚度与近地面  $PM_{2.5}$  质量浓度相关系数仅次于 BouLac 方案,与 MYJ 方案持平,但 BouLac 方案夜间混合层厚度与其他方案相比明显偏低,MYJ 方案作为局地闭合的边界层方案,在 09—10 时模拟的混合层厚度有时显著地低于云高仪反演数值,基于上述原因确定基于 YSU 边界层方案进行模拟,建立天津地区混合层厚度数据集,并开展天津地区重污染天气混合层厚度阈值和相关规律的研究。

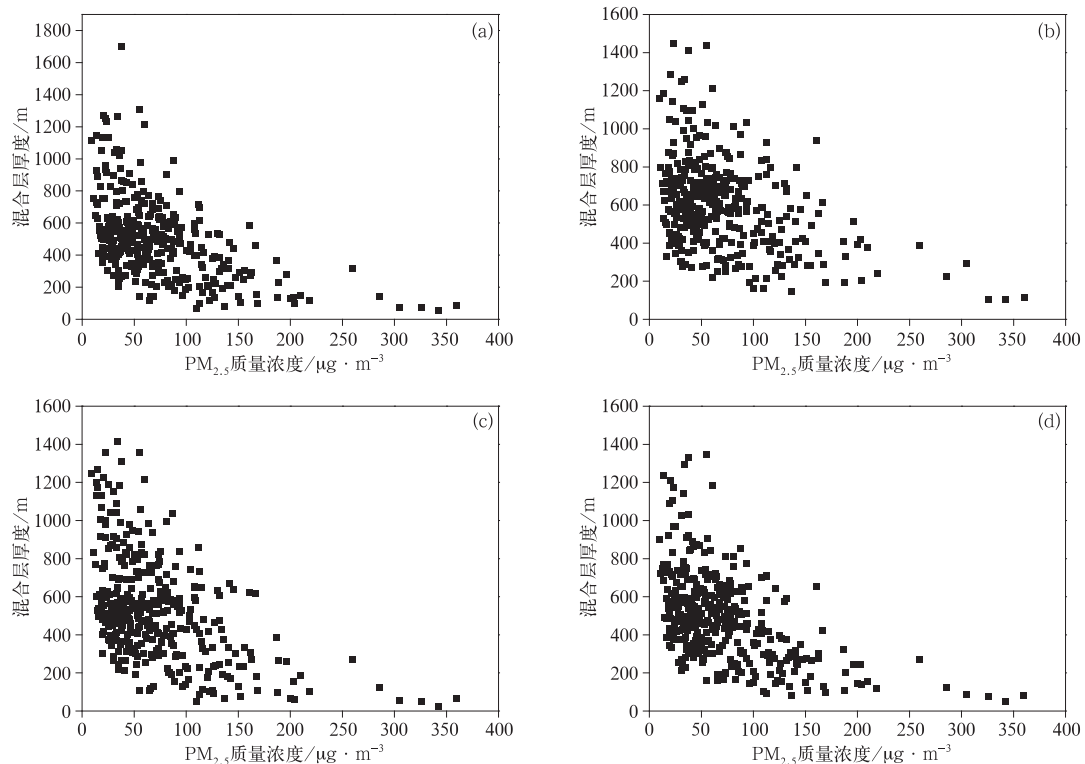


图 3 四种边界层方案下天津地区混合层厚度和  $PM_{2.5}$  质量浓度关系

(a) YSU, (b) MYNN3, (c) MYJ, (d) BouLac

Fig. 3 Relationships between the mixed layer thickness and the  $PM_{2.5}$  mass concentration in Tianjin under four boundary layer schemes

(a) YSU, (b) MYNN3, (c) MYJ, (d) BouLac

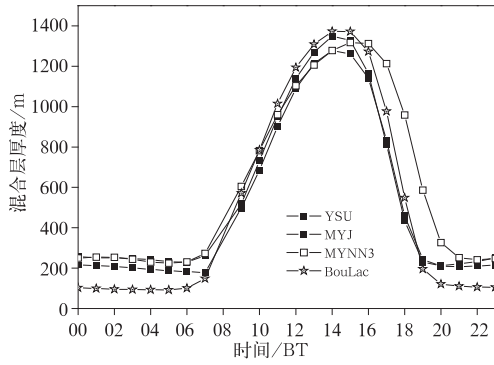


图 4 2015 年全年天津地区在不同边界层方案下的混合层厚度逐时分布  
Fig. 4 Diurnal variation of the mixed layer thickness under different boundary layer schemes in Tianjin in 2015

### 2.3 天津地区边界层高度的演变规律

基于中尺度大气化学模式 WRF/Chem, 并采用

YSU 边界层方案模拟构建天津地区 2000—2015 年混合层厚度数据集。由图 5 显示 2000—2015 年天津地区平均混合层厚度为 476 m, 呈现波动性逐年增加趋势, 2010—2015 年相比 2000—2005 年平均增加 33 m, 其规律与 255 m 气象塔观测的近年天津城区逆温层底升高和夜间边界层高度增加有较强的一致性(图 6)。天津地区混合层厚度在季节分布上呈现出单峰格局(图 5), 4—6 月为峰值, 平均达到 669 m, 7—8 月虽然太阳高度角较高, 但进入天津的雨季, 云量较多, 混合层厚度反而略低于 4—6 月, 平均为 468 m。11 月到次年的 2 月混合层厚度达到全年的谷值, 均值为 317 m, 此时也是天津地区重污染天气最为频发的季节。混合层厚度月际变化与地面太阳辐射呈现高度相关性(相关系数 0.93), 体现出太阳辐射和热力湍流对于混合层厚度月际变化起到的决定性作用。此外混合层厚度还具有明显的日变化规律(图略), 呈现白天高, 夜间低的格局。以 2015 年

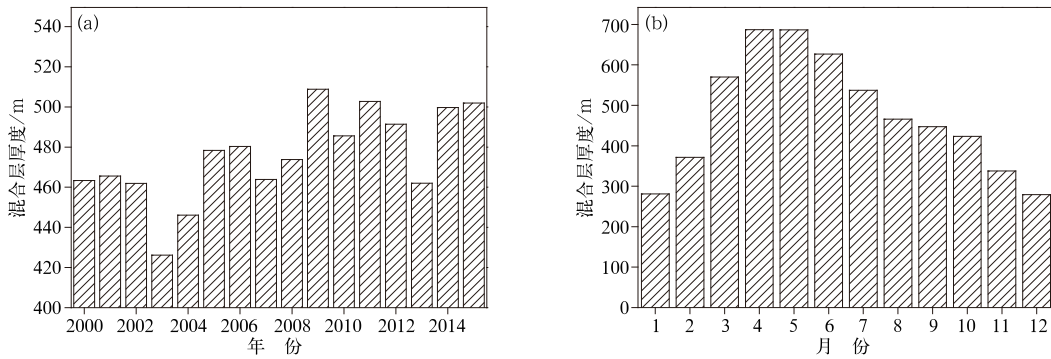


图 5 2000—2015 年天津地区混合层厚度逐年(a)和逐月变化趋势(b)  
Fig. 5 Annual variation (a) and monthly variation (b) of the mixed layer thickness in Tianjin during 2000—2015

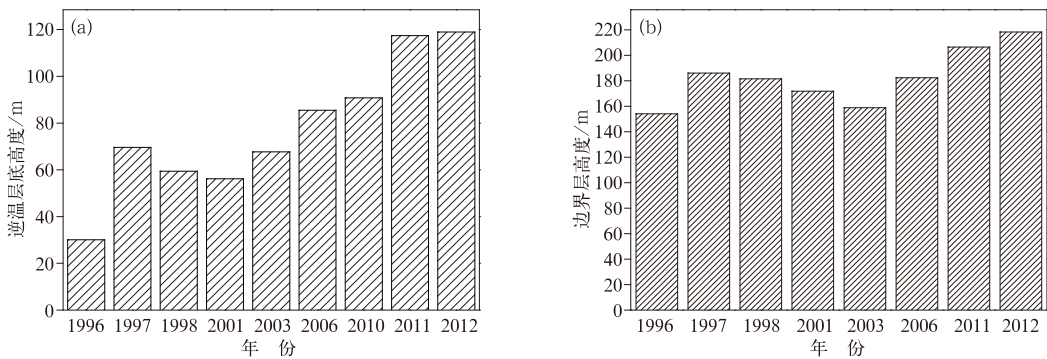


图 6 1996—2012 年天津 255 m 气象塔监测冬季(11 月至次年 2 月)夜间逆温层底高度(a)和边界层高度(b)变化趋势  
(边界层高度超过 250 m 时无法被监测, 则记录为 250 m)

Fig. 6 Diurnal variations of the height of inversion temperature base (a) and the thickness of boundary layer (b) in Tianjin in winters from 1996 to 2012  
(The height of boundary layer above 250 m can't be monitored, recorded as 250 m)

数据为例:2—5月混合层厚度达到日峰值的时间一般为13—14时,1月和6—12月混合层厚度达到日峰值的时间为12—13时,混合层厚度快速发展的时间为12月至次年1月的10—11时,2和11月为09—10时,3—10月在08时前混合层厚度均有一定程度发展;混合层厚度快速降低的时间在11月至次年1月为16—17时,2、9和10月为17—18时,3—8月为18—19时。每年11月至次年2月在工业、交通和生活排放源排放高峰出现后,混合层没有充分发展,不利的垂直扩散条件与污染排放高峰叠加是天津地区大气污染峰值出现在08—11时的重要原因。

### 2.4 混合层厚度与近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度关系和重污染天气普遍阈值

图3清晰地显示了PM<sub>2.5</sub>日均质量浓度和混合层日均厚度呈现指数关系,混合层厚度越低,PM<sub>2.5</sub>

质量浓度越高,且当混合层厚度<300 m后,随着混合层厚度的降低,PM<sub>2.5</sub>质量浓度显著的增加;当达到800 m以上时,随着混合层厚度的增加,PM<sub>2.5</sub>质量浓度的下降较为平缓。为细化上述指标阈值,基于天津地区2009—2016年数据进行统计分析,其中重污染日319 d,中度以上污染日580 d,中度以上霾日236 d,将混合层厚度每100 m划分一档。由图7显示当混合层厚度<100 m时,平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度为211 μg·m<sup>-3</sup>,出现重污染天气概率为67.5%;当混合层厚度≥100 m且<200 m时,平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度是165 μg·m<sup>-3</sup>,出现重污染天气概率49.2%;混合层厚度≥200 m且<300 m时,平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度有显著下降,约为112 μg·m<sup>-3</sup>,出现重污染天气概率23.2%;混合层厚度≥300 m且<400 m时,平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度约为88 μg·m<sup>-3</sup>,出现重污染天气概率已经下降到10.9%。由此显示重污染天气混合层厚度分析阈值应该在200 m

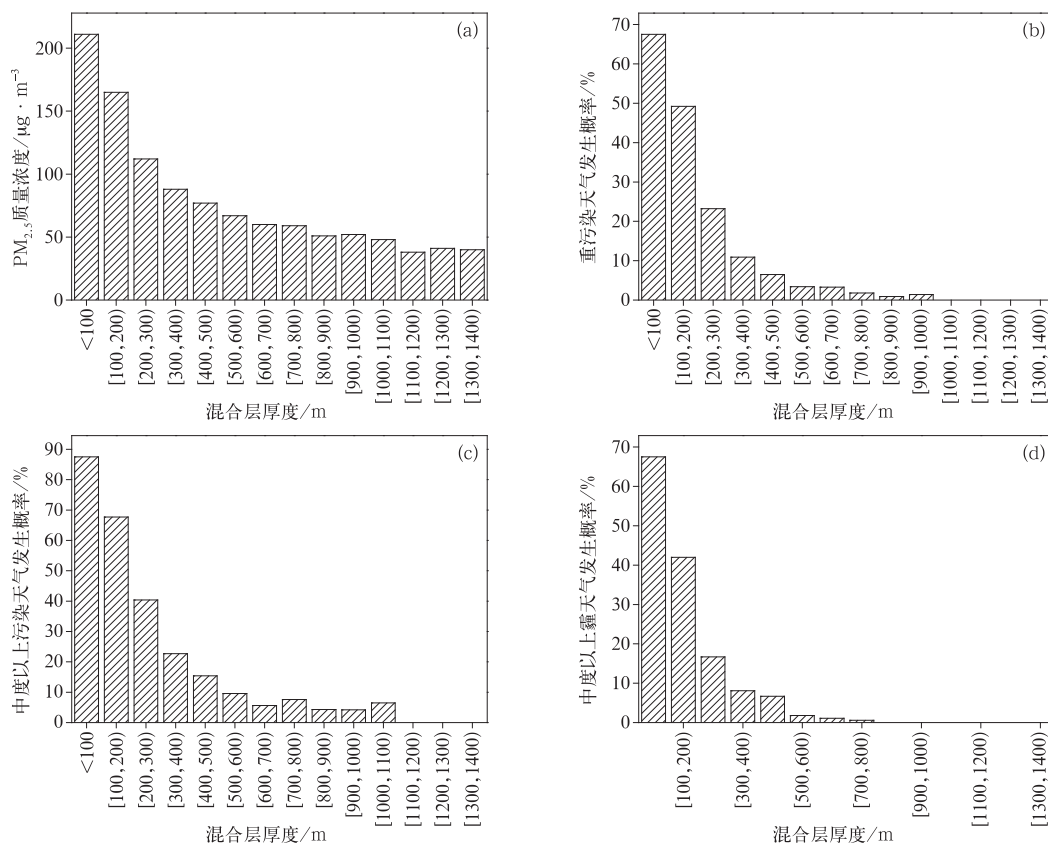


图7 天津地区混合层厚度与PM<sub>2.5</sub>质量浓度(a),重污染天气发生概率(b),中度以上污染发生概率(c)和中度以上霾发生概率(d)之间的关系

Fig. 7 Relationships between the mixed layer thickness and the PM<sub>2.5</sub> mass concentration (a), probability of heavy pollution (b), probability of moderate pollution (c) and probability of moderate haze (d) in Tianjin

表 2 天津地区混合层厚度分布与近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的关系

| 混合层厚度/m   | <200     | [200,400) | [400,600) | [600,800) | ≥800       | 均值(500) |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|
| 描述  | 不利于污染物扩散 | 较不利于污染物扩散 | 扩散条件一般    | 较有利于污染物扩散 | 非常有利于污染物扩散 |         |
| PM <sub>2.5</sub> 质量浓度<br>/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | 173      | 98        | 73        | 60        | 48         | 84      |

左右,约为冬季平均混合层厚度的 60%,即在分析中可以认为当混合层厚度<200 m时,垂直扩散条件极度不利于污染物扩散,易形成重污染天气。从 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度分析,2009—2016 年天津均值为  $83 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,对应图 7 混合层厚度  $\geq 400$  m 且  $< 500$  m,此时中度以上污染发生概率 15.4%,略低于中度以上污染发生的平均概率,当混合层厚度  $\geq 300$  m 且  $< 400$  m 时,PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度为  $88 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,中度以上污染发生概率 22.1%。基于上述分析可以初步认为当混合层厚度  $\geq 200$  m 且  $< 400$  m 时,垂直扩散较不利于污染物扩散,而当混合层厚度  $\geq 500$  m 且  $< 600$  m 时,相比 400~500 m 时的情况,无论平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度还是中度以上污染发生的概率变化都是平缓的,在混合层厚度  $\geq 400$  m 且  $< 600$  m 时,垂直扩散条件一般。当混合层厚度  $\geq 600$  m 且  $< 700$  m 时,以及  $\geq 700$  m 且  $< 800$  m 时,对应的 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度仅为均值的 72%,可以认为此时污染的垂直扩散条件较有利于污染物扩散,当混合层厚度  $\geq 800$  m 以后随着混合层厚度增加,PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度未见显著变化,且均无中度以上霾发生,可以认为垂直扩散条件非常有利于污染物扩散。上述统计使用 6 年数据样本,较为充分地体现混合层厚度对近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度影响,在预报分析中可借鉴表 2 分析判断混合层厚度对近地面 PM<sub>2.5</sub> 的扩散和稀释作用。

### 3 结论与讨论

上述研究的基于 WRF/Chem3.5 构建天津边界层物理量预报系统,每日短期提供 0~96 h 逐小时预报,中长期提供 0~10 d 逐日的物理量预报产品,混合层厚度是其重要产品之一。其运用基本可遵循混合层厚度与近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈现指数变化关系,随着混合层厚度的减小近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度呈现增加趋势的规律,并以 200、400、600 和 800 m 作为阈值划线,判断混合层厚度反映的垂直

扩散条件是否有利于近地面细颗粒物的稀释和扩散。该规律可以普遍适用于天津主要的细颗粒污染物过程,但对于输送型污染则反之。

华北平原每年的 10 月至 11 月初以及 2—3 月易形成持续入海高压后部的连续污染天气,此时尚未进入深冬季节,气象扩散条件在平原地区转向不利于污染物扩散(即扩散较慢),但太行山前背风坡区域风速明显小于平原,夜间逆温频繁出现于平原地区,往往在重污染天气初始阶段,先于平原地区出现重度甚至严重污染天气。在重污染天气的开始阶段,西南气流使得大气污染气团有自南向北输送的特征。由于大气污染的输送一般由高空影响地面,所以当夜间边界层未打开时,高空易形成高污染区(图 8),但在近地面空气质量却相对清洁,类似高架源在稳定层结中的扩散(扇形)。直到白天边界层不断发展,上下层充分混合,近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度持续升高,类似高架源在不稳定层结中的扩散(环形)。在此类过程中近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与混合层厚度呈现正相关,使用混合层厚度阈值判断 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化趋势时需要特别考虑输送型污染过程与一般污染的过程的差异,如 2014 年 10 月 6—11 日(图 9)。具体结论如下:

(1) 2000—2015 年天津地区平均混合层厚度为 476 m,呈现波动性逐年增加趋势,2010—2015 年相比 2000—2005 年平均增加 33 m,与 255 m 气象塔观测的近年天津地区逆温层底升高和夜间边界层高度增加有较强的一致性。统计数据表明 PM<sub>2.5</sub> 日均质量浓度和混合层日均厚度呈现指数关系,混合层厚度越低 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度越高,在天津地区污染天气分析时,可以以混合层厚度 200、400、600 和 800 m 作为阈值判断大气污染垂直扩散能力,当日均混合层厚度  $< 200$  m 时,天津地区重污染天气出现概率 52%,中度以上霾出现概率 46%。

(2) 输送型污染相比一般积累型的大气污染过程,在混合层厚度阈值运用时需要特别考虑,由于大气污染的输送一般由高空影响地面,所以当夜间边



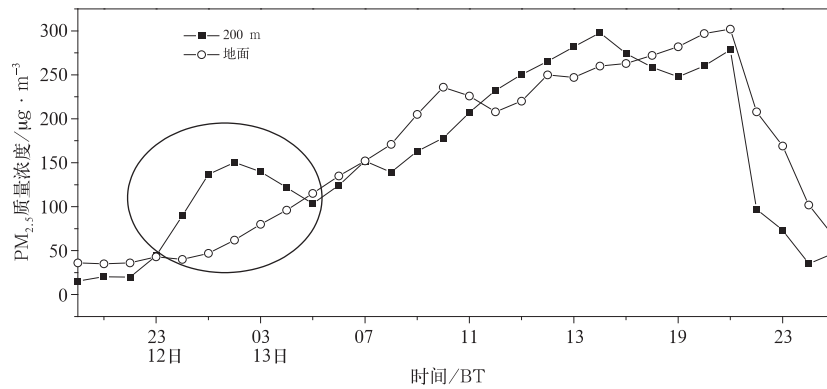


图 8 2016 年 10 月 13 日 255 m 气象塔监测的 200 m 和地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化

(输送型污染前期夜间高空 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度显著高于地面)

Fig. 8 Changes of surface PM<sub>2.5</sub> mass concentration and 200 m height at 255 m Tianjin Tower Tianjin on 13 October 2016

(Before the transport of air pollution, high-level PM<sub>2.5</sub> mass concentration over night is higher than that on the surface)

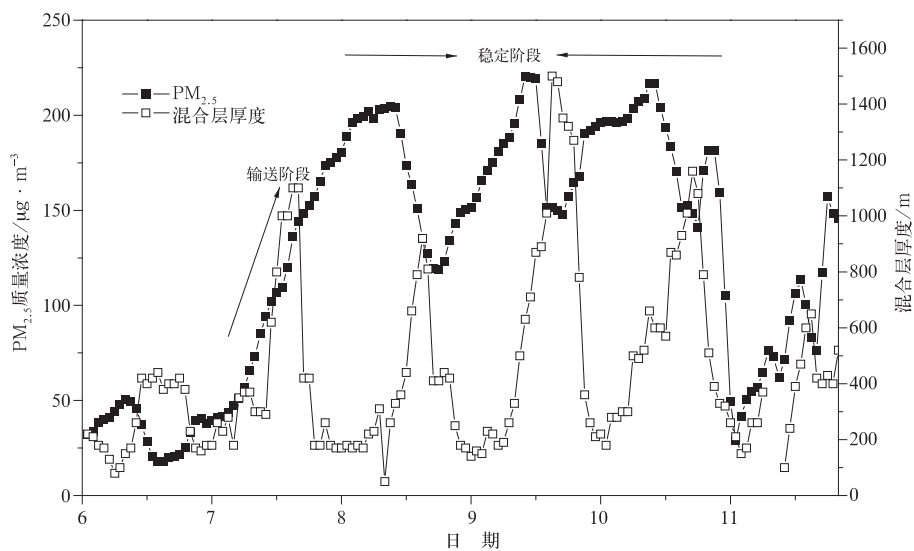


图 9 2014 年 10 月 6—11 日天津城区混合层厚度与近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度演变趋势

Fig. 9 Changing trends of mixed layer thickness and near-surface PM<sub>2.5</sub> mass concentration in Tianjin during 6—11 October 2014

界层未打开时,高空易形成高污染区,近地面空气质量却相对清洁,类似高架源在稳定层结中的扩散。直到白天边界层不断发展,上下层充分混合,近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度持续升高,类似高架源在不稳定层结中的扩散。此类过程中近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与混合层厚度呈现正相关,直到上下游大气污染浓度差基本消除,近地面 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与混合层厚度恢复负相关。

(3) 从云高仪反演的混合层厚度分析,基于数值模式和 YSU 方案构建的混合层厚度数据趋势合理,数值接近,可以为预报员在污染天气分析预报中提供参考。

参考文献

陈龙,智协飞,覃军,等,2016. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象,42(7):819-826.

- 程一帆,张兰慧,尚可政,等,2011.兰州市冬季霾的统计预报研究[J].中国沙漠,31(3):750-756.
- 邓涛,邓雪娇,吴兑,等,2012.珠三角灰霾数值预报模式与业务运行评估[J].气象科技进展,2(6):38-44.
- 邓雪娇,李菲,吴兑,等,2011.广州地区典型清洁与污染过程的大气湍流与物质交换特征[J].中国环境科学,31(9):1424-1430.
- 郭丽君,郭学良,方春刚,等,2015.华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析[J].中国科学:地球科学,45(4):427-443.
- 郝子龙,蔡恒明,王慧鹏,等,2014.面向 WRF/Chem 模式 MOSAIC 气溶胶方案的资料同化实现[J].气象水文海洋仪器,31(4):1-6.
- 花丛,张碧辉,张恒德,2015.2013年1—2月华北雾、霾天气边界层特征对比分析[J].气象,41(9):1141-1151.
- 蒋伊蓉,朱蓉,朱克云,等,2015.京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,35(9):2681-2692.
- 李梦,唐贵谦,黄俊,等,2015.京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J].环境科学,36(6):1935-1943.
- 潘锦秀,朱彬,晏平仲,等,2016.京津冀区域重污染天气过程数值预报评估新方法[J].环境科学学报,36(8):2752-2760.
- 汪靖,张晓云,蔡子颖,等,2015.天津一次重污染天气过程气象成因及预报分析[J].环境科学与技术,38(12):77-82,157.
- 王珊,廖婷婷,王莉莉,等,2015.西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J].环境科学学报,35(11):3452-3462.
- 王自发,李杰,王哲,等,2014.2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J].中国科学:地球科学,44(1):3-14.
- 熊亚军,廖晓农,李梓铭,等,2015.KNN数据挖掘算法在北京地区霾等级预报中的应用[J].气象,41(1):98-104.
- 徐敬,马志强,赵秀娟,等,2015.边界层方案对华北低层 O<sub>3</sub> 垂直分布模拟的影响[J].应用气象学报,26(5):567-577.
- 薛文博,付飞,王金南,等,2014.基于全国城市 PM<sub>2.5</sub> 达标约束的大气环境容量模拟[J].中国环境科学,34(10):2490-2496.
- 俞科爱,胡晓,黄旋旋,等,2015.宁波区域霾过程的天气分型及环流场特征[J].气象,41(12):1514-1524.
- 翟晓芳,龙洋,肖志峰,2014.武汉市灰霾天气特征分析及基于支持向量机的能见度预报[J].长江流域资源与环境,23(12):1754-1761.
- 张人禾,李强,张若楠,2014.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,44(1):27-36.
- 赵秀娟,徐敬,张自银,等,2016.北京区域环境气象数值预报系统及 PM<sub>2.5</sub> 预报检验[J].应用气象学报,27(2):160-172.
- 周春红,2013.大气气溶胶及其对云和降水影响的在线数值模拟研究[D].北京:中国气象科学研究院:1-30.
- 朱亚杰,李琦,侯俊雄,等,2016.基于支持向量回归的 PM<sub>2.5</sub> 浓度实时预报[J].测绘科学,41(1):12-17,22.
- José R S, Pérez J L, Balzarini A, et al, 2015. Sensitivity of feedback effects in CBMZ/MOSAIC chemical mechanism[J]. Atmos Environ, 115: 646-656.
- Lin M, Holloway T, Carmichael G R, et al, 2010. Quantifying pollution inflow and outflow over East Asia in spring with regional and global models[J]. Atmos Chem Phys, 10(9): 4221-4239.
- Yang Y Q, Wang J Z, Gong S L, et al, 2016. PLAM-a meteorological pollution index for air quality and its applications in fog-haze forecasts in North China[J]. Atmos Chem Phys, 16(3): 1353-1364.