

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁锋, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝瑛, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

边界层低空急流导致北京 $\text{PM}_{2.5}$ 迅速下降及其形成机制的个例分析

廖晓农^{1,2}, 孙兆彬², 何娜³, 赵普生², 马志强²

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 中国气象局京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 3. 北京市气象台, 北京 100089)

摘要: 2015 年 3 月 17 日 18:00~23:00 北京地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度快速下降, 在此期间并未出现与冷空气活动相伴的强偏北风. 本研究分析了导致空气质量迅速改善的原因, 结果表明边界层急流起着关键的作用. 随着边界层内偏南风速增大, 大气的通风量增大, 污染物浓度降低. 急流发展也加大了边界层内水平风的垂直切变, 从而导致湍流增强和混合层增厚. 此外, 3 月 17 日 20:00 在混合层顶附近出现气旋性地转涡度, Ekman 抽吸的方向为垂直向上, 于是底层的污染物就被带到高空并随强劲的西南风输送到下游. 边界层急流的发展与惯性振荡和大气的斜压性有关.

关键词: $\text{PM}_{2.5}$ 污染; 快速清除; 边界层急流; 惯性振荡; 大气斜压性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0051-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.008

A Case Study on the Rapid Cleaned Away of $\text{PM}_{2.5}$ Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism

LIAO Xiao-nong^{1,2}, SUN Zhao-bin², HE Na³, ZHAO Pu-sheng², MA Zhi-qiang²

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environment Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 3. Beijing Meteorological Observation, Beijing 100089, China)

Abstract: The concentration of $\text{PM}_{2.5}$ decreased very rapidly from 18:00 to 23:00 on 17th Mar. 2015 in Beijing area. No cold air bringing strong north wind influenced Beijing. The reason leading to the clean away of $\text{PM}_{2.5}$ was discussed. The results showed that a boundary layer jet played a key role. The ventilation in the boundary layer went up with the enhancement of southwesterly wind speed, which was favorable to the dilution of pollution. Besides, the development of jet also caused the increase of vertical wind shear. As a result, the turbulence in the boundary layer became more obvious and the mixing layer height rose. Furthermore, the geostrophic vorticity at the top of mixing layer was positive at 20:00 on 17th Mar. It means that the direction of Ekman-Pumping was upward. So, the pollution near the surface was brought to upper levels and transported downstream by the jet. The development of boundary layer jet attributed to inertial oscillation and atmospheric baroclinicity.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$ pollution; rapid clean away; boundary layer jet; inertial oscillation; atmospheric baroclinicity

$\text{PM}_{2.5}$ 是悬浮在空气中的细微粒子气溶胶, 当其浓度达到一定水平时就称为大气污染. 由于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源主要分布在近地面层, 因此边界层内的气象条件是决定污染程度的重要因素^[1~11].

污染物的浓度与大气的输送和扩散能力有关^[12,13]. 小风有利于污染物的累积, 而冷空气活动带来的大风则往往标志着污染过程的结束^[14~16]. 因为, 冷空气南下带来的大风天气加大了大气的通风性. 当然若大风路径上有高排放的污染源, 那么位于其下风方的地区也有可能出现污染^[17]. 如果产生明显降水, 则污染物浓度也会因湿沉降而降低^[18,19]. 在近地面边界层内的垂直方向上, 污染物的扩散受湍流支配, 湍流越强, 污染物浓度越低^[11,20]. 湍流是边界层内大气的基本运动特征, 由

动力和热力因子产生. 在中性层结下湍流的强弱主要决定于风切变等动力作用, 而当大气非常稳定时则热力因素是关键.

除受扩散条件影响外, 地面附近监测到的污染浓度还与混合层的厚度有关^[21~25]. 当没有足够的外力将近地面层的污染空气抬升到自由大气时, 混合层顶的高度越低, 大气的容积越小, 则 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高. 导致混合层顶高度升降的机制可以来自大气的热力作用. 白天在太阳加热的作用下, 大气的稳定性减小, 混合层厚度增大; 夜间反之. 此外, 风也

收稿日期: 2015-06-30; 修订日期: 2015-08-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC16B04); 国家级雾霾监测与预报团队项目

作者简介: 廖晓农(1962~), 女, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为灾害性天气, E-mail: cristinlxn@126.com

是影响混合层厚度的重要因素.

目前针对重污染形成的研究比较多,而涉及污染清除特别是非冷空气活动的清除过程的分析还不够全面和深入. 本研究基于气象和大气成分资料从一个发生在北京地区的、没有明显冷空气影响下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速降低的个例入手,讨论了边界层西南风急流对空气质量改善的作用,包括急流的发展与边界层内大气的通风、混合层顶抬升、Ekman 抽吸等导致近地面层污染物被快速清除有关的影响因素之间的联系,并分析了边界层急流发展的可能机制,该结果将对研判污染过程特征、提早预测其演变趋势具有一定的价值.

1 材料与方法

1.1 资料

本研究采用的气象数据来自京津冀地区的地面观测、探空、风廓线雷达、微波辐射计和 NCEP-NCAR 再分析资料等. 其中,地面风的观测时间分辨率为 1 h、气压为 3 h. 风廓线雷达架设在北京市海淀区(116.3°E,39.99°N),探测的起始高度为 150 m,最大高度可达 6 000 m 左右,资料间隔 6 min,垂直分辨率 120 m. 本研究采用了 30 min 间隔的数据,并对资料进行了质量控制处理. 微波辐射计放置在北京南郊观象台(116.47°E,39.81°N),温度廓线的时间分辨率为 1 min,垂直分辨率 100~250 m,最大探测高度 10 000 m. NCEP-NCAR 再分析资料为 6 h 间隔、垂直分辨率 25~50 hPa、水平分辨率为 1 个经纬度.

京津冀地区大气成分监测采用小时平均浓度. 此外,还使用了 Vaisala 增强型单镜头云高仪 CL51 探测得到的对流层低层颗粒物的后向散射密度.

1.2 混合层厚度计算方法

本研究根据罗氏法计算混合层厚度^[26~28],计算公式如下:

$$H = \frac{121}{6}(6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(u_z + 0.257)}{12f \ln(z/z_0)} \quad (1)$$

式中, T 为地面气温, T_d 为地面露点温度, u_z 为 z 高度处的平均风速, z_0 为地面粗糙度, f 为柯氏参数, $f = 2\Omega \sin\Phi$, Ω 为地转角速度, Φ 为地理纬度, P 为帕斯圭尔稳定度级别(大气稳定度级别为 A~F 时, P 值依次为 1~6). 由于目前气象部门取消了夜间云的观测,为了保持全天计算结果的一致性,帕斯圭尔稳定度级别中的云量数据采用了静止气象卫星

FY-2E 的反演结果. 对比分析表明,帕斯圭尔稳定度级别与使用人工观测云量的计算结果一致.

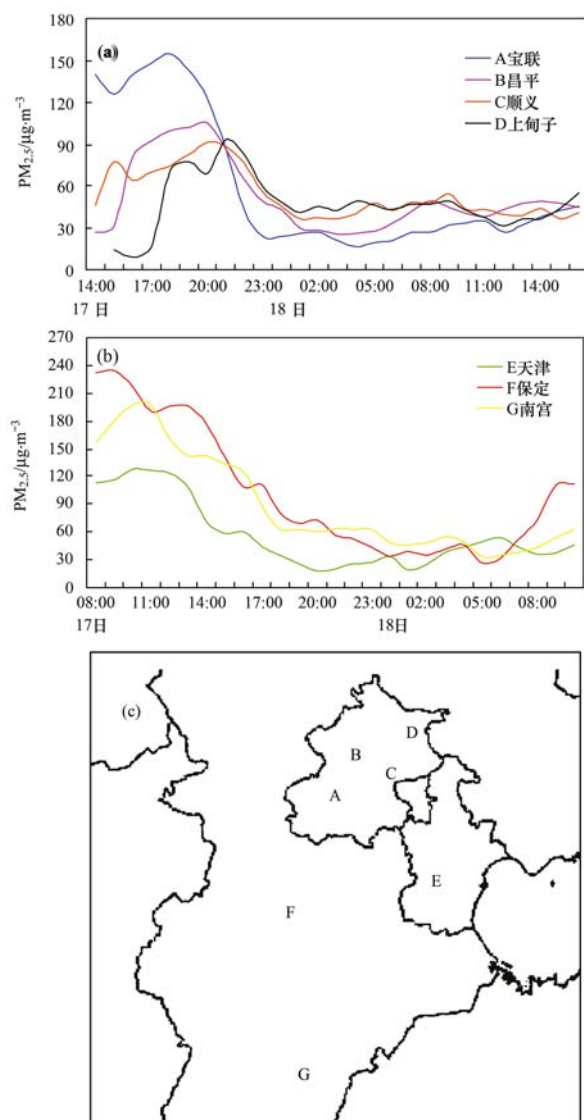
2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的演变过程

2015 年 3 月 17 日京津冀地区经历了一次 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度升高后迅速下降的过程(图 1). 在 14:00~18:00 期间北京地区几个监测站的污染物浓度均呈现增加的趋势,其中宝联(位于北京市海淀区,代表平原地区)的空气质量在原本已经污染的基础上进一步恶化,而其他位置偏北的测站则从优良转变成污染. 此后,宝联的浓度率先陡降[图 1(a)],即从 18:00 的 $155 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 减小到 23:00 的 $24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中,以 20:00~23:00 期间下降的幅度最大,平均每小时达到 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 23:00 以后一直到 3 月 18 日上午 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度基本保持在 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下. 其他 3 个监测站的浓度演变趋势与宝联相同,只是下降的起始时间有些滞后. 昌平和顺义滞后 2 h,上甸子空气质量改善从 21:00 开始. 上述监测站浓度演变的共同特征是:3 月 17 日 21:00 至次日凌晨 01:00 之间变化均非常大,与宝联相似. 因此,应该存在着某种机制,它导致 3 月 17 日傍晚以后北京地区的污染物浓度从南向北顺序降低并且 21:00~23:00 期间降幅最大.

天津和河北中南部 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度开始降低的时间超前于北京[图 1(b)]. 3 月 17 日 08:00 天津、保定和南宫的浓度为 $110\sim230 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,10:00 以后污染开始减轻,到 17:00 前后的浓度仅为早晨的 1/2 左右. 比较而言,津、冀两地的小时浓度变化幅度较北京略小,而且持续时间较长. 有研究表明,除本地排放外,北京的污染还受周边地区影响,西南风或东南风常常对应较高的浓度. 然而,对比图 1(a)和 1(b)发现,16:00 以后离北京最近、位于西南方向的保定 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度已经下降到 $110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,东南方的天津也只有 $35\sim60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均低于宝联. 因此,3 月 17 日北京地区的污染具有一定的独立性. 此外,使得扩散条件转好的冷空气通常来自北方,因此京津冀地区空气质量从污染转为优良的先后顺序为:北京-天津和河北中部-河北南部. 但是,本研究分析的个例却与正常顺序不同,说明污染物的清除机制可能存在地域差异.

综上所述,3 月 17 日 $\text{PM}_{2.5}$ 污染清除过程与常见的冷空气活动不同. 天津和河北中南部浓度开始降低的时间早于北京,北京地区的空气质量总体上是自南向北先后改善,而且在午夜前浓度陡降. 因

此,本研究重点回答的问题是:上述演变特征的影响因素及其形成机制是什么?



图(a)中浓度来自图(c)中的 A~D 测站,

图(b)中浓度来自图(c)中 E~G 测站

图 1 2015 年 3 月 17~18 日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和监测站位置示意

Fig. 1 $\text{PM}_{2.5}$ quality consistency from 17th to 18th Mar. 2015 and location of monitoring sites

3 导致污染物浓度迅速下降的机制讨论

3.1 冷空气活动的影响

北方冷空气南下是导致天津和河北中南部 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降的主要影响因素。3 月 17 日 08:00 河北北部、内蒙古中东部和蒙古国受地面高压控制,代表着冷空气南下大致方向的高压轴呈西北-东南走向。在 35°N 以南有一个低压带,京津冀大部分地区处在高低压之间的过渡区,等压线近东西走向而且较密集[图 2(a)]。3 h 以后,华北东部

地区气压场发生了一些变化[图 2(b)]。地面高压前部的等压线从河北东北部经天津、河北中南部、河南向湖北北部突出,形成了一个东北-西南走向的气压鼻,导致上述地区的气压均有不同程度的升高。说明在 08:00~11:00 期间有小股冷空气沿上述路径侵入华中地区。天津、保定和河北南部的南宫测站 08:00 和 11:00 均出现过 $4\sim6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北风,其中保定的东北风持续到 14:00,南宫一直到 17:00 风向仍然为 40° ,风速 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 1)。上述明显的东北风产生在地面气压鼻向西南伸展的过程中。因此,天津以及河北中南部空气质量转好归因于北方冷空气沿东北路径南下导致地面扩散条件改善。

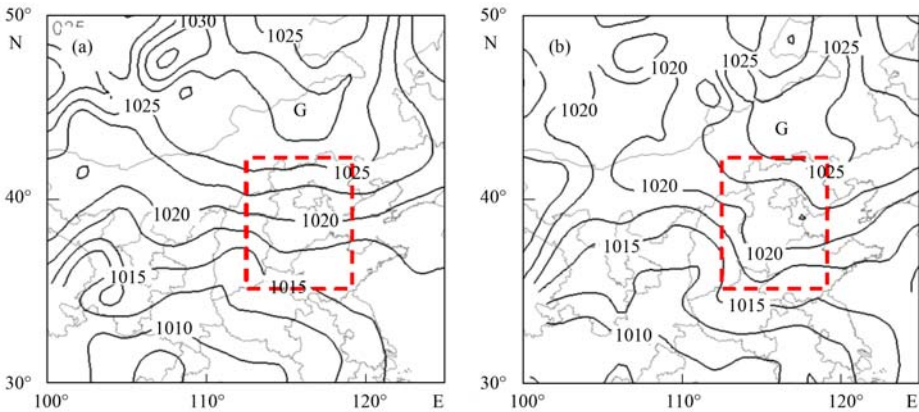
然而,由于冷空气活动路径偏东,北京平原地区基本没有受到其影响,未出现冷空气带来的地面加压。3 月 17 日 08:00,数值为 1 022.5 hPa 的等压线压在北京北部边界,1 020 hPa 等值线在保定到天津一线[图 2(a)]。11:00,1 022.5 hPa 等压线的位置基本没有变化[图 2(b)],而 1 020 hPa 等值线向南压到河北南部,北京始终位于两条等压线之间。而且,北京没有观测到明显的东北风(表 1)。虽然北京的风向在 08:00 为 70° ,但是风速仅 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,应该是局地山谷风环流影响的结果。08:00 以后,风向经过顺时针旋变成偏南风,风速在 $2\sim3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。也就是说,北京没有出现因地面气压鼻影响带来的地面风速较大的现象,所以其污染物浓度并没有与天津以及河北中南部同步下降。上述分析表明,导致 3 月 17 日京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度演变不同于一般冷空气活动过程的主要原因是冷空气影响出现了地域差异。

3.2 边界层偏南风急流的发展与作用

3.2.1 边界层风的演变特征

北京的风廓线雷达探测表明(图 3),3 月 17 日 10:00~12:00,600 m 以下为小于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏东风,高层则是偏北风。从 12:30 开始,边界层内风向顺时针旋转,到 17:00 整个边界层全部为西南风。风向的上述变化与北京地区昌平、顺义和上甸子几个位置较偏北的测站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高同步。由图 1(a)可知,14:00 宝联的污染最重并且位于上风方向,而且位置越偏北的监测站浓度开始升高的时间越滞后,因此午后的西南风起着将北京平原地区的污染物向郊区输送的作用。由于本研究重点讨论的是污染的清除过程,因此导致 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度增大的机制在此不作详细分析。

3 月 17 日 18:00~18 日 03:00 边界层偏南风的



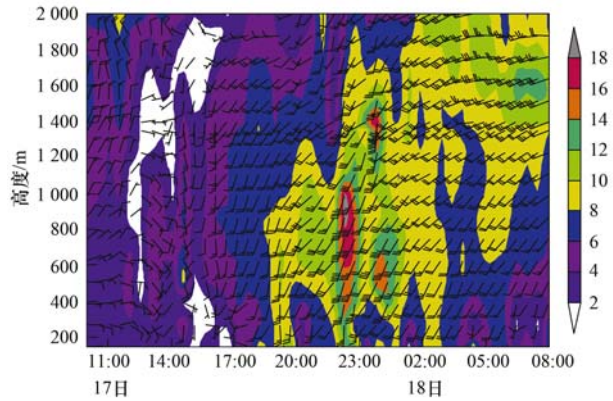
(a)08:00, (b)11:00; 气压单位:hPa
图2 2015年3月17日08:00和11:00海平面气压场

Fig. 2 Sea level pressure at 08:00 and 11:00 on 17th Mar. 2015

表1 2015年3月17日4个测站风向和风速

Table 1 Wind direction and speed from 4 observation station on 17th Mar. 2015

测站	08:00		11:00		14:00		17:00	
	风向 /(°)	风速 /m·s ⁻¹	风向 /(°)	风速 /m·s ⁻¹	风向 /(°)	风速 /m·s ⁻¹	风向 /(°)	风速 /m·s ⁻¹
北京	70	1	90	3	110	3	160	2
天津	90	4	70	6	140	6	160	6
保定	40	5	90	5	70	4	140	5
南宫	20	2	40	6	40	6	40	3



填色为全风速; 单位:m·s⁻¹;
图3 2015年3月17日10:00~18日08:00风的垂直分布
Fig. 3 Wind vertical profile from 10:00 on 17th
to 08:00 on 18th Mar. 2015

风速增大并形成急流(图3). 18:00~19:00, 6~8 m·s⁻¹的风速区一直伸展到1700 m左右的高度, 底层风速较17:00增大了近1倍, 因此偏南风增大、水平扩散条件转好是宝联测站污染物浓度从18:00开始降低的影响因素之一. 由于此时北京地区污染程度仍然呈现南重北轻的水平分布特征, 因此污染物浓度的通量为从南指向北. 此外, 除宝联外其他3个测站均位于山前地区或山区, 平原地区偏南风加

大后由于山体的阻挡会产生空气辐合, 导致污染物堆积. 所以, 昌平等监测站 PM_{2.5} 浓度开始下降的时间滞后于宝联. 19:00以后, 500 m高度以下风速的脉动特征非常明显, 出现了多次加大到8~12 m·s⁻¹后又减小到4~6 m·s⁻¹的变化. 而500~2000 m层内风速快速增大, 22:30在800~1000 m高度上出现了18.5 m·s⁻¹的中心, 达到了边界层急流的标准. 18日0:00急流核分为上下两个, 中心分别位于1400 m和500 m, 最大风速为17.1 m·s⁻¹和15.8 m·s⁻¹. 01:00边界层中下层风速减小, 03:00以后地面到1200 m层内除个别时刻外风速小于8 m·s⁻¹, 急流减弱消失. 结合图1(a)可知, 污染物浓度陡降阶段也正是边界层急流发展、边界层通风增强的时段, 待急流消失时, 空气质量已达到优良水平. 所以, PM_{2.5} 质量浓度快速下降与边界层急流有关.

3.2.2 混合层厚度伴随边界层急流的发展而增大
混合层厚度是影响污染物浓度的一个重要条件, 气象因素、地表面状况和人类活动等通过动力和热力因素影响混合层顶的高度^[11]. 本研究基于地面气象观测和卫星资料, 计算了逐时混合层顶高度(图4). 3月17日07:00以后混合层顶高度升

高,从 17:00 开始降低. 但是,20:00 ~ 23:00 混合层厚度却有所增大,特别是 20:00 和 23:00 甚至超过白天. 3 月 18 日 00:00 又降低到较低的水平. 3 月 16 日和 18 日分别是污染日和清洁日,混合层顶高度白天高,傍晚以后持续降低,符合常见的日变化规律. 而 3 月 17 日 20:00 ~ 23:00 期间的演变既不同于清洁日也有别于污染日,说明导致混合层顶高度变化的机制比较特殊.

对比图 4 和图 3 可知,混合层顶高度升高发生在边界层中层风速由 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 加大并发展成急流的阶段,而且当急流开始减弱时,混合层厚度也在降低. 结合本节前面的分析结果可以得到这样的结论:边界层急流发展、混合层增厚、污染物浓度降低同步发生,因此混合层顶抬高导致大气容积加大是北京地区 4 个监测站污染在前半夜迅速减轻的另外一个机制.

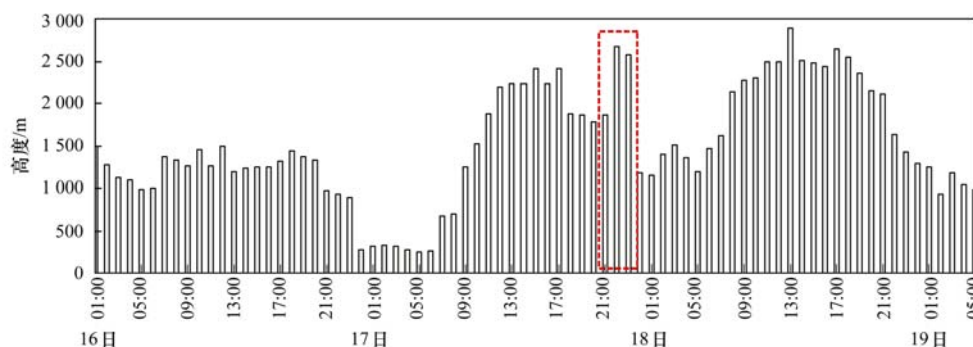


图 4 2015 年 3 月 17 日 01:00 ~ 19 日 05:00 北京混合层顶高度

Fig. 4 Mixing layer height in Beijing from 01:00 on 17th to 05:00 on 19th Mar. 2015

3.2.3 强上升运动将底层污染物送向高空

在边界层偏南风风速增大的初期,虽然边界层内被上升运动所控制,但是除了近地层外垂直速度比较小,3 月 17 日 22:00 ~ 18 日 00:00 明显增强(图 5). 上升运动增强首先出现在低层,风速的正值中心位于 500 m 左右的高度上. 随后,上升速度增大并且最大值中心升高至 1 100 ~ 1 500 m,而低层则减小. 3 月 18 日 00:30 以后,整个边界层垂直运动变弱. 强上升运动的作用在于将更多的、堆积在底层的污染物输送到高空,由于在垂直输送量增大的同时空中的通风性也伴随边界层偏南风急流的发展而增大,于是就加大了污染物向北的水平输送. 北京北部的山脉海拔高度在 1 200 m 以下,因此基本

不会有阻挡作用.

云高仪的探测结果证实了上述分析(图 6). 3 月 17 日 08:00 前,近地面层后向散射密度值很高,说明污染物主要堆积在底层,而且密度负值梯度最大值(近似代表混合层顶)在 200 ~ 400 m. 白天,其高度抬升,傍晚略降低. 19:30 以后,伴随着边界层中低层风速增大密度负值梯度最大值所在高度再度升高,并在 22:00 ~ 23:00 达到最高,午夜后降低,上述演变与图 4 一致. 随着负值梯度最大值高度的变化,后向散射密度的垂直分布也发生了改变. 09:00 以后,近地层密度减小、500 m 以上增大,直到 22:00 前散射密度最大值仍然在地面附近. 但是,此后 600 m 以下的密度快速减小,而且低密度区不断向上扩展. 与此同时,600 ~ 1 700 m 层内的密度却有所增大,其数值超过了边界层低层,呈现下低、上高的分布. 因此,随着边界层急流和上升运动的发展,后向散射密度负值最大梯度区高度升高、密度的高值带也从边界层下层抬升到上部,它所反映的混合层高度和高污染层的演变特征与基于气象资料分析的结果一致.

3.2.4 边界层急流的作用

边界层急流发展导致水平风的垂直切变加大,湍流扩散作用增强. 根据梯度输送理论,垂直方向上的湍流扩散系数 K 可写成:

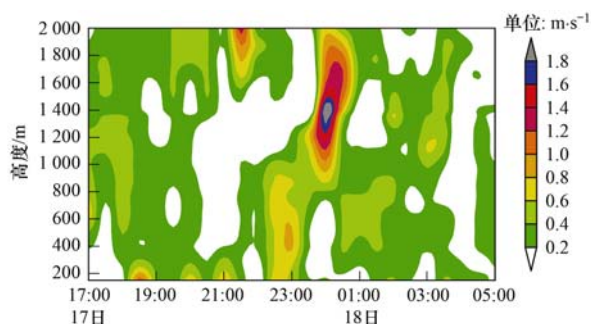
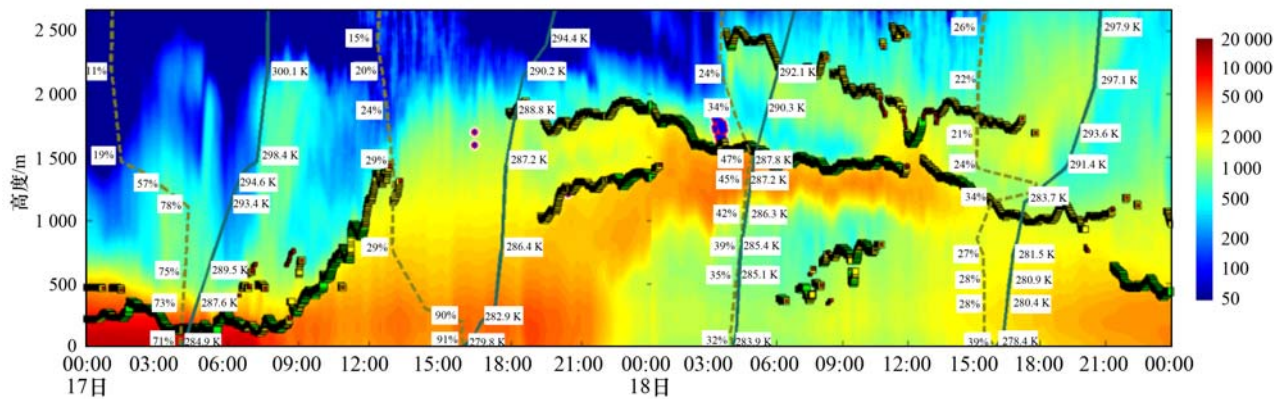


图 5 2015 年 3 月 17 日 17:00 ~ 18 日 05:00 垂直速度分布

Fig. 5 Distribution of vertical velocity from 17:00 on 17th to 05:00 on 18th Mar. 2015



图中黑色圆圈为后向散射密度负值梯度最大处;后向散射密度单位: $(10^5 \text{ srad} \cdot \text{km})^{-1}$

图 6 2015 年 3 月 17 ~ 18 日后向散射密度时间-高度图

Fig. 6 Time-height series of backward scatter density from 17th to 18th Mar. 2015

$$K \propto \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, u 和 v 分别为水平风的东向西和南北向分量, z 为高度, 即: 湍流扩散系数与水平风的垂直切变成正比. 由于垂直切变随高度是变化的, 为了反映边界层内的平均情况, 计算了 1520 m 以下层内 $\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ 平均值 (图 7). 3 月 17 日 18:00 风切变为 0.86 s^{-1} , 随着边界层内风速增大, 切变值也持续增加, 并在 3 月 18 日 00:00 达到最大值 2.6 s^{-1} , 是边界层急流开始发展时的 3 倍. 3 月 18 日 00:00 以后急流消失, 切变也明显减小. 因此, 急流发展导致边界层内平均湍流扩散系数增大, 环境大气对污染物的湍流扩散能力增强. 此外, 混合层顶的高度 D 与湍流扩散系数 K 之间存在以下关系:

$$D = \pi \sqrt{\frac{2K}{f}} \quad (3)$$

其中, $f = 2\Omega \sin \Phi$. 根据式 (3), 边界层急流发展导

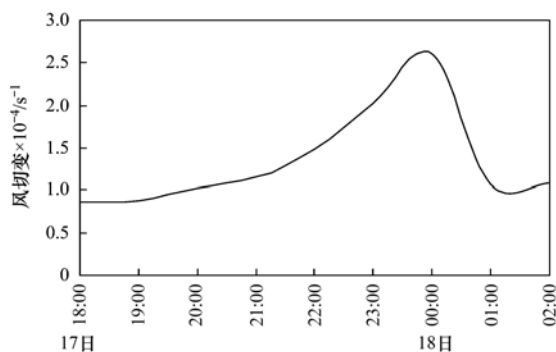


图 7 2015 年 3 月 17 日 18:00 ~ 18 日 02:00

1520 m 以下层内平均水平风切变

Fig. 7 Average wind shear below 1520 m from 18:00 on 17th to 02:00 on 18th Mar. 2015

致边界层平均湍流扩散系数增大, 由于 D 与 K 成正比, 因此混合层顶高度抬高也与边界层急流发展有关.

边界层顶的 Ekman 抽吸有助于产生上升运动, Ekman 层顶的垂直速度可写为:

$$W_D = \zeta_g \sqrt{\frac{K}{2f}} \quad (4)$$

式中, ζ_g 为边界层顶的地转涡度, f 和 K 同式 (3), 即: 如果边界层顶是气旋性涡度 ($\zeta_g > 0$), 则 Ekman 抽吸产生上升运动; 反气旋式涡度 ($\zeta_g < 0$), 反之. 利用 NCEP-NCAR 再分析资料计算了北京上空的地转涡度, 其中 3 月 17 日 20:00 1920 m 高度上的地转涡度 ζ_g 为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 根据式 (4) 可知, 此时 $W_D > 0$, Ekman 抽吸是向上的. 3 月 18 日 02:00 3000 m 以下的地转涡度均小于 0, 不利于边界层内出现上升气流. 因此图 5 中的上升运动可能与 Ekman 抽吸有关. 由于 NCEP-NCAR 再分析资料时间分辨率为 6 h, 而图 5 中的上升运动在 3 月 17 日 20:00 到 3 月 18 日 02:00 期间变化最明显, 受到资料的限制本研究只能对其形成机制作定性分析, 很难解释更细的演变特征. 此外, 由式 (4) 可知, Ekman 抽吸还与湍流扩散系数 K 成正比. 如前所述, 当边界层产生急流时, 由于水平风的垂直切变增大, K 就会加大, 从而导致 Ekman 抽吸加强.

综上所述, 边界层偏南风急流在 $\text{PM}_{2.5}$ 污染快速清除的过程中起着非常重要的作用, 与津、冀两地明显不同. 急流的发展导致边界层内水平通风性增强、平均湍流扩散作用增大、混合层顶升高、向上的 Ekman 抽吸加强. 于是, 堆积在近地面层的污染物被大的偏南风吹向北方的同时还随着上升气流向高空扩散并且被高层强劲的急流输送到下游, 这可

能是北京地区所有大气成分监测站 PM_{2.5} 浓度入夜后陡降的关键影响因素。而且,混合层增厚标志着大气容积增大,也是导致污染减轻的原因。

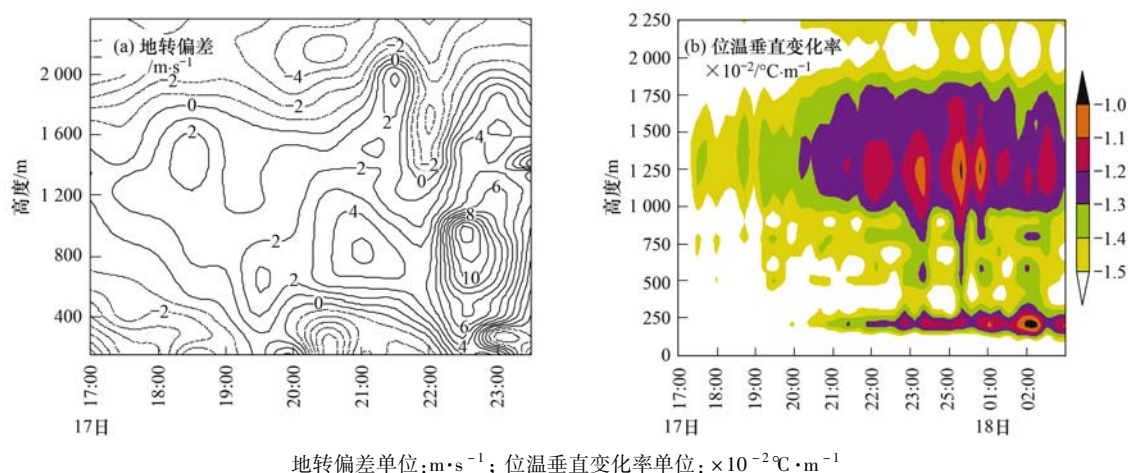
4 边界层急流的发展机制分析

边界层急流的发展机制有许多种解释^[29~32],本研究利用微波辐射计探测得到的温度廓线和 NCEP-NCAR 再分析资料讨论边界层急流形成的可能机制。

惯性振荡是解释边界层急流比较成功的理论之一,其核心是认为日落后边界层湍流减弱,湍流摩擦减小。此时尽管边界层底层仍然存在弱的湍流摩擦,风速保持次地转,但是上部湍流摩擦迅速消失,空气变成气压梯度力和科氏力平衡下的运动并出现超地转,而且在科氏力的作用下地转偏差以角频率 f 产生震荡并随高度顺转,其端点轨迹即是惯性圆。稳定的层结是边界层出现超地转的重要条件,因此边界层急流的发展常常与逆温层密切相关,而且两者出现的高度相近^[33]。

计算了 3 月 17 日 20:00 2 500 m 以下的地转风并得到了相应层次内的地转偏差[图 8(a)]。从 17:00 开始,1 200 ~ 1 500 m 高度上出现了正的地转偏差,随后超地转层向高空发展、厚度明显增大、地转偏差也逐渐增大。19:30 以后,地转偏差高值区主要位于 500 ~ 1 300 m 之间,并在急流形成时达到最大值。在此期间,对流层底层的大气逐渐趋于中性层结[图 8(b)]。 $d\theta/dz > -1.5 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 的

气层首先于 3 月 17 日 17:30 出现在 1 000 ~ 1 700 m 高度上,19:30 其厚度明显增大,下边界伸展到 400 m,上部超过 1 750 m。此后,750 ~ 1 700 m 层内的 $d\theta/dz$ 值继续增大,在 3 月 17 日 13:00 到 3 月 18 日 01:00 期间达到最大(最大值为 $-0.8 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$),层结接近中性。此外,20:30 以后在 200 m 左右高度上出现了另外一个位温垂直变化率的低值带,即在边界层急流发展期间近中性层结的气层呈双层结构。3 月 18 日 01:00 高层的 $d\theta/dz$ 略减小,而底层从 23:00 开始却有所增强。对比图 8 可知,与急流核对应的地转偏差正值中心恰好位于高层中性气层底的上方,与翟国庆^[33]的结果一致。而且,随着 $d\theta/dz$ 增大、大气层结趋于中性,地转偏差也在加大,两者在高度和时间上均有较好的对应关系。根据惯性振荡理论,边界层急流常出现在稳定层结下的原因在于:稳定层 ($d\theta/dz > 0$) 将低层大气分为两层,稳定层以下是受湍流影响的气层,稳定层以上湍流应力为 0,日落后该层内大气运动解耦出现显著超地转并形成急流。而且,稳定层内湍流很弱,也阻挡了急流的动量下传,有利于急流的维持。在本研究分析的个例中有深厚的近中性气层,该层内湍流发展所需要的正浮力很小,湍流非常弱,尽管不及强稳定层,但是仍然对湍流向高层运动起着限制作用,有利于边界层上部空气解耦。因此,午夜前后急流核分裂成两个可能是由于中性气层呈双层结构。上述分析表明,在 PM_{2.5} 污染快速清除中起着关键作用的边界层西南急流的发展与惯性振荡有关。



地转偏差单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 位温垂直变化率单位: $\times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$

图 8 2015 年 3 月 17 ~ 18 日地转偏差和位温垂直变化率

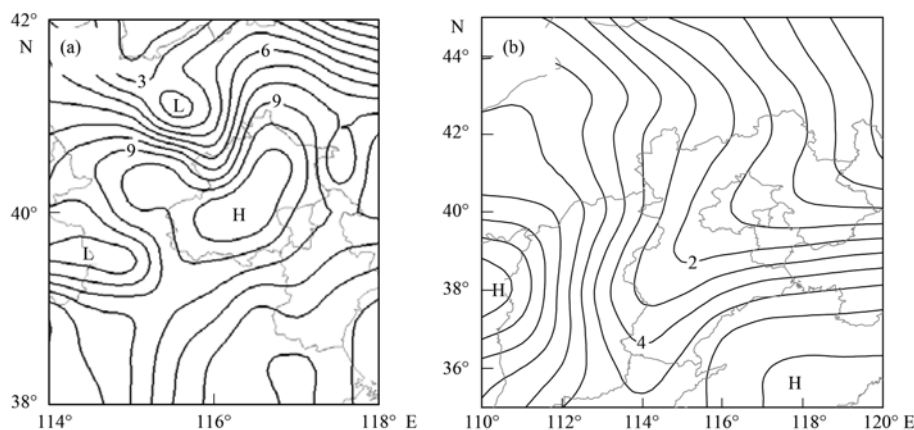
Fig. 8 Geostrophic difference and temperature lapse rate from 17th to 18th Mar. 2015

北京的地形呈西北高、东南低走势,山区多数测站的海拔高度在 400 ~ 500 m。根据地面观测,20:00 北京的大部分地区在 11°C 的暖中心控

制下,西部和北部山区的地面温度(海拔 400 ~ 500 m 的温度)为 $9 \sim 10^\circ\text{C}$ [图 9(a)],而微波辐射计探测平原地区 400 ~ 500 m 层内的温度为

7.7~7.1℃, 低于山区, 根据热成风原理, 该高度上的热成风为北风, 因此地形对边界层西南风急流发展没有正的贡献. 然而在 850 hPa 层面上 (当日该等压面高度 1 430 m), 有一个冷舌从河北东北部经北京伸向河北南部地区, 山东是暖中

心, 于是形成了自东南指向西北的温度梯度 [图 9 (b)]. 此时, 850 hPa 上的热成风应该为西南风, 与底层的地转风方向一致, 因此在大气斜压性的作用下西南风速将随高度增大, 有利于急流的发展.



(a) 地面, (b) 800 hPa; 单位:℃

图 9 2015 年 3 月 17 日 20:00 温度场

Fig. 9 Temperature field at 20:00 on 17th Mar. 2015

5 结论

(1) $\text{PM}_{2.5}$ 污染物快速清除主要与 4 方面因素有关. 首先, 日落以后边界层内有西南急流发展并在午夜前后达到最强, 增大了低层大气的水平通风量; 第二, 边界层内水平风垂直切变加大, 导致层内平均湍流扩散系数 K 增大, 湍流扩散增强; 第三, 混合层顶高度抬升, 大气容积增加; 第四, 边界层内的上升气流将底层污染物带到高空后被西南急流输送到下游地区. 此外, 在西南急流发展之前, 在冷空气的作用下天津和河北中南部的空气质量优于北京, 没有污染物的区域输送也是北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度能够持续降低的条件之一.

(2) 边界层西南急流发展是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速下降的关键因素. 除了加大通风量外, 湍流的强弱、混合层顶高度的变化以及空气的垂直运动均与它有关. 首先, 急流核的形成导致其上下邻近层内风切变增大, 进而使得湍流增强、混合层增厚; 其次, 边界层内的上升运动与 Ekman 抽吸有关, 因急流发展导致湍流的增强则有利于加大向上的 Ekman 抽吸.

(3) 边界层西南急流的发展机制在于惯性振荡和边界层上部大气的斜压性. 日落后, 2 000 m 以下大气层接近中性, 从而有利于边界层上部大气解耦后出现超地转. 此外, 边界层上部的热成风与底层的地转风同为西南风, 于是大气的斜压性使得偏南

风速随高度增大. 因此, 边界层西南急流的发展是多种因素共同作用的结果. 由于受到气象资料时间分辨率的限制, 本文仅对急流的形成机制作了定性讨论, 定量研究需要借助中尺度数值模拟来开展.

感谢: 中国科学院大气物理研究所的刘子锐为本研究的分析提供了资料支持, 在此表示感谢.

参考文献:

- [1] 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 等. 2013 年 10 月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析[J]. 环境科学, 2014, **35** (11): 4061-4069.
- [2] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014, **35** (6): 2031-2044.
- [3] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. 环境科学, 2015, **36** (4): 1154-1163.
- [4] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 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, 2014, **19** (2): 173-184.
- [5] 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 等. 高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究[J]. 环境科学, 2015, **36** (3): 801-808.
- [6] 郭利, 张艳昆, 刘树华, 等. 北京地区 PM_{10} 质量浓度与边界层气象要素相关性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, **47** (4): 607-612.
- [7] 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34** (2): 282-288.
- [8] 任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 夏秋季节天气系统对边界层

- 内大气中 PM₁₀ 浓度分布和演变过程的影响[J]. 大气科学, 2008, **32**(4): 741-751.
- [9] 刘咸德, 李军, 赵越, 等. 北京地区大气颗粒物污染的风向因素研究[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 1-6.
- [10] 贾海鹰, 程念亮, 何友江, 等. 2014 年春季山东省 PM_{2.5} 跨界输送研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2353-2360.
- [11] 周明煜, 姚文清, 徐祥德, 等. 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, 2005, **35**(增刊 I): 20-30.
- [12] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, **19**(1): 1-9.
- [13] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 1-11.
- [14] 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 924-930.
- [15] 刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 等. 秦皇岛大气污染物浓度变化特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2089-2097.
- [16] 孙杨, 王跃思, 刘广仁, 等. 北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO₂ 的垂直分布分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 408-414.
- [17] 李莉, 蔡璠琳, 周敏. 2013 年 12 月中国东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [18] 胡琳, 曹红利, 张文静, 等. 西安市环境空气质量变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(6): 150-153.
- [19] 康汉青, 朱彬, 樊曙先. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. 气候与环境研究, 2009, **14**(5): 523-530.
- [20] 王思源, 邵敏, 王伟. 北京市大气中的 VOCs 垂直分布的航测研究[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(7): 679-684.
- [21] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 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, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- [22] 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 等. 2006 ~ 2010 年珠三角地区 SO₂ 特征分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1530-1537.
- [23] 田伟, 唐贵谦, 王莉莉, 等. 北京秋季一次典型大气污染过程多站点分析[J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(5): 595-606.
- [24] 蒲维维, 赵秀娟, 张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 PM_{2.5} 污染的影响[J]. 应用气象学报, 2011, **22**(6): 716-723.
- [25] 贺千山, 毛节泰. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究[J]. 气象学报, 2005, **63**(3): 374-384.
- [26] 马福建. 用常规地面气象资料估算大气混合层深度的一种方法[J]. 环境科学, 1984, **5**(1): 11-14.
- [27] 李宗恺, 潘云仙, 孙润桥. 空气污染气象学原理及应用[M]. 北京: 气象出版社, 1985. 513-516.
- [28] 童志权. 大气环境影响评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 29-32.
- [29] 郝为锋, 苏晓冰, 王庆安, 等. 山地边界层急流的观测特性及其成因分析[J]. 气象学报, 2001, **59**(1): 120-128.
- [30] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学, 2005, **29**(3): 445-452.
- [31] 王东阡, 张耀存. 中国东部西南低空急流日变化特征及其机制[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(8): 2498-2507.
- [32] 罗德海. 地形对中尺度边界层急流的影响[J]. 大气科学, 1989, **13**(4): 491-496.
- [33] 翟国庆. 边界层急流及与逆温层的关系[J]. 杭州大学学报, 1990, **17**(2): 229-236.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行