

# 环境科学
# ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2019
Vol.40 No.10
第40卷 第10期

环 境 科 学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第10期
2019年10月15日

# 目 次

万方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第10期 2019年10月
Vol. 40, No. 10 Oct., 2019

# 京津冀区域重污染期间 $PM_{2.5}$ 垂直分布及输送

肖致美[1], 徐虹[1], 李鹏[1], 唐邈[1], 陈魁[1*], 杨宁[1], 郑乃源[1], 杨文[2], 邓小文[1*]
(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要**: 2016年12月17~19日重污染期间, 在天津市武清区高村开展车载系留气球颗粒物浓度垂直观测, 并以观测数据为基础, 计算了区域内 $PM_{2.5}$ 传输通量. 结果表明重污染过程期间, 大气混合层较低, 约200 m左右, $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布特征与混合层高度密切相关, 混合层以下, $PM_{2.5}$ 浓度较高, 垂直变化特征不显著, 形成明显的污染层, 混合层以上, $PM_{2.5}$ 浓度迅速降低并维持在降低水平. 观测期间, 粒径小于1.0 μm颗粒物浓度较高, 粒径大于2.2 μm颗粒物浓度较低, 近地层粒径为0.777 μm颗粒物浓度最高. 颗粒物浓度粒径谱分布与相对湿度和混合层高度相关, 高湿度和低混合层下颗粒物浓度粒径谱分布较宽泛. 观测期间, $PM_{2.5}$ 在西南方向上的传输通量最高, 占总传输通量的63.3%, 其中46~156 m和156~296 m高度之间 $PM_{2.5}$ 传输通量最高. 近地面300 m内 $PM_{2.5}$ 传输主要以西南方向传输为主, 300 m以上传输方向较分散.

**关键词**: 京津冀; 重污染; $PM_{2.5}$; 垂直分布; 输送
**中图分类号**: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)10-4303-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201903111

# Vertical Distribution and Transport of $PM_{2.5}$ During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region

XIAO Zhi-mei[1], XU Hong[1], LI Peng[1], TANG Miao[1], CHEN Kui[1*], YANG Ning[1], ZHENG Nai-yuan[1], YANG Wen[2], DENG Xiao-wen[1*]
(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract**: Based on vehicle-borne tethered balloon measurements, the vertical distribution of particulate matter (PM) concentrations were observed in Gaocun in the Wuqing District of Tianjin from December 17 to 19, 2016, during a period of heavy pollution. Using observational data, the transport flux of $PM_{2.5}$ in the Jing-Jin-Ji region was calculated. The results showed that the mixed layer was low at only 200 m during the heavy pollution period. The vertical distribution of $PM_{2.5}$ concentrations was closely associated with the heights of mixed layer whereby, below the mixed layer, $PM_{2.5}$ concentrations were higher. Vertical variation was insignificant, forming a district pollution layer. Above the mixed layer, $PM_{2.5}$ concentrations rapidly decreased and stabilized at low levels. During the observation period, higher concentrations of PM were found with particle sizes of less than 1.0 μm, and lower concentrations were observed for particle sizes larger than 2.2 μm. The size profiles of PM tallied with relative humidity and the height of the mixed layer. The size distribution was wider during periods of high humidity and with a lower mixed layer height. The greatest $PM_{2.5}$ transport flux was from the southwest, accounting for 63.3% of the total flux; the highest fluxes occurred at the heights of 46-156 m and 156-296 m. The dominant transport direction was southwest below 300 m, while the dominant transport direction was dispersed over 300 m.

**Key words**: Jing-Jin-Ji Region; heavy pollution; $PM_{2.5}$; vertical distribution; transport flux

颗粒物是影响中国城市环境空气质量的首要污染物[1], 颗粒物在大气中的行为和环境效应不仅与颗粒物的水平浓度有关[2~4], 还与颗粒物垂直分布密切相关[5~9], 并且表现出明显的区域分布特征[10~13]. 目前颗粒物的垂直分布的观测主要依托城市高层建筑物[14~16]、气象塔[17~19]、气球设备[20~24]、飞机[25~30]和雷达[31~33]等进行, 研究高度从几十m至1 000 m以上; 颗粒物的相互影响方面, 主要应用空气质量数值模型开展跨区域传输影响研究[34~38], 缺少以实际观测数据为基础的传输通量核算. 京津冀区域是我国大气污染防治的重点区域之一, 近年来, 以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的区域重污染天气频发, 引发社会强烈关注, 研究京津冀区域重污染期间 $PM_{2.5}$ 垂直分布及相互影响, 不仅可以为城市重污染应急方案的制定提供科学依据, 还可为京津冀区域大气污染联防联控提供科学支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测场地

观测场地选择在天津市武清区高村(39.647°N, 116.888°E), 位于天津市西北偏中区域, 与北京市通州区及河北省廊坊市相邻(图

**收稿日期**: 2019-03-13; **修订日期**: 2019-04-18
**基金项目**: 天津市科技计划项目(18ZXSZSF00160); 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B01); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208500)
**作者简介**: 肖致美(1972~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: xiaozhimei01@163.com
* 通信作者, E-mail: kuichen@126.com; dxwpp@163.com

1)，是连接天津市、北京市和河北省的枢纽，观测场地周边为农田及绿地，无大型烟囱，5 km 范围内无工业污染源，为理想的京津冀区域传输观测场地.

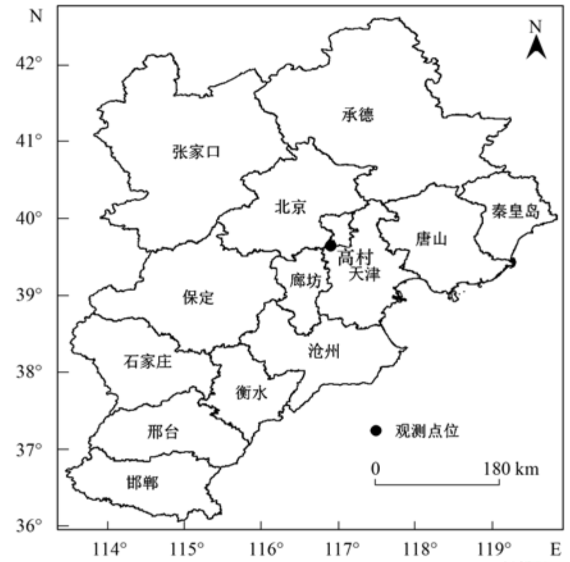


**图 1 观测点位示意**

Fig. 1 Location of the observation station

### 1.2 观测仪器及观测时间

本研究使用中国电子科技集团公司第三十八研究所车载系留气球开展垂直观测. 根据搭载仪器设备的外形尺寸、采样要求和供电要求等设计系留气球挂件，观测仪器搭载在系留气球挂件上，搭载仪器安装震动和缓冲层，防止仪器因空中气流而震动过于激烈. 本研究在系留气球挂件搭载颗粒物观测仪器为 APS-3321 监测仪；采用激光云高仪(芬兰 Vaisala CL31)观测混合层高度，Vaisala CL31 激光云高仪采用脉冲二级管激光雷达技术，垂直或倾斜向大气发射短而集中的激光脉冲，脉冲经过云、降水或其他目标如气溶胶的散射后采集，混合高度是根据后散射廓线，基于梯度方法计算得到的，梯度方法挑选出后散射系数负梯度的最大值作为混合层层顶；地面环境空气质量数据来自武清区环境空气质量监测数据；气象数据来自天津市武清区观测站(台站编号:54523)，观测时间为 2016 年 12 月 17、18 和 19 日.

### 1.3 质量控制

仪器使用前使用质量流量计对其流量进行校准，为保证仪器升空和下降过程的稳定性，升空前使用压力可调环境模拟射流风洞(中国环境科学研究院)对 APS-3321 的流量随压力的变化进行校准，在升压降压的过程中，APS-3321 的流量均随压力的变化而平稳变化(图 2)，说明仪器在监测过程中状态稳定，监测数据可信.

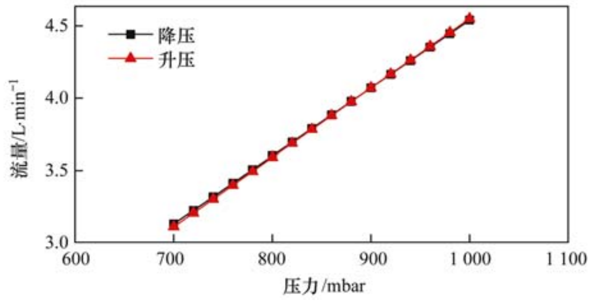


**图 2 APS 3221 流量-压力测试**

Fig. 2 Flow-pressure test of APS 3221

## 2 结果与讨论

### 2.1 环境空气质量状况及气象因素

2016 年 12 月 16～21 日，天津市出现连续重污染天气过程，12 月 15 日开始，武清区空气质量开始转差，12 月 16～21 日出现连续重污染天气过程(图 3)，12 月 18～19 日为严重污染天气，环境空气质量指数(AQI)达 300 以上，12 月 22 日空气质量好转，重污染过程结束. 本次观测选择了整个污染过程中污染最为严重的 12 月 17 日、18 日和 19 日，观测期间，武清区天气系统较稳定，平均相对湿度为 92%，多数时段高达 99%，地面平均风速为 0.9 $m\cdot s^{-1}$(图 4)，整体以西南风为主，最低混合层高度低于 100 m(图 5)，垂直扩散条件极差，不利于污染物扩散.

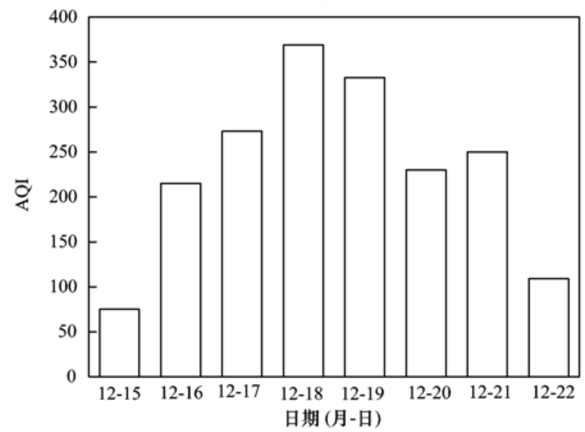


**图 3 2016 年 12 月 15～22 日武清区环境空气质量**

Fig. 3 Ambient air quality for the Wuqing District from December 15 to 22, 2016

### 2.2 $PM_{2.5}$浓度垂直分布

观测期间，云高仪监测结果显示:12 月 17～18 日中午，大气混合层分为两层结构，12 月 18 日午后至 19 日，大气混合层为一层结构(图 5). 上升期间，从垂直分布上看(图 6)，近地层 200 m 以下 $PM_{2.5}$浓度垂直分布均匀，平均浓度高达 537～543 $\mu g\cdot m^{-3}$；200 m 以上，$PM_{2.5}$浓度垂直分布呈现不同特征:12 月 17 日 $PM_{2.5}$浓度呈现出明显两次降低过

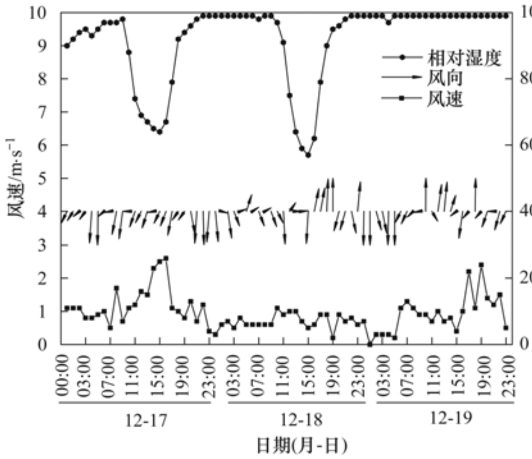


**图 4　观测期间武清区地面气象数据**

Fig. 4　Meteorological data for the Wuqing District during the observation period

程，在 300 ~ 400 m 左右，$PM_{2.5}$ 浓度随高度的升高而降低，由 530 $\mu g \cdot m^{-3}$ 降至 320 $\mu g \cdot m^{-3}$；高度 400 ~ 600 m，$PM_{2.5}$ 浓度随高度的升高基本保持稳定，浓度在 320 ~ 345 $\mu g \cdot m^{-3}$ 波动；650 ~ 750 m，$PM_{2.5}$ 浓度随高度的升高迅速降低，由 345 $\mu g \cdot m^{-3}$ 降至 29 $\mu g \cdot m^{-3}$；800 m 以上，$PM_{2.5}$ 在 24 ~ 15 $\mu g \cdot m^{-3}$ 波动，基本维持稳定. 12 月 18 日、19 日观测过程中 $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布相似，200 ~ 400 m 高度处均出现 $PM_{2.5}$ 浓度迅速降低，400 m 以上，$PM_{2.5}$ 浓度较低并保持基本稳定. $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布特征与大气混合层分布密切相关，12 月 17 日观测期间，近地层混合层高度为 200 m 左右，第二层大气混合层高度为 200 ~ 650 m，对应不同的混合层高度，$PM_{2.5}$ 浓度呈现明显两次降低过程. 200 m 以内为第一层混合层高度，400 ~ 600 m 接近第二层混合层高度，这两种高度处 $PM_{2.5}$ 浓度保持稳定；300 ~ 400 m 第一层和第二层混合层的连接高度，$PM_{2.5}$ 浓度随高度的升高而降低；650 m 以上 $PM_{2.5}$ 浓度迅速降低. 12 月 18 日、19 日观测过程均出现一层混合层，高度在 200 m 以下，所以 $PM_{2.5}$ 浓度在 200 ~ 400 m 高度处出现明显的降低过程，之后保持基本稳定. 下降期间 $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布与上升期间基本相似，随着大气混合层高度发生变化，混合层以上，$PM_{2.5}$ 浓度较低并基本保持平稳，进入混合层以内，$PM_{2.5}$ 浓度迅速增加并在混合层底部保持稳定.

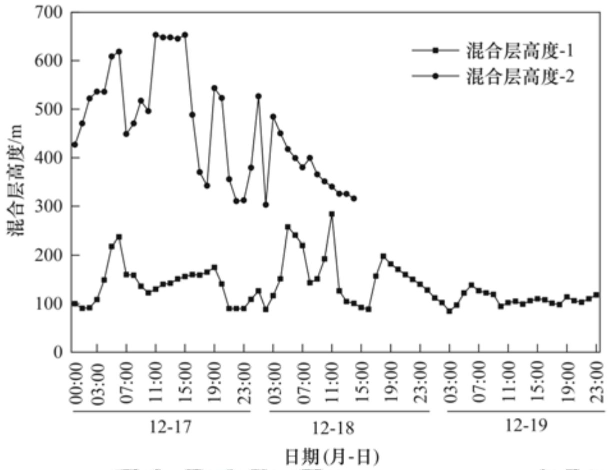


**图 5　观测期间混合层高度分布**

Fig. 5　Vertical distribution of the mixed layer during the observation period

### 2.3　$PM_{2.5}$ 浓度粒径谱垂直分布

观测期间，$PM_{2.5}$ 浓度粒径谱分布如图 7 所示，粒径小于 1.0 μm 颗粒物浓度较高，粒径大于 2.2 μm 颗粒物浓度较低. 从垂直分布上看，$PM_{2.5}$ 浓度粒径谱分布与 $PM_{2.5}$ 浓度分布相似，与大气混合层分布相关. 12 月 17 日存在明显的分层分布，300 m 以下，粒径为 0.835 μm 以下的颗粒物浓度较高，

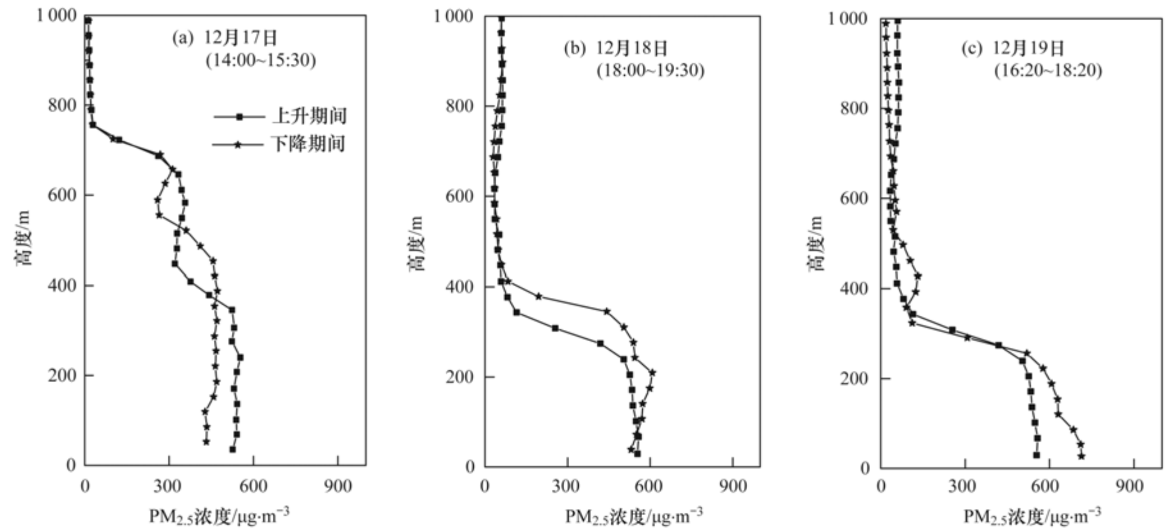


**图 6　观测期间 $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布**

Fig. 6　Vertical distribution of $PM_{2.5}$ concentrations during the observation period

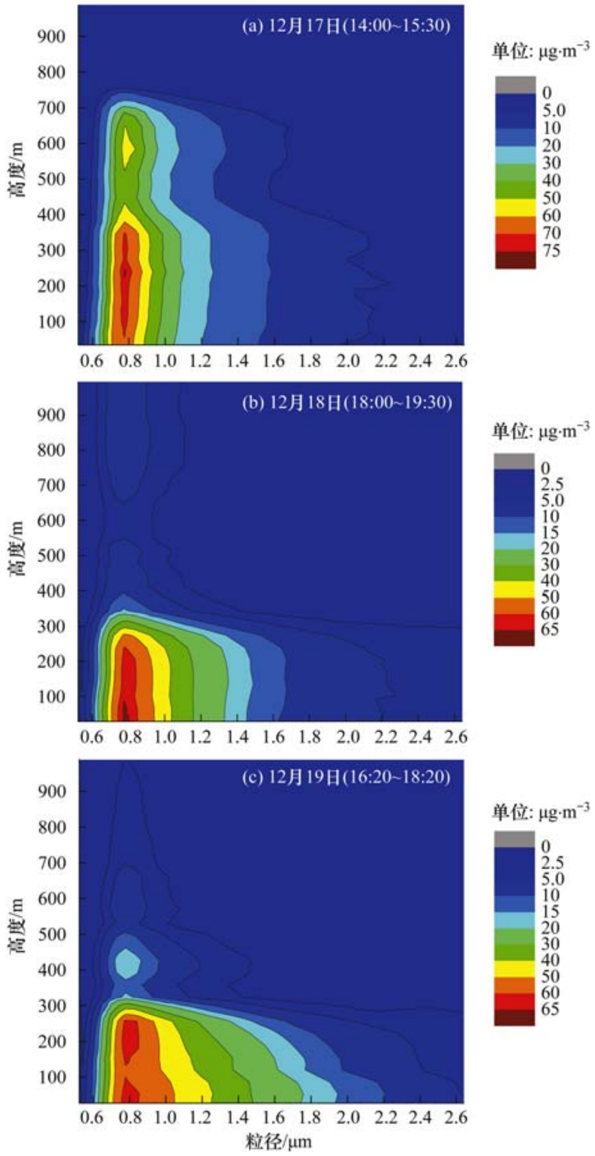


图 7 观测期间 $PM_{2.5}$ 浓度粒径谱垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of the $PM_{2.5}$ size profile during the observation period

其中粒径为 0.777 μm 颗粒物浓度最高，为 72 $\mu g \cdot m^{-3}$；600 m 左右，粒径为 0.777 μm 的颗粒物浓度出现第二个峰值，为 52 $\mu g \cdot m^{-3}$；12 月 18 日，$PM_{2.5}$浓度主要集中在近地层 300 m 以下，粒径为 0.777 μm 颗粒物浓度在 100 m 以下最高，达 66 $\mu g \cdot m^{-3}$；12 月 19 日，粒径为 0.777 μm 颗粒物浓度在 250 m 以下最高，为 62 $\mu g \cdot m^{-3}$. 从 $PM_{2.5}$浓度粒径谱分布上看，12 月 17 日粒径谱分布较集中，主要在 1.2 μm 以下；12 月 18 日、19 日粒径谱分布较宽泛，分别集中在 1.4 μm、2.0 μm 以下，这可能与颗粒物的吸湿增长及相互碰撞有关. 12 月 17 日观测期间，近地层相对湿度为 65%，12 月 18 日、19 日观测期间，近地层相对湿度高达 99%，小粒径颗粒物通过吸湿增长变为粒径较大的颗粒物；同时，与 12 月 17 日相比，12 月 18 日、19 日观测期间混合层高度更低，近地层颗粒物间碰撞更为明显，小粒径颗粒物通过碰撞变为粒径较大的颗粒物.

### 2.4 $PM_{2.5}$传输影响

$PM_{2.5}$传输通量为单位时间内通过某一垂直截面上 $PM_{2.5}$ 的质量[39]，单位为 $g \cdot s^{-1}$，计算公式如下：

$$S = \int_0^H LCV \mathrm{d}z$$

式中，$C$ 为 $PM_{2.5}$浓度，本研究为不同高度处 $PM_{2.5}$ 观测浓度($\mu g \cdot m^{-3}$)；$V$ 为该高度边界网格内水平风速($m \cdot s^{-1}$，来自 WRF 模型输出数据)；$L$ 为武清区与北京、河北的边界长度(km)，d$z$ 为垂直高度微单元(m). 本研究的传输通量(图 8)指不同方向上通过边界向观测地区的输送量，未考虑观测地区

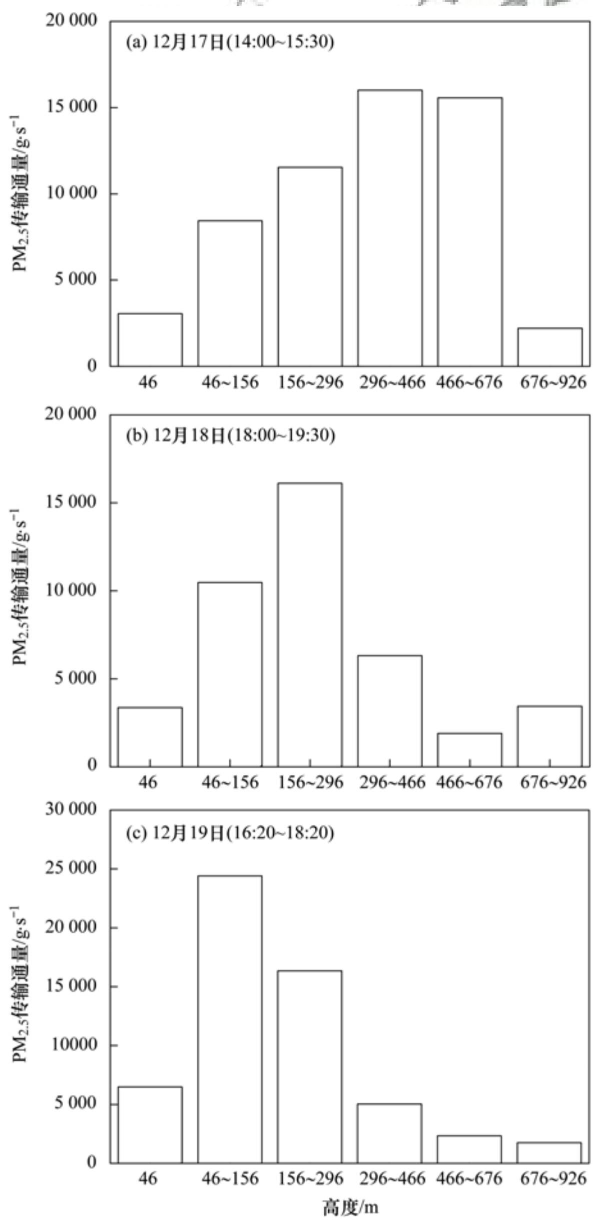


图 8 观测期间 $PM_{2.5}$ 传输通量

Fig. 8 $PM_{2.5}$ transmitted flux during the observation period

通过边界向外的输出量. 观测期间 $PM_{2.5}$ 传输通量如图 8 所示. 从传输总量上看, 12 月 17 日 296 ~ 466 m 和 466 ~ 676 m 高度之间传输通量基本相当, 分别为16 006. 2 $g \cdot s^{-1}$ 和15 564. 6 $g \cdot s^{-1}$; 12 月 18 日 156 ~ 296 m 高度之间传输通量最高, 为16 104. 7 $g \cdot s^{-1}$; 12 月 19 日 46 ~ 156 m、156 ~ 296 m 高度处传输通量较高, 分别为24 404. 3 $g \cdot s^{-1}$ 和16 360. 0 $g \cdot s^{-1}$.

整个观测期间, 不同方向上 $PM_{2.5}$ 传输如图 9 所示, 西南方向上传输通量最高, 为 97 980. 1 $g \cdot s^{-1}$, 占总传输量的 63. 3%; 其次东北方向, 为 40 794. 5 $g \cdot s^{-1}$, 占总传输通量的 26. 4%; 东南方向传输通量为16 006. 2 $g \cdot s^{-1}$, 占总传输量的 10. 3%, 重污染观测期间未发现来自西北方向上的传输.

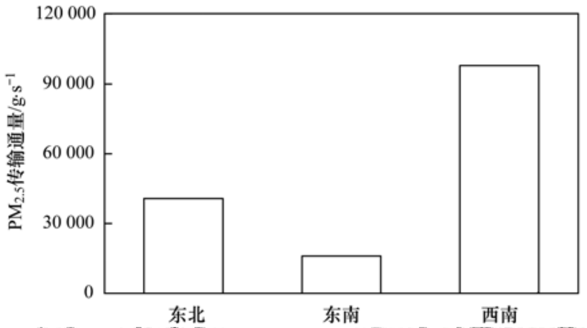


**图 9　观测期间不同方向 $PM_{2.5}$ 传输通量**

Fig. 9　$PM_{2.5}$ transmitted flux from different directions during the observation period

不同高度之间 $PM_{2.5}$ 传输通量存在差异(图 10), 46 ~ 156 m 高度之间和 156 ~ 296 m 高度之间 $PM_{2.5}$ 传输通量最高, 分别为 43 318. 6 $g \cdot s^{-1}$ 和 43 998. 6 $g \cdot s^{-1}$, 分别占总传输通量的28. 0% 和 28. 4%; 其次是 296 ~ 466 m 和 466 ~ 676 m 高度之间, 传输通量分别为27 359. 1 $g \cdot s^{-1}$ 和 19 800. 5 $g \cdot s^{-1}$, 分别占总传输通量的 17. 7% 和 12. 8%; 地面 46 m 高度下的传输通量较低, 为 12913. 0 $g \cdot s^{-1}$, 占总传输通量的 8. 3%; 高空 676 ~ 926 m 高度处的传输通量最低, 为7 391. 0 $g \cdot s^{-1}$, 仅占总传输通量的 4. 8%.

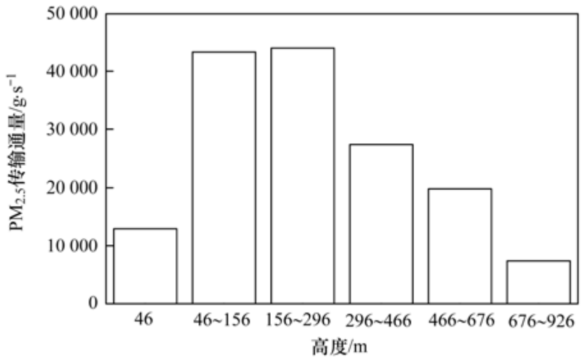


**图 10　观测期间不同高度 $PM_{2.5}$ 传输通量**

Fig. 10　$PM_{2.5}$ transmitted flux from different heights the during the observation period

从不同高度各方向 $PM_{2.5}$ 的传输通量看(图 11), 46 m、46 ~ 156 m 和 156 ~ 296 m 高度之间 $PM_{2.5}$ 传输通量在西南方向上最高, 其次是东北方向; 296 ~ 466 m 高度之间东南方向上 $PM_{2.5}$ 传输通量最高; 466 ~ 676 m 高度之间东北方向上 $PM_{2.5}$ 传输通量最高; 高空 676 ~ 926 m 高度之间西南方向上 $PM_{2.5}$ 传输通量最高. 总之, 观测期间近地面 300 m 内 $PM_{2.5}$ 传输主要以西南方向传输为主, 约占 300 m 总传输通量的 64. 8%, 300 m 以上传输方向较分散.

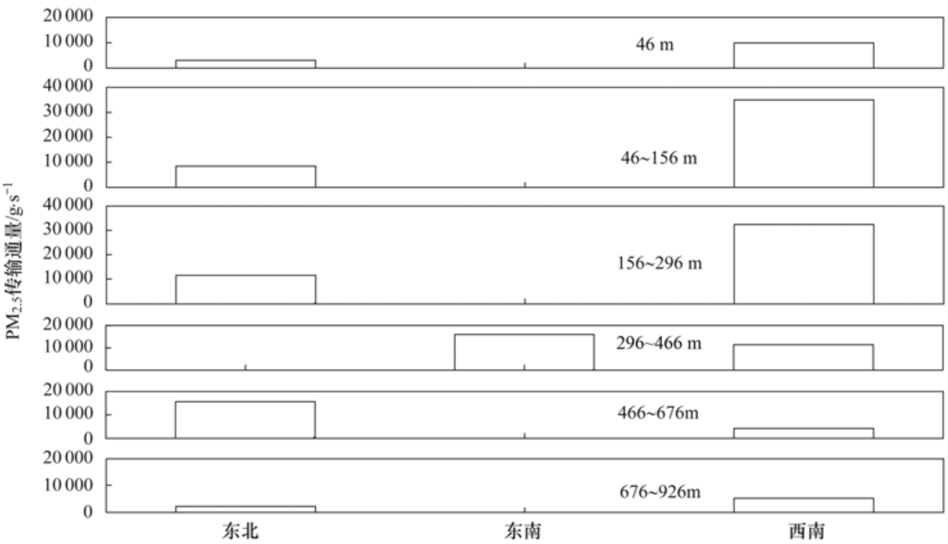


**图 11　观测期间不同高度不同方向 $PM_{2.5}$ 传输通量**

Fig. 11　$PM_{2.5}$ transmitted flux from different heights and directions during the observation period

## 3 结论

(1)重污染过程期间,大气混合层较低,约 200 m 左右,$PM_{2.5}$浓度垂直分布与混合层高度相关,混合层以下,$PM_{2.5}$浓度较高,垂直变化特征不显著,形成明显的污染层,混合层以上,$PM_{2.5}$浓度迅速降低并维持在降低水平.

(2)从颗粒物浓度粒径谱分布上看,观测期间,粒径小于 1.0 μm 颗粒物浓度较高,粒径大于 2.2 μm 颗粒物浓度较低,近地层粒径为 0.777 μm 颗粒物浓度最高. 颗粒物浓度粒径谱分布与相对湿度和混合层高度相关,高湿度和低混合层下颗粒物浓度粒径谱分布较宽泛.

(3)$PM_{2.5}$传输通量存在显著的风向分布特征,观测期间西南方向传输通量最高,占总传输通量的 63.3%,其次是东北方向,占总传输通量的 26.4%.

(4)不同高度处颗粒物传输通量存在差异,46 ~156 m 高度之间和 156 ~296 m 高度之间 $PM_{2.5}$传输通量最高,分别占总传输通量的 28.0% 和 28.4%,其次是 296 ~466 m 和 466 ~676 m 高度之间,分别占总传输通量的 17.7% 和 12.8%.

(5)不同高度颗粒物传输通量的风向分布存在差异,近地面 300 m 内 $PM_{2.5}$传输主要以西南方向传输为主,占 300 m 总传输通量的 64.8%,300 m 以上传输方向较分散.

**参考文献:**


[1] 中国环境监测总站. 1990-2016 年中国环境状况公报[EB/OL]. http://www.cnemc.cn//qwjs/? DOCTITLE = 中国环境状况公报.

[2] Wang Y H, Liu Z R, Zhang J K, *et al*. Aerosol physicochemical properties and implications for visibility during an intense haze episode during winter in Beijing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(6): 3205-3215.

[3] Yang L X, Zhou X H, Wang Z, *et al*. Airborne fine particulate pollution in Jinan, China: concentrations, chemical compositions and influence on visibility impairment [J]. Atmospheric Environment, 2012, **55**: 506-514.

[4] Wang P, Cao J J, Shen Z X, *et al*. Spatial and seasonal variations of $PM_{2.5}$ mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, **508**: 477-487.

[5] 曹聪, 王格慧, 吴灿, 等. 华山地区 $PM_{2.5}$中无机离子垂直分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1473-1483.
Cao C, Wang G H, Wu C, *et al*. Vertical distributional characteristics of inorganic ions of $PM_{2.5}$ at Mt. Huashan, Inland China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1473-1483.

[6] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京秋季大气气溶胶质量浓度的垂直分布[J]. 中国环境科学, 2008, 28(1): 2-6.
Xu H H, Wang Y S, Wen T X, *et al*. Vertical distributions of atmospheric aerosol mass concentrations in autumn, Beijing City [J]. China Environmental Science, 2008, **28**(1): 2-6.

[7] Wu H, Zhang Y F, Han S Q, *et al*. Vertical characteristics of $PM_{2.5}$ during the heating season in Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **523**: 152-160.

[8] Zhang Y F, Xu H, Tian Y Z, *et al*. The study on vertical variability of $PM_{10}$ and the possible sources on a 220 m tower, in Tianjin, China[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(34): 6133-6140.

[9] Sun X, Yin Y, Sun Y W, *et al*. Seasonal and vertical variations in aerosol distribution over Shijiazhuang, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **81**: 245-252.

[10] Zhao P S, Dong F, He D, *et al*. Characteristics of concentrations and chemical compositions for $PM_{2.5}$ in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(9): 4631-4644.

[11] Li B, Zhang J, Zhao Y, *et al*. Seasonal variation of urban carbonaceous aerosols in a typical city Nanjing in Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **106**: 223-231.

[12] Ming L L, Jin L, Li J, *et al*. $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 200-212.

[13] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al*. Source apportionment of $PM_{2.5}$ at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, south China-with emphasis on ship emissions [J]. Science of the Total Environment, 2016, **574**: 1559-1570.

[14] 郭斌, 任爱玲, 李良玉, 等. 石家庄秋季可吸入颗粒物的垂直分布特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, **24**(5): 714-719.
Guo B, Ren A L, Li L Y, *et al* The vertical distribution characteristics of respirable particles in autumn of Shijiazhuang [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2007, 24(5): 714-719.

[15] 穆珍珍, 赵景波, 徐娜, 等. 西安市雁塔区冬季可吸入颗粒物时空变化研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(7): 1509-1516.
Mu Z Z, Zhao J B, Xu N, *et al*. Vertical and temporal variation of $PM_{10}$ in Yanta District, Xi'an during winter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(7): 1509-1516.

[16] Wu Y, Hao J M, Fu L X, *et al*. Vertical and horizontal profiles of airborne particulate matter near major roads in Macao, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(31): 4907-4918.

[17] 丁国安, 陈尊裕, 高志球, 等. 北京城区低层大气 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$垂直结构及其动力特征[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2005, **35**(S1): 31-44.

[18] Sun Y, Song T, Tang G Q, *et al*. The vertical distribution of $PM_{2.5}$ and boundary-layer structure during summer haze in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2013, **74**: 413-421.

[19] Deng X J, Li F, Li Y H, *et al*. Vertical distribution characteristics of PM in the surface layer of Guangzhou [J]. Particuology, 2015, **20**: 3-9.

[20] Xu L, Shi G Y, Zhou J, *et al*. Vertical distribution of atmospheric aerosol concentration at Xianghe [J]. China Particuology, 2004, **2**(6): 256-260.

[21] 石广玉, 许黎, 郭建东, 等. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测[J]. 大气科学, 1996, **20**(4): 401-407.
Shi G Y, Xu L, Guo J D, *et al*. Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1996, **20**(4): 401-407.

[22] Greenberg J P, Guenther A B, Turnipseed A. Tethered balloon-based soundings of ozone, aerosols, and solar radiation near Mexico City during MIRAGE-MEX [J]. Atmospheric

Environment, 2009, **43**(16): 2672-2677.

[23] Maletto A, McKendry I G, Strawbridge K B. Profiles of particulate matter size distributions using a balloon-borne lightweight aerosol spectrometer in the planetary boundary layer [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(5): 661-670.

[24] McKendry I G, Sturman A P, Vergeiner J. Vertical profiles of particulate matter size distributions during winter domestic burning in Christchurch, New Zealand [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(29): 4805-4813.

[25] Wang W, Ma J Z, Hatakeyama S, *et al.* Aircraft measurements of vertical ultrafine particles profiles over Northern China coastal areas during dust storms in 2006[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(22): 5715-5720.

[26] 孙玉稳, 孙霞, 银燕, 等. 华北平原中西部地区秋季(10 月)气溶胶观测研究[J]. 高原气象, 2013, **32**(5): 1308-1320.

Sun Y W, Sun X, Yin Y, *et al.* Observation study of aerosol over Mid-Western North China Plain in autumn (October)[J]. Plateau Meteorology, 2013, **32**(5): 1308-1320.

[27] 张瑜, 银燕, 石立新, 等. 华北地区典型污染天大气气溶胶飞机探测个例分析[J]. 高原气象, 2012, **31**(5): 1432-1438.

Zhang Y, Yin Y, Shi L X, *et al.* An observational study of aerosol property under typical polluted weather condition[J]. Plateau Meteorology, 2012, **31**(5): 1432-1438.

[28] 孙玉稳, 孙霞, 银燕, 等. 华北地区气溶胶数浓度和尺度分布的航测研究——以石家庄为例[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(10): 1736-1743.

Sun Y W, Sun X, Yin Y, *et al.* Aerosol distribution in North China Plain under different weather conditions[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(10): 1736-1743.

[29] 孙霞, 银燕, 孙玉稳, 等. 石家庄地区春季晴、霾天气溶胶观测研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(5): 705-713.

Sun X, Yin Y, Sun Y W, *et al.* An observational study of aerosol particles tlsing aircroft over Shijiazhuang Area in clean and hazy days during spring[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(5): 705-713.

[30] 范烨, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析[J]. 气候与环境研究, 2007, **12**(1): 49-62.

Fan Y, Guo X L, Fu D H, *et al.* Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas [J]. Climatic and Environmental Research, 2007, **12**(1): 49-62.

[31] 潘鹄, 耿福海, 陈勇航, 等. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2164-2173.

Pan H, Geng F H, Chen Y H, *et al.* Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(11): 2164-2173.

[32] 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 等. 环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2165-2171.

Xu T T, Qin Y, Geng F H, *et al.* Seasonal variations in the vertical distribution of aerosols during dry haze periods in regions around Shanghai[J]. Environmental Science, 2012, **33**(7): 2165-2171.

[33] 秦艳, 章阮, 籍裴希, 等. 华北地区霾期间对流层中低层气溶胶垂直分布[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1665-1671.

Qin Y, Zhang R, Ji P X, *et al.* Vertical distribution of aerosols in middle and low troposphere in Northern China during haze periods[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(6): 1665-1671.

[34] Koo B, Wilson G M, Morris R E, *et al.* Comparison of source apportionment and sensitivity analysis in a particulate matter air quality model[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(17): 6669-6675.

[35] Skyllakou K, Murphy B N, Megaritis A G, *et al.* Contributions of local and regional sources to fine PM in the megacity of Paris [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(5): 2343-2352.

[36] Wang Y J, Li L, Chen C H, *et al.* Source apportionment of fine particulate matter during autumn haze episodes in Shanghai, China[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, **119**(4): 1903-1914.

[37] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 $PM_{2.5}$跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1361-1368.

Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of $PM_{2.5}$ in China[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1361-1368.

[38] 刘旭艳. 京津冀 $PM_{2.5}$区域传输模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.

Liu X Y. Modeling research on the regional transport of $PM_{2.5}$ over Jing-Jin-Ji region[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.

[39] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Assessment of inter-city transport of particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(7): 4843-4858.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 10

Oct. 15, 2019

## CONTENTS