贺园园, 胡非, 刘郁珏, 等. 2019. 北京地区一次 PM2.5 重污染过程的边界层特征分析 [J]. 气候与环境研究，24 (1): 61−72. He Yuanyuan, Hu Fei, Liu Yujue, et al. 2019. Boundary layer characteristics during a heavy PM2.5 pollution process in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (1): 61−72, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18057.

北京地区一次 PM2.5 重污染过程的边界层特征分析

贺园园[1, 2]　胡非[1, 2]　刘郁珏[3]　刘磊[1]

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与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 中国气象局北京城市气象研究所，北京 100089

摘　要　利用北京市环境保护监测中心和美国大使馆的细颗粒物（PM2.5）逐时监测数据，中国科学院大气物理研究所 325 m 气象梯度塔资料以及实况天气图和探空资料，对 2015 年 11 月 27 日至 12 月 1 日北京的 PM2.5 重污染过程的边界层特征进行了分析。研究发现：这次重污染过程持续时间长、强度大，其中 PM2.5 浓度超过 75 μg/m^3 的时次共计 126 h，超过 150 μg/m^3 共计 116 h，小时最高 PM2.5 浓度为 522 μg/m^3。在高低空环流场配置的影响下，近地面静风和多层逆温结构抑制了污染物在水平和垂直方向上的输送，加上边界层内的深厚湿层，使得其中气溶胶不断吸湿增长，高 PM2.5 浓度得以维持。在重污染期间，湍流动能较低，不利于污染物的水平和垂直扩散。垂直方向的湍流动能一直占水平方向的 15%～20%左右，水平湍流动能占主要贡献。摩擦速度与湍流动能呈现出相似的变化趋势，不同高度之间的摩擦速度差别不大。超出前后时次一个数量级的湍流强度尖峰的出现是湍流场发生调整的一个信号，是 PM2.5 浓度发生剧烈转变的前兆，预示着污染状况更加糟糕。重污染过程中感热通量的输送方向为从地面向大气输送，感热通量和潜热通量都大幅减少，并且表现出明显的日变化特征。对湍流功率谱计算和分析表明，在重污染过程期间，时间尺度为 5 min 至 6 h 的中尺度过程对从地面到大气方向的动量和热量通量输送做出了重要贡献。

关键词　重污染　细颗粒物（PM2.5）　大气边界层　大气湍流　中尺度通量　动量通量　热通量
文章编号　1006-9585（2019）01-0061-12　　**中图分类号**　P402　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18057

Boundary Layer Characteristics during a Heavy PM2.5 Pollution Process in Beijing

HE Yuannyuan[1, 2], HU Fei[1, 2], LIU Yujue[3], and LIU Lei[1]

1 *State Key Laboratory of Atmosperic Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Institute of Urban Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100089

Abstract　Based on hourly PM2.5 monitoring data from Beijing Environmental Protection Monitoring Center and the U.S. Embassy, the 325 m gradient tower data from the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences,

收稿日期　2018-04-23；**网络预出版日期**　2018-06-07
作者简介　贺园园，女，1993 年出生，硕士研究生，主要从事大气边界层和大气环境方向研究。E-mail: heyuanyuan@mail.iap.ac.cn
通讯作者　胡非，E-mail: hufei@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划项目 2017YFC0209605、2016YFC0208802，国家自然科学基金项目 41705006
Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grants 2017YFC0209605 and 2016YFC0208802), National Natural Science Foundation of China (Grant 41705006)

the synoptic charts and sounding data, the atmospheric boundary layer characteristics during the heavy PM2.5 pollution period from 27 Nov to 1 Dec 2015 are analyzed. The results show that this heavy pollution process was persistent and severe, since the duration of ρ(PM2.5) exceeding 75 μg/m^3 was 126 hours in total and the duration of ρ(PM2.5) exceeding 150 μg/m^3 was 116 hours in total. The maximum hourly ρ(PM2.5) was up to 522 μg/m^3. Under the influence of the weather situation, light winds prevailed in the near-surface layer with multi-layer inverse temperature structure, which inhibited both the horizontal and vertical transport and dispersion of pollutants. In addition, a thick wet layer developed in the boundary layer, in which the aerosols kept absorbing moisture and grew up. As a result, high ρ(PM2.5) concentration maintained during the pollution process. The turbulent kinetic energy was relatively small during the heavy pollution process, which was not conducive to the dispersion of pollutants. Note that horizontal turbulent kinetic energy accounted for the major part of the total turbulent kinetic energy, and the turbulent kinetic energy in the vertical direction was only about 15%−20% of that in the horizontal direction. Friction velocities at different heights exhibited the same characteristics as turbulent kinetic energy. The occurrence of two turbulence intensity spikes was a sign of turbulent flow adjustment and a precursor to the sharp shift in PM2.5 concentration, and the air quality would become worse. During the process of heavy pollution, the sensible heat flux was transported from the ground to the atmosphere; both sensible and latent heat fluxes significantly reduced compared with that in the non-polluting moment and exhibited distinct diurnal changes. Power spectral analysis and calculations show that during the heavy pollution process, mesoscale processes on time scales from 5 min to 6 h made important contributions to the transfer of momentum and heat fluxes from the surface to the atmosphere.

Keywords Heavy air pollution, PM2.5, Planetary boundary layer, Atmospheric turbulence, Mesoscale flux, Momentum flux, Heat flux

1 引言

近年来，细颗粒物（PM2.5）重污染过程的频发及其对健康的影响引发了社会极大关注。PM2.5 重污染过程不仅使能见度降低，影响陆海空交通；而且区域性的霾污染波及的空间范围更广，对气候、生态环境和人体健康产生深远的影响（胡非等，2003；Chen et al.，2017）。北京市作为我国的首都，其严重的 PM2.5 污染受到国内外的高度关注。研究发现，大尺度环流形势可以影响污染物的生成、积累和清除，同时也是影响气溶胶区域输送的重要外部条件（Greene et al.，1999；任阵海等，2004）。Wu et al.（2017）指出，区域性持续污染事件大多发生在纬向西风气流型或者高压脊型两种环流形势下，而北京的多次重污染过程都与这两种环流配置密切相关（陈朝晖等，2007；张人禾等，2014；尉鹏等；2015）。PM2.5 污染过程与低风速、高湿度和低能见度等近地面气象要素紧密相关（王跃等，2014；吴萍等，2016）。Tang et al.(2015)指出与高湿环境有关的物理化学过程是重污染背景下大气颗粒物的主要来源。

薛亦峰等（2016）利用模式研究发现，重污染橙色预警的限排措施能使污染程度有效减轻，但限排与污染减轻并不是简单的线性关系，污染物与大气边界层之间存在着复杂的相互作用。大气边界层对大气污染十分重要。大气气溶胶的主要人为源和自然源都来自于边界层，形成二次污染物的光化学过程也发生在边界层内（缪育聪等，2015）。雾霾形成之后，会使更多的太阳辐射反射回空间，使到达地面的辐射减少，地表热通量下降，湍流活动减弱，混合层高度降低，大气层结稳定度增加，污染物和水汽集中在几百米厚的边界层中，气溶胶粒子进一步在近地层大气中集聚、凝结、并形成更多的云雾滴，造成污染物的大量堆积（张小曳等，2013；Quan et al.，2013）。边界层中湍流无处不在，湍流是边界层最重要的特征。污染期间近地层层结稳定，小风、湍流弱的持续维持是导致污染物的积聚而形成污染的原因之一（周明煜等，2005；邓雪娇等，2011）。湍流在对污染物的扩散和稀释方面扮演着重要角色（雷孝恩，1977；张舒婷等，2017）。

为了揭示发生 PM2.5 重污染过程的大气边界层结构和演变特征，尤其是湍流场的特征，为揭示雾霾污染的形成机理、空气污染预警、改进大气污染模式和治理大气污染提供科学参考，本文以北京 2015 年 11 月 27 日至 12 月 1 日 PM2.5 重污染的典型持续性过程为研究对象，利用北京市环境保护监测中心和美国大使馆的 PM2.5 逐时监测数据，中国科学院大气物理研究所 325 m 气象梯度塔资料、韩国气象厅实况天气图及北京气象局南郊观象台探空资料，对这次重污染过程发生的天气形势、近地面气象要素场、湍流对污染物的扩散作用以及动量通量的多尺度输送特

征进行分析。已有的工作主要集中在天气过程以及相伴随的风温湿气象要素变化在重污染生消中的作用，对重污染过程中湍流扮演的角色研究较少。本文通过对湍流动能、湍流强度等湍流特征量的分析，重点探究了湍流扩散对污染物浓度的影响，以及污染过程中湍流尺度的运动对动量和热量通量的输送作用。此外，本文通过功率谱分析和计算，发现了时间尺度为 5 min 至 6 h 的中尺度过程在重污染期间动量和热量通量输送中发挥了重要作用。

2 资料和方法

本文所采用的 PM2.5 监测数据来自北京市环境保护监测中心发布的 PM2.5 逐小时监测数据（http://www.bjmemc.com.cn/ [2015-12-03]），共 35 个监测点，覆盖北京市所有区县，包括 23 个城市环境评价点（如天坛站、奥体中心站、怀柔站等），1 个城市清洁对照点（定陵站），6 个区域背景传输点（包括京南站、京东北站等）和 5 个交通污染控制点（包括永定门站、西直门站等）以及美国大使馆（39.95°N，116.47°E）发布的 PM2.5 逐小时监测数据（http://www.stateair.net/web/historical/1/1.html/[2015-12-03]）。北京市环境保护监测中心发布的 PM2.5 逐小时监测数据 24 h 连续采样，采用微量振荡天平法，所用仪器为 Thermo 1405F 系列仪器（程念亮等，2015），设备经过定期检查和维护，数据资料的可靠性在之前的诸多研究工作中得到使用和验证（王跃等，2014；薛亦峰等，2016；侯梦玲等，2017）。图 1 是 2015 年 11～12 月奥体中心站和 36 个测站平均后获得的逐小时的 PM2.5 浓度[记为 ρ(PM2.5)]。绝大部分的点位于直线 $y=x$ 附近，这说明各测站 ρ(PM2.5)及其变化趋势基本一致，因此，本研究使用 36 个测站平均值来表征北京市 ρ(PM2.5)的整体涨落情况。

本文采用的气象要素数据来自中国科学院大气物理研究所 325 m 气象梯度塔（39.97°N，116.37°E，海拔高度 49 m），气象塔与 36 个环境监测站中的奥体中心站直线距离仅有 2 km。梯度塔资料包括 15 层风、温、湿梯度观测资料（8、15、32、47、63、80、102、120、140、160、180、200、240、280 和 320 m 高度处），包括风速（美国 MetOne 公司 010C 风速传感器）、风向（美国 MetOne 公司 020C 风向传感器）、温度和湿度（瑞士 Rotronic 公司 HC2-S3 温湿度传感器），时间分辨率为 20 s 一组。7 层超声资料（8、16、47、80、140、200 和 280 m 高度处），包括三维超声风速仪（美国 Campbell 公司 Model CAST-3 三维超声风速仪）测得的 u、v、w 三维超声风速以及温度 T 和开路快速响应红外水汽-CO_2（美国 Li-Cor 公司 IRGA，Model Li-7500 仪器）测得的水汽浓度，采样频率均为 10 Hz。大气物理研究所 325 m 气象塔的 7 层湍流数据，绝大部分低频信号的时间周期都在 30 min 以上（刘郁珏等，2016），因此本文以 30 min 作为时间周期来处理气象塔的湍流数据。针对尘粒等对光传感器的干扰造成的野点、仪器不是绝对水平固定、考虑水汽等情况，参考徐自为等（2008）的工作，进行了物理合理性及仪器有效范围判断、去除野点、二次坐标旋转，频率响应修正、超声虚温修正等数据预处理工作，数据通过湍流稳定性检验。

除此之外，本文使用的资料还包括来自北京南郊气象台（54511 站，39.8°N，116.47°E，海拔高度 31.3 m）逐日 00:00（协调世界时，下同）和 12:00 观测获得的气压、位势高度、温度、露点温度和风向风速等气象要素探空资料（http://weather.uwyo.edu/upperair/seasia.html/[2015-12-03]）以及来自韩国气象厅的天气图资料（http://web.kma.go.kr/eng/weather/images/analysischart.jsp/[2015-12-03]）。

3 结果和分析

3.1 重污染过程回顾及大气环流分析

2015 年 11 月 27 日至 12 月 1 日，华北地区出现重度 PM2.5 污染天气，包括北京、河北中南部、天津、河南北部、山东西北部等地，也是 2015 年最严重的一次雾霾天气过程（廖要明等，2016），此次过程范围大、强度强、持续时间长。对北京而言，整个污染过程持续 5 d，期间无降水过程，ρ(PM2.5)超过 75 μg/m^3 的时次共计 126 h，超过 150 μg/m^3 的时次共计 116 h。11 月 27 日凌晨 ρ(PM2.5)迅速升高超过 150 μg/m^3，其后两天一直稳定在 260 μg/m^3 左右，11 月 29 日 10:00，北京市空气重污染应急指挥部发布了年内第一个空气重污染橙色预警，在 11 月 30 日 ρ(PM2.5)经历短暂的下降之后，又迅速升高超过 500 μg/m^3，之后 ρ(PM2.5)维持在高水平，其中 30 日北京琉璃河站 ρ(PM2.5)达到了 976 μg/m^3（沈晓琳和何立富，2016）。直到

12 月 2 日 00:00 左右迅速下降至 50 μg/m^3 以下，污染过程结束（王郭臣等，2016）。重污染过程中 ρ(PM2.5)在整体上升的趋势上，叠加了小幅的日变化，并且经历了两次快速上升的过程，第一次是 11 月 26 日 15:00 至 27 日 21:00，ρ(PM2.5)从 18 μg/m^3 迅速上升到 293 μg/m^3；第二次是 11 月 30 日 06:00 至 18:00，12 h 内 ρ(PM2.5) 从污染水平已经很高的 132 μg/m^3 急速上升到 522 μg/m^3，超过 75 μg/m^3 的标准将近 6 倍（见图 2）。

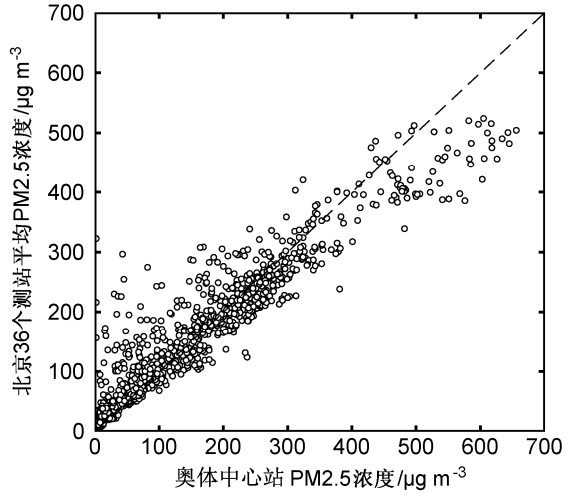

图 1 2015 年 11～12 月奥体中心站逐时 PM2.5 浓度与北京 36 测站均值[记为 ρ(PM2.5)]的对比

Fig. 1 Comparison of hourly PM2.5 concentration in the Olympic Sports Center station and the average concentration at 36 stations of Beijing ρ(PM2.5) during Nov−Dec 2015

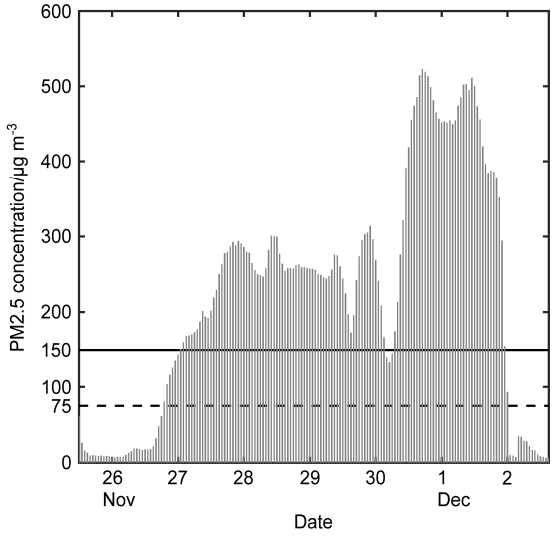

图 2 2015 年 11 月 26 日至 12 月 2 日北京 ρ(PM2.5)随时间的变化。实线表示 ρ(PM2.5)为 150 μg/m^3，虚线表示 ρ(PM2.5)为 75 μg/m^3

Fig. 2 Variation of ρ(PM2.5) in Beijing during 26 Nov−2 Dec 2015. Solid line shows $\rho(PM_{2.5})$ equals 150 μg/m^3 and dashed line shows ρ(PM2.5) equals 75 μg/m^3

从 500 hPa 的天气图上分析，北京地区 11 月 26 日 08:00 由北风转变为平直的西风气流，之后一直保持着偏西或者西北气流（图略），稳定平直的偏西气流不利于南北方向的动量和能量的交换；850 hPa 有暖脊的存在，从 11 月 27 日 20:00 到 12 月 1 日 08:00，暖平流维持，这有利于逆温结构的生成和维持。850 hPa 风速较小，垂直方向以下沉气流为主，有利于污染物累积。地面气压场来看，11 月 27 日 02:00，地面呈现鞍型的气压场配置，均压控制时间长范围大，地面和低空风速较小，造成气溶胶颗粒物严重累积；与此同时，北京同纬度（40°N 左右）的日本海上有台风；受台风阻挡，高压中心持续增强滞留，北京位于高压底部和后部。随后高压东移入海，西侧新生高压东移，29 日 11:00，北京位于新生东移高压前缘，偏北风使污染物出现了小范围浓度的消散；随着高压系统继续向东南方向移动，20:00，北京又出现在高压底部类似的位置，污染物浓度重新积累；30 日 02:00，偏弱冷锋过境使 ρ(PM2.5)短暂下降，但冷空气太弱，至 08:00 北京高空又重新受高压控制，地面转为均压，大气水平和垂直扩散条件较差，再加上积雪融化，造成边界层底层保持较厚的高湿层，气溶胶粒子发生了二次转化，促进浓度升高。12 月 1 日 02:00 北京地区高空有弱短波槽过境，850 hPa 位于低涡底部，地面受低压影响，湿度继续增强，扩散条件进一步转差，ρ(PM2.5)达到峰值。直至 12 月 1 日 20:00，850 hPa 以上有明显强冷平流过境，北京位于冷高压前部，地面风力较大，使得 ρ(PM2.5)快速下降，空气质量恢复到优良水平。

3.2 近地面气象要素场

图 3 是重污染期间 ρ(PM2.5)与近地面常规气象要素温度和相对湿度时间序列演变曲线以及风速随时间和高度变化的填色图。由于 32 m 高度及以下可认为处于城市冠层以内（彭珍和胡非，2006），受气象塔周围的局地环境影响较大，因此图 3 时间序列曲线图中选用 47 m 高度数据用于表征地表信息。11 月 26 日污染爆发前，ρ(PM2.5)为 33.13 μg/m^3，不同高度相对湿度相差不大，大约为 40%；26 日傍晚以后，ρ(PM2.5)迅速增长；27 日 00:00，ρ(PM2.5)已达到 134 μg/m^3，水汽也有了迅速增长，从地面到最高层 320 m 处整层的相对湿度均超过了 54%；8 m 高度处的风速为 0.99 m/s，这种小风情况下污染物无法通过平流扩散到远处，而高湿度环境有利于细

粒子的吸湿增长。

11 月 26 日 15:00 至 27 日 21:00，ρ(PM2.5)经历了一次快速增长过程，由 18 μg/m^3 突升到 293 μg/m^3；在这个时间段内，47 m 高度处的相对湿度从 31%到 59%，提高了近一倍。图 4 是 11 月 26 日至 12 月 2 日每日 08:00 的温度和湿度廓线。11 月 27 日，600～800 m 高度存在等温层，1200～1400 m 高度处也存在逆温层。这样多层逆温结构使大气垂直方向扩散能力大大削弱，污染物聚集在近地面附近，加之高的水汽含量使较细小颗粒物吸湿增长，污染物不断积累。

11 月 29 日 10:00，ρ(PM2.5) 在维持高水平之后开始小幅度的下降，从 275 μg/m^3 下降到 197 μg/m^3（29 日 15:00），整层相对湿度的下降较之提前 3 h，并且出现风速的大值区，从最高层逐渐下传。小幅下降后，ρ(PM2.5)在 30 日迎来了第二次爆发增长，12 h 内 ρ(PM2.5)迅速上升到 522 μg/m^3，超过 75 μg/m^3 的标准将近 6 倍。从这时起一直到 12 月 1 日 22:00 ρ(PM2.5)都维持在 300 μg/m^3 之上，相对湿度在 85%之上，整层风速为 1～2 m/s。从温湿廓线来看，30 日 08:00 存在着 500 m 厚的贴地逆温，1600～1900 m 高度处也存在着逆温层；12 月 1 日，1200～1800 m 存在着深厚的逆温层。11 月 29 日至 12 月 1 日这三天，地面相对湿度都达到了 90%以上，12 月 1 日地面相对湿度更是达到了 100%，近地面 1500 m 高度的范围内相对湿度都达到了 90%以上。逆温层的存在不利于污染物的扩散，逆温与底层高湿区的配合使颗粒物吸湿增长，地面静风，水平扩散条件也不好，ρ(PM2.5)一直维持着很高的状态。12 月 1 日 22:00 的 ρ(PM2.5)为 351 μg/m^3，然后突然下降，4 h 之后降为 10 μg/m^3，相对湿度从 92%急剧下降到 31%，风速大幅度升高，本次污染过程结束。12 月 2 日 08:00，温度廓线上首次没有观测到逆温层；污染过程开始前的 11 月 26 日和污染结束后的 12 月 2 日，近地面 1000 m 高度以下的相对湿度都在 40%以内，而在重污染过程中的 5 d，相对湿度基本都在 60%以上。

3.3 重污染过程湍流场特征

为了探究 PM2.5 重污染过程期间的湍流演变情况，计算主要湍流特征统计量如下：

（1）摩擦速度

$$u_* = (\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2)^{1/4}, \quad (1)$$

其中，u、v、w 是三维超声风速（单位：m/s）；u_* 表示摩擦速度，代表风切变造成湍流的强弱；u'、v'、w'分别表示 3 个方向上的脉动风速。

（2）湍流强度

$$I_u = \sigma_u / \overline{U}, \quad (2)$$

$$I_v = \sigma_v / \overline{U}, \quad (3)$$

$$I_w = \sigma_w / \overline{U}, \quad (4)$$

其中，I_u、I_v、I_w 分别表示 3 个方向上的湍流强度，表示三维风速的脉动值与平均水平风速的比值，代表湍流的强弱程度；σ_u、σ_v、σ_w 表示风速的标准差，$\overline{U}$ 表示 x 方向 30 min 的平均风速。x、y、z 是二次坐标旋转过后的 3 个坐标轴，x 代表与 30 min 平均风向相同的水平方向，y 代表与 x 垂直的水平风向，z 是垂直方向。

（3）湍流动能

$$\mathrm{TKE}(x) = \frac{1}{2}\overline{x'^2} = \frac{1}{2}\sigma_u^2, \quad (5)$$

$$\mathrm{TKE}(y) = \frac{1}{2}\overline{x'^2} = \frac{1}{2}\sigma_v^2, \quad (6)$$

$$\mathrm{TKE}(z) = \frac{1}{2}\overline{z'^2} = \frac{1}{2}\sigma_w^2, \quad (7)$$

其中 TKE(x)、TKE(y)、TKE(z)分别表示 3 个方向上的湍流动能，是湍流活动强弱的能量的度量。

（4）感热通量

$$H = \rho c_p \overline{w'T'}, \quad (8)$$

感热通量 H 代表地表和低层大气之间直接通过空气热交换产生的热量，ρ 为空气密度（取 1.194 kg/m^3），c_p 为定压比热容（取 1004 J kg^{-1} K^{-1}），T 为温度（单位：K）。

（5）潜热通量

$$Q = \rho L_v \overline{w'q'}, \quad (9)$$

潜热通量 Q 是地气之间通过水汽的相变作用传输的热量，L_v 为水汽的汽化热（取 2.5×10^6 J/kg），q 是比湿（单位：g/g）。

图 5 为北京 325 m 气象塔 47 m 高度处水平和垂直方向上湍流动能 (turbulent kinetic energy, TKE) 随时间的变化，右侧坐标轴是 ρ(PM2.5) 随时间的变化。在重污染爆发前，湍流动能处于高值；在重污染过程期间，湍流动能降低，不利于污染物的水平和垂直扩散。在污染过程结束时，湍流动能的激增伴随着 ρ(PM2.5) 的快速降低，湍流动能的增加促进了颗粒物的消散。整个过程中水平湍流动能对湍流动能占主要贡献，垂直方向的湍流动能一直占水平方向的 15%～20%左右。在 11 月 26 日 15:00，ρ(PM2.5) 第一次爆发增长时，x 方向的水平湍流动能明显减弱至 0.5 m^2/s^2，此后一直停留在低值

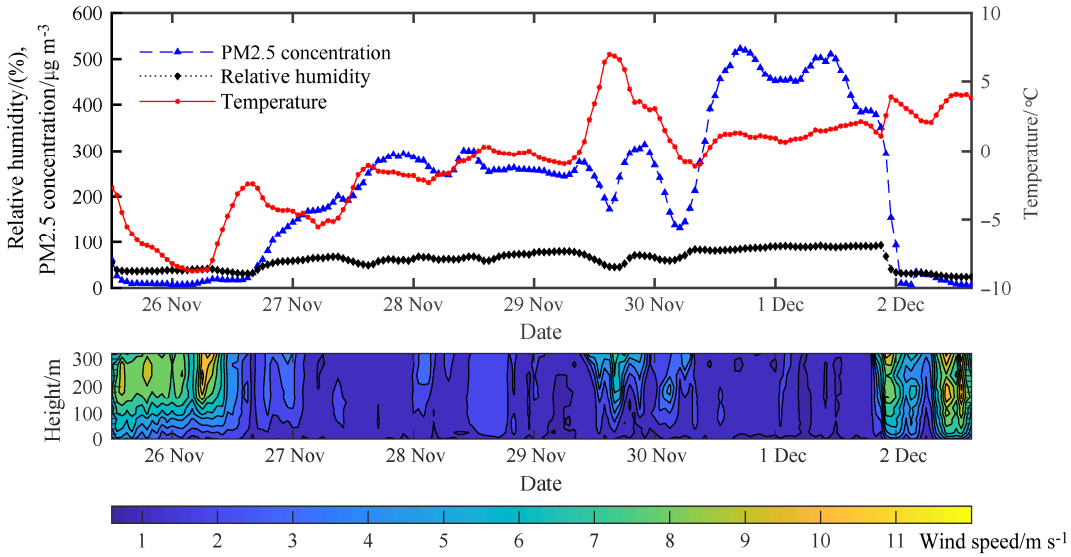

图 3　2015 年 11 月 26 日至 12 月 2 日（a）ρ(PM2.5)与北京 325 m 气象塔（a）相对湿度和温度（47 m 高度处）、（b）风速与随时间的变化

Fig. 3　Variations of (a) relative humidity and temperature and (b) wind speed from the 325-m observation tower in Beijing and (a) ρ(PM2.5) during 26 Nov–2 Dec 2015. The relative humidity and temperature represent values at the height of 47 m

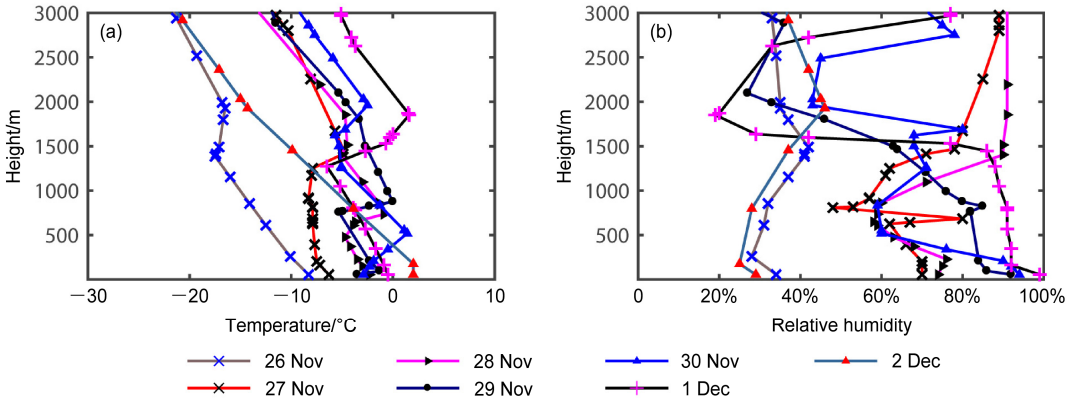

图 4　2015 年 11 月 26 日至 12 月 2 日 8:00 南郊观象台气象要素廓线分布

Fig. 4　Vertical profiles of meteorological elements at Beijing Suburb Observatory at 0800 UTC during 26 Nov–2 Dec 2015

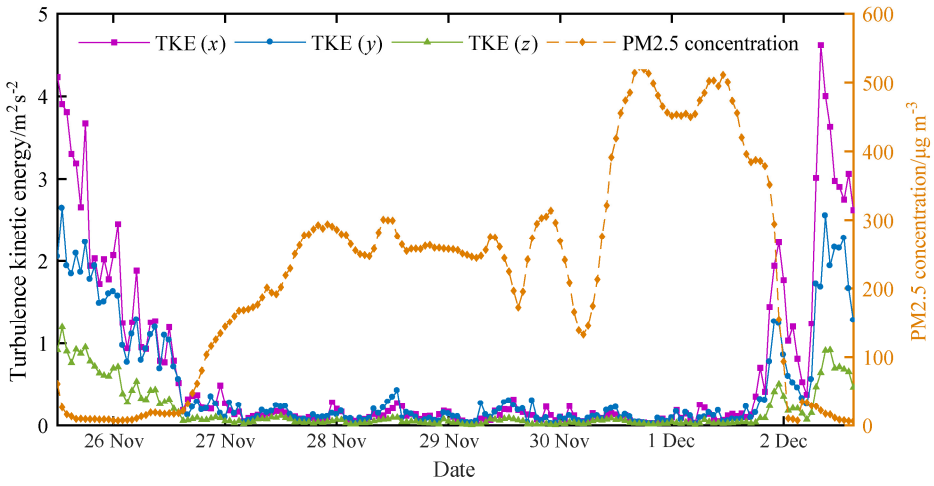

图 5　2015 年 11 月 26 日至 12 月 2 日北京 325 m 气象塔湍流动能（47 m 高度处的值）和 ρ(PM2.5)随时间的变化

Fig. 5　Variations of hourly turbulence kinetic energy (values at the height of 47 m) from the 325-m observation tower and ρ(PM2.5) in Beijing during 26 Nov–2 Dec 2015

0.5 m^2/s^2 以下。在重污染过程结束的 12 月 1 日 22:00，湍流动能爆发增长，从 0.41 m^2/s^2 迅速增加为 1.45 m^2/s^2，与此同时，ρ(PM2.5)出现下降。垂直方向的湍流动能与水平表现出相同变化特征，在 ρ(PM2.5)激增时 z 方向湍流动能小于 0.2 m^2/s^2，在重污染过程结束后从 0.09 m^2/s^2 迅速升高到 2.24 m^2/s^2；整个污染事件中 x 方向湍流动能的变化幅度大于 y 方向和 z 方向，z 方向的变化最小。

图 6 是 47 m 和 280 m 高度处摩擦速度 u_*随时间的演变，u_*能表征脉动速度的大小，用来表示机械湍流的强弱。8～280 m 所有高度的 u_*都表现相同的变化趋势，这里仅给出了 47 m 和 280 m 高度处 u_*的演变情况。u_*与 PM2.5 呈强反相关关系。在污染爆发阶段，u_*响应较快，u_*的下降早于 ρ(PM2.5)的升高，重污染爆发以后 47 m 和 280 m 高度处的 u_*都稳定在 0.2 m/s 左右，这仅相当于爆发前数值的 1/5，风速脉动减小，近地面的机械湍流变弱，大气湍流对气溶胶的扩散能力减弱，有利于污染物的积累。11 月 29 日 10:00，280 m 高度处的 u_*发生了显著变化，升高了 0.2 m/s 又很快下降，大气湍流的输送能力增强后又减弱，这反映在对颗粒物的清除作用上，对应时间 ρ(PM2.5)有微小的下降然后又回升。PM2.5 重污染过程的结束时，u_*迅速增加，47 m 和 280 m 高度处的摩擦速度均增加了 0.6 m/s。

图 7 是 x、y、z 三个方向上湍流强度随时间的变化，湍流强度 I 是涨落标准差和平均速度的比值，是衡量湍流强弱的无量纲量（为了更清晰地说明，这里采用对数坐标绘图）。湍流强度在污染爆发前后变化并不明显， 3 个方向的变化趋势一致，在大多数时候都维持在一个较低的水平。在整个污染过程中，湍流强度一共出现了两次高的峰值，一次是 11 月 29 日 21:00 至 22:00，x 方向的湍流强度从前一时次的 0.21 迅速增长到 2.66，增量达到了 11 倍；y 方向和 z 方向的湍流强度也与 x 方向同步变化，增长幅度均达到了一个数量级以上。这个湍流强度的峰值比 11 月 29 日 23:00 ρ(PM2.5)的下降提前了 1～2 h。

湍流强度的第二个高峰更加剧烈，与 11 月 29 日 21:00 至 22:00 第一个高峰比较，这次湍流强度的峰值提高了一个量级。12 月 1 日 09:00，x、y、z 方向的湍流强度分别为 26.25、27.75、14.75，与 1 日 08:00 相比，分别增加了 35、53、36 倍。12 月 1 日 10:00，ρ(PM2.5)在到达 500 μg/m^3 高值后表现出下降的趋势，这比湍流强度高峰的出现晚了 1 h。在两次峰值以外其他大多数的时段，水平方向的湍流强度小于 1，垂直方向的湍流强度小于 0.5。综合这两次湍流强度峰值来看，湍流强度峰值的出现可能是 ρ(PM2.5)发生剧烈下降污染转好的一个指标。

图 8 是重污染过程期间感热通量和潜热通量的变化情况。整个时段的感热通量基本都大于 0，代表感热通量从地面向大气输送；在重污染爆发以前，感热通量的值大约为 100 W/m^2，潜热通量大约为 30 W/m^2；重污染爆发后感热通量和潜热通量基本都在 0～20 W/m^2 的范围内。感热和潜热都表现出明显的日变化，白天较高，尤其是正午时期，夜间较低，感热通量的日变化比潜热更明显一些。大气中存在的大量气溶胶通过直接反射和散射作用减少了到达地面的太阳辐射，导致湍流活动减弱，由于湍流运动从地面向大气传输的热量通量减少。PM2.5 重污染时段的感热通量与污染爆发之前对比，少了一个量级。潜热通量是由于水汽相变而从地面向大气传输的热量，潜热通量输送是地气之间交换热量和水汽的重要方式，在重污染阶段潜热通量接近于 0。这与李敏娜等（2015）对南京雾霾的研究结果一致。

4 功率谱分析与中尺度通量

对 2015 年 11 月 27 日 PM2.5 重污染事件爆发日的垂直风速 w 做功率谱分析（图 9），横坐标为对数坐标的频率（单位：s^{-1}），纵坐标为对数坐标的功率谱密度和频率的乘积（单位：m^2/s^2）。在湍流运动的惯性区（斜率为－2/3 的直线部分），频率大于 0.01 s^{-1} 的高频段上，湍流谱的分布近似于直线－2/3，这与经典的湍流理论一致。惯性区对应的时间尺度为 100 s 以内。在谱的低频 5×10^{-4} s^{-1} 有一个谱峰，对应的时间尺度为 1.4 h，这可能反映了中尺度过程对动能输送的贡献。

鉴于风速功率谱的特征，参考关于锋面、沙尘暴和大雾过程中尺度通量的研究（陈陟等，2000；彭珍等，2007；刘熙明等，2010；李晓岚和张宏升，2012），将湍流和中尺度过程在时间尺度上进行分离，把时间尺度小于 5 min 的运动划分为湍流运动，5 min 至 6 h 的运动划分为中尺度运动。定义 φ^* 为 5 min 平均量[φ]至 6 h 平均量〈φ〉的中尺度扰动，则有

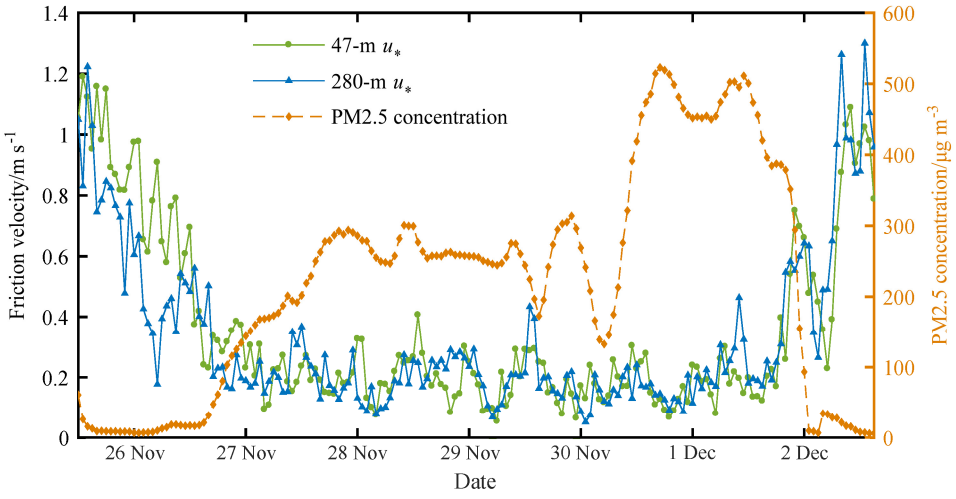

图 6　2015 年 11 月 26 日至 12 月 2 日北京 325 m 气象塔摩擦速度和 ρ(PM2.5)随时间的变化

Fig. 6　Variations of hourly friction velocity from the 325-m observation tower and ρ(PM2.5) in Beijing during 26 Nov−2 Dec 2015

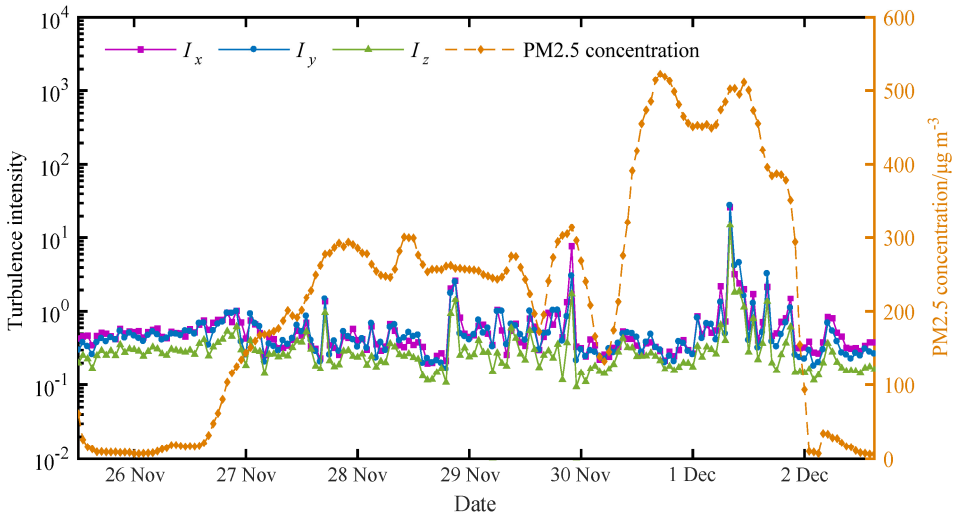

图 7　2015 年 11 月 26 日至 12 月 2 日北京 325 m 气象塔湍流强度（47 m 高度处的值）和 $\rho(PM_{2.5})$随时间的变化

Fig. 7　Variations of hourly turbulence intensity (values at the height of 47 m) from the 325-m observation tower and ρ(PM2.5) in Beijing during 26 Nov−2 Dec 2015

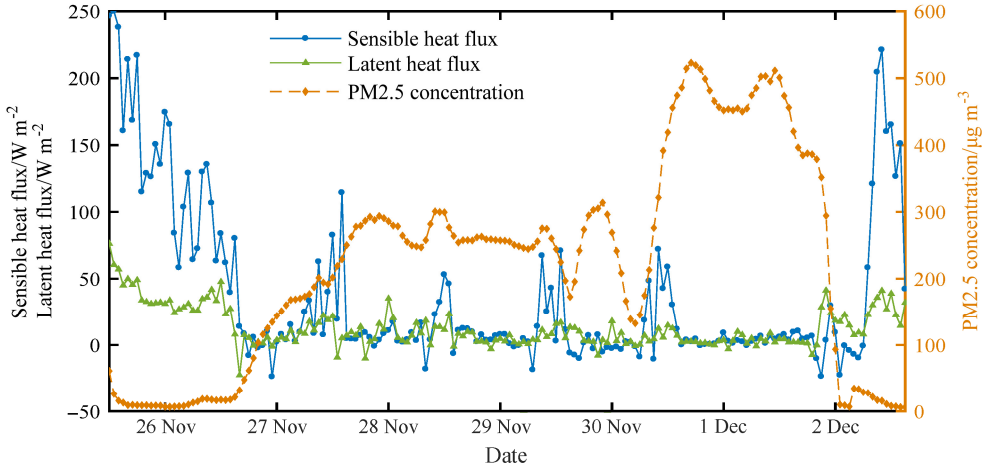

图 8　2015 年 11 月 26 日至 12 月 2 日北京 325 m 气象塔感热通量、潜热通量（47 m 高度处的值）和 ρ(PM2.5)随时间的变化

Fig. 8　Variations of hourly sensible and latent heat fluxes (values at the height of 47 m) from the 325-m observation tower and ρ(PM2.5) in Beijing during 26 Nov−2 Dec 2015

$$[\varphi]=\langle\varphi\rangle+\varphi^{*}, \quad (10)$$

进而将整个变量进一步分解为（由传统的两项分解变为三项分解）

$$\varphi=[\varphi]+\varphi'=\langle\varphi\rangle+\varphi^{*}+\varphi', \quad (11)$$

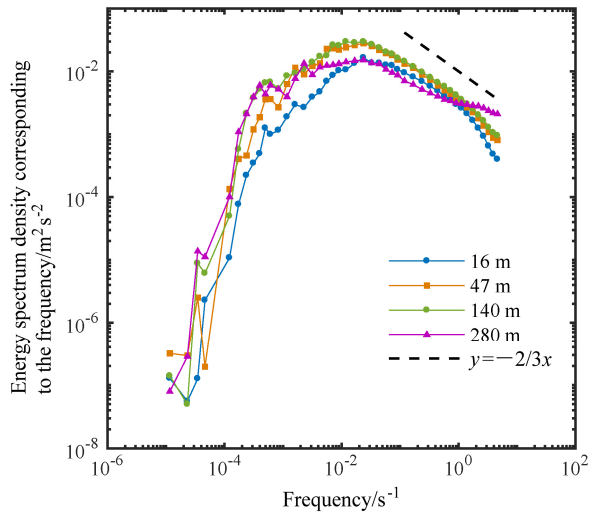

图 9 2015 年 11 月 27 日北京 325 m 气象塔垂直风速 w 谱分布。对垂直风速 w 进行傅里叶级数展开，横坐标为频率 f，纵坐标 $fS(f)$ 为频率 f 对应的能谱密度，表示频率为 f 的谐波成分对总能量的贡献

Fig. 9 Spectral distribution of vertical velocity w from the 325-m observation tower in Beijing on 27 Nov 2015. The Fourier series expansion of the vertical wind speed is carried out. The transverse coordinate represents the frequency and the vertical coordinate represents the energy spectrum density corresponding to the frequency, which indicates the contribution of the harmonic component of the frequency f to the total energy

其中 φ' 为湍流脉动量。由公式（11），φ 的垂直通量 $w'\varphi'$ 取湍流平均后可以表示为

$$[w\varphi]=\langle w\rangle\langle\varphi\rangle+w^{*}\varphi^{*}+[w'\varphi']+\langle w\rangle\varphi^{*}+w^{*}\langle\varphi\rangle, \quad (12)$$

再对上式取中尺度平均，得到

$$[w\varphi]=\langle w\rangle\langle\varphi\rangle+\langle w^{*}\varphi^{*}\rangle+\langle w'\varphi'\rangle, \quad (13)$$

其中，$\langle w\rangle\langle\varphi\rangle$ 为大尺度大气垂直运动产生的通量，是不需要参数化处理的可分辨量，通常所指的边界层通量输送不包含这一项（陈陟等，2000）。$\langle w^{*}\varphi^{*}\rangle$ 为时间尺度为 5 min 到 6 h 的中尺度垂直大气运动对通量的贡献，$\langle w'\varphi'\rangle$ 为时间尺度小于 5 min 的湍流垂直运动对通量的贡献。图 10 分别是重污染过程爆发时 2015 年 11 月 26～28 日 47 m 高度处每 6 h 的动量通量（图 10a）和感热通量（图 10b）中尺度通量和湍流通量的输送情况。值的正负代表通量输送的方向，正值代表通量从地面向大气输送，负值代表通量由大气向地面输送。在 PM2.5 重污染过程发生前，不论是动量通量还是感热通量，中尺度的动量通量输送占比很小，中尺度通量输送只占总量的 10%以下，中尺度通量与湍流尺度输送的方向相同，都是由地面向上输送动量（热量），而湍流尺度的输送占绝对优势。而在重污染发生后，对于动量通量，湍流输送迅速由 0.4 m/s 的正值降为 0 附近，大部分时次输送方向变为从大气向地面输送，而中尺度通量基本保持着向上的输送方向，量级与湍流通量持平甚至更高。中尺度的动量通量输

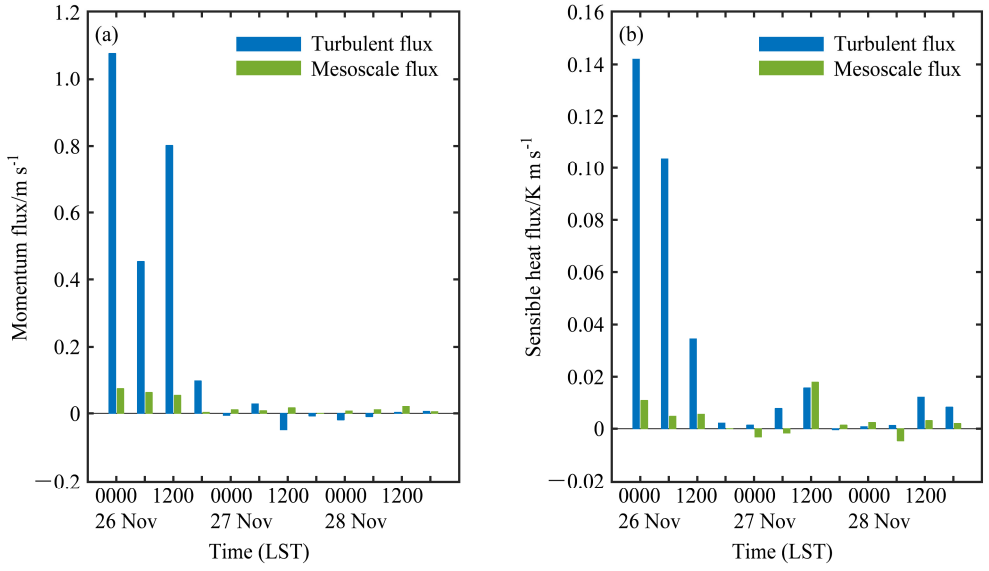

图 10 2015 年 11 月 26～28 日北京 325 m 气象塔 47 m 高度处的（a）动量通量和（b）感热通量（横坐标的时间为每 6 小时计算过程的开始时刻）

Fig. 10 (a) Momentum flux and (b) sensible heat flux at 47-m height from the 325-m observation tower in Beijing during 26−28 Nov 2015（the time marks at the horizontal axis represent the starting time of the calculation periods at 6-h intervals）

送变得重要起来，例如 11 月 28 日 06:00 至 12:00，湍流输送的动量通量为－0.0091 m/s，方向向下，而由于中尺度动量通量为向上的 0.0109 m/s，整体的动量通量输送效应为从地面向大气的 0.0018 m/s。对于感热通量，重污染时期湍流尺度和中尺度输送的基本方向都为从地面到近地层大气，个别时次中尺度感热通量输送方向为从大气到地面。在对感热通量输送的总贡献中，湍流尺度的输送减弱，中尺度过程占比增加，达到了与湍流通量输送相当的量级。与对动量通量输送的结果一致，中尺度过程对重污染过程中的感热通量输送也不容忽视。

5 结论

通过对 2015 年 11 月 27 日至 12 月 1 日北京地区的 PM2.5 重污染过程的大气环流形势、近地面气象条件、湍流场特征以及动量和热量通量输送特征以及时间尺度为 5 min 至 6 h 的中尺度对动量和热量通量输送的贡献进行分析，本文揭示了这次重污染过程中的边界层特征尤其是湍流场的特征。在高层稳定的大气环流形势的影响下，此次重污染过程中边界层平均场呈现出静风、高湿、逆温的特点。静风和逆温阻碍了颗粒物在水平和垂直方向上的扩散，逆温层结与高湿区互相配合，使得被阻挡在低层的颗粒物快速吸湿增长，污染加重。由于重污染期间颗粒物浓度较高使得大气能见度降低，到达地面的太阳辐射减少，因此热力驱动的湍流活动减弱，由地面向大气方向输送的动量通量和热量通量减少，大气层结变得更加稳定，动力驱动的湍流活动也削弱。这些因素又进一步阻碍了颗粒物的扩散，严重污染状况维持，直到大尺度环流形势的变化调整破坏了边界层的稳定结构，空气质量转好。本文得到的主要结论归纳如下：

（1）这次重污染过程具有范围广、强度强、持续时间长的特点，整个污染过程持续 5 d，ρ(PM2.5)超过 75 μg/m^3 的时次共计 126 h，超过 150 μg/m^3 的时次共计 116 h，小时最高 ρ(PM2.5)为 522 μg/m^3。重污染过程中 ρ(PM2.5) 在整体上升的趋势上，叠加了小幅的日变化，并且在 11 月 26 日 15:00 至 27 日 21:00 和 11 月 30 日 06:00 至 18:00 经历了两次快速上升的过程。

（2）高低空环流配置和近地面气象条件是污染过程爆发和消散的重要原因。重污染过程中，500 hPa 稳定平直的西风气流，850 hPa 暖脊配合地面高压中心的持续控制，不利于南北方向动量和能量的交换，有利于逆温结构的生成和维持，这抑制了污染物在水平方向和垂直方向上的输送，再加上贴近地面 1000 m 厚的湿层，有利于污染物的吸湿增长积累。污染消散阶段，北京地区北部发展出低涡，850 hPa 高度上有西北来向的冷平流以及地面天气图上北京位于冷高压前部，这样的天气形势有利于污染物的扩散，风速升高、逆温层破坏和湿度大幅降低是 ρ(PM2.5)减小的直接原因。

（3）在 PM2.5 重污染过程中，湍流动能较低，这不利于污染物的水平和垂直扩散。在污染事件结束时，ρ(PM2.5)急剧下降，湍流能量迅速增加，湍流能量的增加促进了颗粒物的消散。整个过程中水平湍流动能对湍流动能占主要贡献，垂直方向的湍流动能一直占水平方向的 15%～20%左右。各个高度上的摩擦速度呈现出与湍流动能相同的特征。在 11 月 29 日 21:00 和 12 月 1 日 09:00 两次 ρ(PM2.5)下降过程前 1～2 h，湍流强度分别出现了两个极大峰值，湍流强度峰值的出现可能是 ρ(PM2.5)下降污染消散空气质量转好的一个指标。在发生 PM2.5 重污染的时段，感热和潜热通量都较空气清洁情况下显著减少，可能原因是存在的大量气溶胶通过直接反射和散射作用减少了到达地面的太阳辐射，加上大尺度的静稳天气条件，使得致湍流活动减弱，热量通量减少。

（4）通过功率谱分析发现，在重污染过程期间，时间尺度为 5 min 至 6 h 的中尺度过程对动量和热量输送有重要意义。时间尺度分离方法的计算证明了这一点：中尺度的动量通量和感热通量输送的贡献达到了与湍流尺度活动相持平的量级，并且基本保持着从地面向大气的输送方向。

参考文献（References）

Chen X Y, Shao S, Tian Z H, et al. 2017. Impacts of air pollution and its spatial spillover effect on public health based on China's big data sample [J]. Journal of Cleaner Production, 142: 915–925, doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.119.

陈朝晖, 程水源, 苏福庆, 等. 2007. 北京地区一次重污染过程的大尺度天气型分析 [J]. 环境科学研究, 20 (2): 99–105. Chen Z H, Cheng S Y, Su F Q, et al. 2007. Analysis of large-scale weather pattern during heavy air pollution process in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (2): 99–105, doi:10.3321/j.issn:1001-6929.2007.02.020.

陈陟, 李诗明, 钱粉兰, 等. 2000. 一次冷锋过境过程的中尺度通量观测

[J]. 地球物理学报, 43 (6): 754–761. Chen Z, Li S M, Qian F L, et al. 2000. Observation of mesoscale flux of a cold front passage [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 43 (6): 754–761, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2000.06.004.

程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2015. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析 [J]. 环境科学研究, 28 (2): 163–170. Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, et al. 2015. Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 28 (2): 163–170, doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2015.02.01.

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. Deng X J, Li F, Wu D, et al. 2011. Turbulence and mass exchange characteristics of typical clean and pollution process over Guangzhou region [J]. China Environmental Science (in Chinese), 31 (9): 1424–1430.

Greene J S, Kalkstein L S, Ye H, et al. 1999. Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities [J]. Theor. Appl. Climatol., 62 (3–4): 163–174, doi:10.1007/s007040050081.

侯梦玲, 王宏, 赵天良, 等. 2017. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究 [J]. 大气科学, 41 (6): 1177–1190. Hou M L, Wang H, Zhao T L, et al. 2017. A modeling study of the visibility and PBL key meteorological elements during a heavy fog−haze episode in Beijing–Tianjin–Hebei of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1177–1190, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16211.

胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 712–728. Hu F, Hong Z X, Lei X E. 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 712–728, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.18.

雷孝恩. 1977. 国外边界层大气污染和湍流扩散的研究活动简介 [J]. 环境科学研究, (1): 32–34. Lei Xiaoen. 1977. An introduction of research activities on atmospheric pollution and turbulent diffusion in foreign boundary layers [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), (1): 32–34.

李敏娜, 牛生杰, 张舒婷, 等. 2015. 南京雾-霾天气个例湍流运动特征的对比研究 [J]. 气象学报, 73 (3): 593–608. Li M N, Niu S J, Zhang S T, et al. 2015. Comparative study of turbulent characteristics between the fog day and haze day in Nanjing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73 (3): 593–608, doi:10.11676/qxxb2015.032.

李晓岚, 张宏升. 2012. 2010 年春季北京地区强沙尘暴过程的微气象学特征 [J]. 气候与环境研究, 17 (4): 400–408. Li X L, Zhang H S. 2012. Micrometeorological characteristics during severe dust storms in spring of the Beijing area in 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 400–408, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10157.

廖要明, 王凌, 王遵娅, 等. 2016. 2015 年中国气候主要特征及主要天气气候事件 [J]. 气象, 42 (4): 472–480. Liao Y M, Wang L, Wang Z Y, et al. 2016. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2015 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42 (4): 472–480, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.04.011.

刘熙明, 胡非, 邹海波, 等. 2010. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析 [J]. 高原气象, 29 (5): 1174–1182. Liu X M, Hu F, Zou H B, et al. 2010. Analysis on characteristic of atmospheric boundary layer during a typical heavy fog process in Beijing area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (5): 1174–1182.

刘郁珏, 胡非, 程雪玲, 等. 2016. 北京 325 米气象塔上 CO_2 梯度观测数据质量控制与评价 [J]. 大气科学, 40 (2): 390–400. Liu Y J, Hu F, Cheng X L, et al. 2016. Data processing and quality assessment of the eddy covariance system of the 325-m meteorology tower in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 390−400, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14325.

缪育聪, 郑亦佳, 王姝, 等. 2015. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 356–368. Miao Y C, Zheng Y J, Wang S, et al. 2015. Recent advances in, and future prospects of, research on haze formation over Beijing–Tianjin–Hebei, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (3): 356−368, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14255.

彭珍, 胡非. 2006. 北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究 [J]. 地球物理学报, 49 (6): 1608–1615. Peng Z, Hu F. 2006. A study of the influence of urbanization of Beijing on the boundary wind structure [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (6): 1608–1615, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.06.005.

彭珍, 刘熙明, 洪钟祥, 等. 2007. 北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 267–276. Peng Z, Liu X M, Hong Z X, et al. 2007. Characteristics of atmospheric boundary-layer structure and turbulent flux transfer during a strong dust storm weather process over Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 267–276, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.03.007.

Quan J N, Gao Y, Zhang Q, et al. 2013. Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations [J]. Particuology, 11 (1): 34–40, doi:10.1016/j.partic.2012.04.005.

任阵海, 万本太, 虞统, 等. 2004. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 7–13. Ren Z H, Wan B T, Yu T, et al. 2004. Influence of weather system of different scales on pollution boundary layer and the transport in horizontal current field [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 7–13, doi:10.3321/j.issn:1001-6929.2004.01.002.

沈晓琳, 何立富. 2016. 2015 年 11 月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 42 (2): 254–260. Shen X L, He L F. 2016. Analysis of the November 2015 atmospheric circulation and weather [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42 (2): 254–260, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.02.014.

Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, et al. 2015. Mixing layer height and the implications for air pollution over Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 15 (4): 2459–2475.

王郭臣, 王东启, 陈振楼. 2016. 北京冬季严重污染过程的 PM2.5 污染特征和输送路径及潜在源区 [J]. 中国环境科学, 36 (7): 1931–1937. Wang G C, Wang D Q, Chen Z L. 2016. Characteristics and transportation pathways and potential sources of a severe PM2.5 episodes during winter in Beijing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 36 (7): 1931–1937, doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2016.07.002.

王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 2014. 北京冬季 PM2.5 重污染时段不同尺度

环流形势及边界层结构分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 173–184. Wang Yue, Wang Lili, Zhao Guangna, et al. 2014. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM2.5 heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 173–184, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13178.

尉鹏, 任阵海, 王文杰, 等. 2015. 2014年10月中国东部持续重污染天气成因分析 [J]. 环境科学研究, 28 (5): 676–683. Wei P, Ren Z H, Wang W J, et al. 2015. Analysis of meteorological conditions and formation mechanisms of lasting heavy air pollution in eastern China in October 2014 [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 28 (5): 676–683, doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2015.05.02.

吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 等. 2016. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系 [J]. 气象学报, 74 (3): 352–366. Wu P, Ding Y H, Liu Y J, et al. 2016. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74 (3): 352–366, doi:10.11676/qxxb2016.029.

Wu P, Ding Y H, Liu Y J. 2017. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 34 (4): 429–440.

徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 2008. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究 [J]. 地球科学进展, 23 (4): 357–370. Xu Z W, Liu S M, Gong L J, et al. 2008. A study on the data processing and quality assessment of the eddy covariance system [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 23 (4): 357–370, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2008.04.0357.

薛亦峰, 周震, 聂滕, 等. 2016. 2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 [J]. 环境科学, 37 (5): 1593–1601. Xue Y F, Zhou Z, Nie T, et al. 2016. Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: Pollution process and emissions variation [J]. Environment Science (in Chinese), 37 (5): 1593–1601, doi:10.13227/j.hjkx.2016.05.001.

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. Zhang R H, Li Q, Zhang R N. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. Science China Earth Sciences, 57 (1): 26-35, doi:10.1007/s11430-013-4774-3.

张舒婷, 苏德斌, 徐文静, 等. 2017. 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, 12 (1): 1–7. Zhang S T, Su D B, Xu W J, et al. 2017. Analysis and research on daily variation characteristics of boundary layer in Beijing area by wind profile radar data [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics (in Chinese), 12 (1): 1–7, doi:10.3969/J.ISSN.1673-6141.2017.01.001.

张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考 [J]. 科学通报, 58 (13): 1178–1187. Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (13): 1178–1187, doi:10. 1360/972013-150.

周明煜, 姚文清, 徐祥德, 等. 2005. 北京城市大气边界层低层垂直动力和热力特征及其与污染物浓度关系的研究 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 35 (S1): 20-30. Zhou M Y, Yao W Q, Xu X D, et al. 2005. A study on the vertical dynamic and thermal characteristics of the lower layer of the atmospheric boundary layer in Beijing and its relationship with the concentration of pollutants [J]. Science in China (Ser. D: Earth Sciences) (in Chinese), 35 (S1): 20-30, doi: 10.3321/j.issn:1006-9267.2005.z1.002..