

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 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.6

第40卷 第6期

目次

|                                                                    |                                                              |                       |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 北京城区大气金属元素干湿沉降特征                                                   | 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 | (2493)                |
| 北京城郊 PM <sub>2.5</sub> 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价                         | 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清                                 | (2501)                |
| 上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响                                | 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹                         | (2510)                |
| 天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析                                        | 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文                  | (2519)                |
| 典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征                                                | 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰                   | (2526)                |
| 垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征                                                 | 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲                                  | (2533)                |
| 天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析                                             | 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾                              | (2540)                |
| 霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测                                                    | 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚               | (2546)                |
| 宁东能源化工基地大气 PM <sub>2.5</sub> 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险                    | 刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民                                   | (2556)                |
| 2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM <sub>10</sub> 和 PM <sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估 | 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹                    | (2565)                |
| 1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型                              | 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄                                        | (2572)                |
| 北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析                                               | 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊                                           | (2582)                |
| 江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征                                                | 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮                                            | (2595)                |
| 亚热带稻区大气 NO <sub>2</sub> 、HNO <sub>3</sub> 及硝态氮污染特征及干湿沉降            | 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水                              | (2607)                |
| 长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源                                               | 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富                            | (2615)                |
| 基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建                                         | 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林                                       | (2624)                |
| 青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征                                                 | 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民                                      | (2631)                |
| 鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征                                                  | 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹                                  | (2639)                |
| 三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析                              | 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮                    | (2647)                |
| 水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响                                         | 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容                       | (2657)                |
| 水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示                                      | 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江                                            | (2667)                |
| 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价                                               | 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯                                 | (2675)                |
| 云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析                                             | 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽                                             | (2686)                |
| 鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征                                        | 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓                               | (2696)                |
| 合流制面源污染传输过程与污染源解析                                                  | 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛                    | (2705)                |
| 强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果                                               | 段进凯, 李田, 张佳炜                                                 | (2715)                |
| 水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响                                               | 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静                                   | (2722)                |
| 巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源磷的响应                                             | 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧                                             | (2730)                |
| 金盆水库沉积物磷的来源及分布特征                                                   | 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡                              | (2738)                |
| 水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征                                                | 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋                                       | (2745)                |
| 不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系                                    | 王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏                               | (2753)                |
| 表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律                                        | 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平          | (2764)                |
| 针铁矿改性生物炭对砷吸附性能                                                     | 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷                                   | (2773)                |
| 改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制                                            | 史月月, 单锐, 袁浩然                                                 | (2783)                |
| 厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性                                           | 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国                                  | (2793)                |
| 污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除                                                | 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激                                    | (2800)                |
| 碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响                                                  | 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun                       | (2807)                |
| 活性污泥物理结构对呼吸过程的影响                                                   | 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳                                   | (2813)                |
| 好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性                                               | 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔                                   | (2821)                |
| 快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素                                          | 刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽                                      | (2827)                |
| 生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO <sub>3</sub> 排放影响                              | 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚                                   | (2840)                |
| 曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N <sub>2</sub> O 排放的影响及其微生物机制                       | 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳                                        | (2847)                |
| 不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响                                        | 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉                               | (2858)                |
| 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价                                           | 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌                           | (2869)                |
| 西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征                                          | 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕                           | (2877)                |
| 基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析                                   | 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞                                       | (2885)                |
| 喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价                                            | 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰                                        | (2895)                |
| 黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征                                     | 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑                                     | (2904)                |
| 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响                                       | 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳                       | (2912)                |
| 生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响                                            | 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇                                     | (2920)                |
| 稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程                                       | 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军                                 | (2930)                |
| 纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响                                         | 伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌                                        | (2939)                |
| 农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究                                     | 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩                                       | (2948)                |
| 污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响                                              | 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳                                              | (2954)                |
| 《环境科学》征订启事 (2929)                                                  | 《环境科学》征稿简则 (2947)                                            | 信息 (2646, 2656, 2857) |

# 北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析

王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊

(北京城市气象研究所, 北京 100089)

**摘要:** 2017年5月3~5日, 北京发生一次特别的重污染过程, 与之相配的气象条件较为特殊, 对污染形态和成因展开研究。基于北京35个环境监测站和与之最近的35个自动气象站, 获取本次污染过程的总体特征及 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 浓度与地面风场的匹配形态; 利用MODIS和CALIPSO研究污染空间分布、输送路径、污染物类别; 根据欧洲中期天气预报中心ECMWF第三代再分析资料ERA-Interim及风廓线雷达数据研究污染成因。以期以地-空立体监测技术手段配合气象条件得到本次污染特有的形态特征和影响因素。结果表明, 利用以上多源数据, 对本次污染进行立体观测和综合分析, 能较好地反映污染特性和受制因素。本次污染骤然开始, 陡然下降, 持续约30h, 整个过程 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 浓度高, 分别可达 $600 \sim 1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $200 \sim 700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。全过程分为三段, 前半段、间歇期、后半段。前、后半段污染成因以及由此造成的 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 浓度在空间分布上各有特点。前半段主导风向为西北风, 风速小,  $PM_{10}$ 浓度空间差异小, 在 $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 而 $PM_{2.5}$ 浓度空间差异大, 南部和城区高, 达 $600 \sim 700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其余地方低, 在 $350 \sim 500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。间歇期低层风向从西北风切变为南风, 高层维持西北风, 南部和城区 $PM_{10}$ 浓度下降明显, 到 $650 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 北部依然在 $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 而此时北部 $PM_{2.5}$ 浓度甚至降到 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。后半段主导风又回到了西北风, 且风速激增, 此时 $PM_{2.5}$ 浓度空间差异小且同一站点的浓度均小于前半段, 在 $250 \sim 500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。而 $PM_{10}$ 浓度又回到了 $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水平。说明本次过程属典型霾-沙混合型污染。在偏西气流的影响下, 对北京污染的主要贡献是沙尘型的 $PM_{10}$ , 而在偏南气流下, 对北京污染的贡献除了沙尘外, 还有 $PM_{2.5}$ 。污染重的同时, 风速也大, 大气垂直运动交汇于大约2~3 km高度, 在此高度层内有大量污染物累积。

**关键词:** 污染特征; 霾-沙混合; 地-空监测; 天气分析; 北京

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2582-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809039

## Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring

WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, DOU You-jun

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

**Abstract:** From May 3 to 5, 2017, a special heavy pollution event occurred in Beijing. The meteorological conditions associated with the heavy pollution were relatively special, so the pollution forms and causes were studied. The general characteristics of this pollution event were obtained based on data from 35 environmental monitoring stations in Beijing. Matching characteristics of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  concentrations with ground wind field data from automatic weather stations closest to the environmental monitoring stations were analyzed. By using MODIS and CALIPSO data, the spatial distribution in the horizontal and vertical directions was obtained, and the transport paths and pollutant categories of the pollution were elucidated. The causes of the pollution were analyzed by using ECMWF ERA-Interim data and Wind Profiler radar data. It was hoped that the special morphological characteristics and influencing factors of the pollution could be obtained by means of ground-space monitoring technology combined with meteorological conditions. The results showed that pollution characteristics and constraints could be better reflected by stereo observations and comprehensive analyses based on the above multi-source data. The pollution started abruptly and dropped sharply, and the pollution process lasted for about 30 hours. The whole process was divided into the following three stages: the first half, intermittent period, and second half. The concentrations of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  were high throughout the whole process, reaching to  $600 \sim 1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $200 \sim 700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. The causes of pollution in the first half and second half and the resulting  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  concentrations were different in terms of the spatial distribution. In the first half, the dominant wind direction was northwest wind, and the wind speed was small. The spatial difference of  $PM_{10}$  concentrations was also small, with concentrations more than  $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; meanwhile, the spatial difference of  $PM_{2.5}$  concentrations was great. The concentration of  $PM_{2.5}$  was high in the south and urban areas, reaching to  $600 \sim 700 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and it was low in other places, reaching to  $350 \sim 500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . During the intermission, the wind direction in the lower layer shifted from northwest wind to south wind, and the upper layer maintained northwest wind. The concentration of  $PM_{10}$  in the south and urban area decreased obviously to  $650 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and the concentration of  $PM_{10}$  in the north remained at  $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . At this time, the concentration of  $PM_{2.5}$  in the north even dropped to  $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . The dominant wind returned to northwest wind in the latter half, and the wind speed increased sharply. At this time, the spatial difference of  $PM_{2.5}$  concentrations was small and the concentration of  $PM_{2.5}$  at the same station was less than that in the former half, ranging from  $250$  to  $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . The  $PM_{10}$  concentrations returned to the level of  $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . The pollution process involved mixed pollution consisting of haze and sand. Under the influence of westerly winds, the main

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-12-07

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(8171002); 国家自然科学基金项目(41575010)

作者简介: 王耀庭(1976~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染和环境遥感, E-mail: ytwang@ium.cn

contribution to Beijing pollution was dust-type  $PM_{10}$ , while under southerly flows, the contribution to Beijing pollution was not only dust, but also  $PM_{2.5}$ . Heavy pollution was accompanied by high wind speeds. The vertical motion of the atmosphere converged at an altitude of about 2-3 km, which resulted in the accumulation of pollutants at this altitude.

**Key words:** pollution characteristics; haze-sand mixing; ground-space monitoring; weather analysis; Beijing

大气气溶胶是指悬浮在大气中粒径在几 nm 到几十  $\mu m$  之间的各种固体和液体粒子. 通过与辐射的相互作用, 对能量收支进行调节, 最终对气候系统产生影响. 除了灰霾是气溶胶的一个主要来源之外, 沙尘也是大气气溶胶的一个重要来源, 对大气有很强的加热或冷却作用, 能够改变大气的热力状况, 影响大气动力结构<sup>[1]</sup>, 进而影响气候变化; 另外沙尘气溶胶的垂直分布是研究沙尘对大气辐射强迫作用的一个重要特性<sup>[2]</sup>.

严重的灰霾、沙尘天气一旦形成往往很难及时消散, 不仅对人类生产生活和生态系统均造成一定危害, 并严重影响空气质量<sup>[3, 4]</sup>. 重污染对居民身体健康造成严重威胁, 而且引起的能见度下降也对城市的各项经济活动和市民生活带来显著影响<sup>[5]</sup>, 产生较强的社会负面效应<sup>[6]</sup>. 因而国内外学者围绕灰霾、沙尘天气在各个方面的影响展开研究, 获得丰硕的研究成果. 比如有学者对城市雾、霾的气候特征、微物理特征及其理化特性等方面进行了较多研究<sup>[7~11]</sup>. 有学者在起沙机制、沙尘组分物理化学特性及环境气候效应等方面均进行了大量研究<sup>[12~15]</sup>. 有众多学者在气溶胶垂直分布方面开展了科学研究. 因为要对沙尘气溶胶辐射特性有深入研究, 必须先对其物理、化学及光学特性的垂直分布有很好地了解. 同样基于数值模式定量模拟和研究沙尘的发生、输送、扩散、沉降, 也需要很好地了解气溶胶垂直分布情况<sup>[16]</sup>. 激光雷达是现阶段大气气溶胶各项光学性质、空间垂直分布以及相关信息的有效遥感技术<sup>[17]</sup>, 它是以激光为光源, 通过探测激光与目标物相互作用而产生的辐射信号来源遥感目标物<sup>[18]</sup>. Sugimoto 等<sup>[19]</sup>对 2008~2009 年东北亚地区多点位春季沙尘污染的时空分布、沙尘层垂直结构及传输路径进行了分析, 并发现受一定条件下大气结构影响, 存在沙尘与地面污染混合现象. 姜学恭等<sup>[20]</sup>利用 CALIPSO 星载激光雷达探测资料对 2010 年 3 月 19~22 日强沙尘暴过程不同阶段沙尘垂直分布特征进行了初步分析, 探讨了沙尘在对流层-平流层内的远距离输送.

当前, 多数沙尘污染研究主要是利用卫星资料研究沙尘的区域分布、沙尘路径, 或基于地基激光雷达研究单点气溶胶垂直廓线形态. 随着近年来北京乃至全国频繁出现的灰霾污染成为关注热点, 在依赖大风破除污染的同时, 忽略了春季大风既能带

来沙尘污染, 也能引起本地霾污染的影响, 对此类霾-沙交替污染和混合污染的垂直立体观测和深入探讨较少.

本文研究了 2017 年 5 月 3~5 日北京地区入春以来的第一次霾-沙交替以及霾沙混合的强污染过程, 本次霾-沙污染天气的发生, 除内在的大气污染物源排放因素外, 很大程度上依赖于气象条件<sup>[21]</sup>, 这是因为大气对污染物的稀释扩散能力受气象条件影响非常明显, 在不同气象条件下, 同一污染源的排放所造成地面污染物浓度可能有几十倍甚至上百倍的差别<sup>[22]</sup>. 本研究采用“地-空”观测结合对污染空间水平分布特征、垂直分布特征进行探讨和分析, 并利用地面污染监测数据和气象数据对本次污染的气象条件展开分析, 探讨气象条件对霾-沙天气的影响, 能够科学地预测、动态调控污染物排放以治理雾-霾天气, 是一项十分重要课题<sup>[23]</sup>, 以期城市气溶胶污染过程的光学特性和空气质量预报研究提供例证和比对, 对城市污染治理提供科学支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 地面观测数据

本研究采用的地面观测数据有两类, 第一类为地面环境监测数据. 数据来自北京市环境保护监测中心发布的逐时浓度数据(<http://zx.bjmemc.com.cn>), 共计 35 个环境站点的  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  浓度, 监测站点覆盖所有区, 包括区域背景、郊区、城镇、交通干道、居住区等不同的环境功能类型. 第二类为自动气象站监测数据. 选取了与 35 个环境监测站距离最近的 35 个自动气象站观测数据.

### 1.2 空间观测数据

#### 1.2.1 第一类空间数据: MODIS 数据

采用的第一类空间观测数据为 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 卫星遥感标准数据产品中的二级大气气溶胶产品 MOD04\_L2. NASA 的科学家团队已经发展了较为成熟的从 MODIS 影像上反演气溶胶光学厚度 AOT (aerosol optical thickness), 也有称之为 AOD (aerosol optical depth) 的业务算法. 当前 MODIS 卫星产品(含 Terra 和 Aqua)版本已经从 2000 年最初的 C001 版本更新到 2017 年的 C061 版本, 是目前最新的产品版本. 详细内容参考官方网址 <https://>

modis-atmosphere. gsfc. nasa. gov. MODIS 气溶胶产品在不同的地表类型上采用了 3 种不同的反演算法. 即两种暗目标法 (dark target, DT), 主要用于海洋和植被覆盖区或黑土, DT 算法能以较高的精度实现这些地区的气溶胶反演, 但在城市和稀疏植被地区气溶胶反演精度整体较差, 有效观测天数较少; 第三种算法是深蓝算法 (deep blue, DB). 该方法主要用于沙漠/荒地, 算法具体描述见文献 [24, 25]. MODIS C060 版气溶胶产品于 2014 年初发布, 包含了第二代 DB 算法、DT 算法和数据融合产品. 第二代 DB 算法是一个加强混合算法, 适用区域从沙漠、干旱半干旱等高亮区域扩展到了浓密植被覆盖等暗区域, 实现了对整个陆地区域的覆盖, 弥补了 DT 算法的不足, 使得气溶胶产品范围和空间连续性上都得到明显提升. 以深蓝算法为例, C061 版本算法上的核心部分与 C060 版本的一致, 也叫增强型深蓝算法, 相比于 C060 版本, 在算法方面的更新和改进主要体现在 6 个方面: ①对浓烟的有效探测, ②在人工解译复杂地表时, 解译误差明显降低, ③对大片不平整地区 (如山区), 采用的地表模型更加科学, ④修复了众多 bug, 并对区域的/季节的气溶胶模型方案做了改进和更新, ⑤对元数据改进, 并采用了改进后的产品质量控制算法 [26], ⑥将深蓝算法和暗目标算法分别得到的气溶胶产品进行了融合 [27]. 详细内容可以参考网页 <https://deepblue.gsfc.nasa.gov/>. C061 版本在气溶胶光学厚度反演精度方面有明显提高. 本研究采用了 MOD04\_3K 和 MOD04\_L2 的产品.

### 1.2.2 第二类空间观测数据: CALIPSO 卫星数据

采用的第二类空间观测数据为 CALIPSO 卫星数据. CALIPSO 是 A-train 星系里的一颗极轨卫星, 于 2006 年 4 月 28 日成功发射, 高度 705 km 的极轨太阳同步轨道运行, 轨道倾角约为 98°, 分别于当地时间 01:30 和 13:30 穿越赤道, 16 d 循环一圈, 运行周期为 99 min. CALIPSO 卫星由 3 部分仪器构成: 双波长偏振激光雷达 (cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization, CALIOP), 红外成像辐射计 (imaging infrared radiometer, IIR) 和宽幅照相机 (wide field camera, WFC). 自发射以来, CALIOP 不间断地收集 82°N 和 82°S 之间气溶胶和云在波长 532 nm 和 1064 nm 上的衰减散射系数和波长 532 nm 极化后向散射系数高分辨率廓线. CALIPSO 设备参数以及数据说明文档等信息可以参见官网 <https://www-calipso.larc.nasa.gov/>. 目前 CALIPSO 星载激光雷达资料主要包括了 Level1 及 Level2 两级数据产品. L1 数据水平分辨率为 333

m, 垂直方向上, 从海拔 -2.0 ~ 40 km 共分为 583 层, 提供 532 nm 和 1064 nm 这两个波段在运行轨道上对地方向的总后向散射垂直廓线以及 532 nm 波段的线性退偏垂直廓线. 本文主要是应用 CALIPSO 的 Level 1B 中 532 nm 的总衰减后向散射系数信号, 即经过校准和距离校正后的后向散射回波信号. 其次是 CALIPSO 独有的产品 VFM (vertical feature mask).

星载激光雷达的总后向散射系数可以定义为公式 (1):

$$\beta'_\lambda(z) = \frac{P(z)z^2}{C} = [\beta_{m,\lambda}(z) + \beta_{p,\lambda}(z)] \times T_{p,\lambda}^2(z, z_s) \times T_{m,\lambda}^2(z, z_s) \times T_{ozn,\lambda}^2(z, z_s) = \beta(z, \lambda) T^2(z, \lambda) \quad (1)$$

式中,  $P(z)$  为雷达接受的高度  $z$  处的信号,  $C$  为雷达系统常数,  $\beta$  为后向散射系数,  $T^2(z)$  为大气透射率,  $z_s$  为卫星所在的高度, 下标 p、m、ozn 分别表示粒子 (气溶胶)、大气分子和臭氧,  $\lambda$  为波长, 为 532 nm 和 1064 nm. 臭氧浓度廓线数据和吸收截面数据来自 GMAO 模型, 大气分子的散射和消光系数根据 Rayleigh 散射理论计算 [28]. 衰减后向散射的定义可以用公式 (2)、(3) 表示:

$$\beta'_{532}(z) = [\beta_{532,\parallel}(z) + \beta_{532,\perp}(z)] \times T_{532}^2(z) \quad (2)$$

$$\beta'_{1064}(z) = \beta_{1064}(z) \times T_{1064}^2(z) \quad (3)$$

式中,  $\beta_{532,\parallel}(z)$ 、 $\beta_{532,\perp}(z)$  分别为 532 nm 波段上的平行通道和垂直通道后向散射系数.

### 1.3 气象数据

研究采用两种气象数据, 第一种来自欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) 第三代再分析资料 ERA-Interim. ERA-Interim 提供了自 1979 年以来的再分析资料, 并实时更新. 相比于第二代 ERA-40 数据同化模型, ERA-Interim 采用了四维变分分析, 并结合改进的湿度分析、卫星数据误差校正等技术, 实现了再分析资料质量的提升. 本研究采用欧洲中期天气预报中心提供的 2017 年 5 月 3 ~ 8 日时段、空间 0.125° × 0.125° 网格分辨率、逐日 4 次 (UTC 时间 00:00、06:00、12:00、18:00) 分析数据. 支星等 [29] 利用中国 105 站的探空资料对 NCEP/NCAR、ERA 和 JRA 3 种再分析资料温度要素的可信度进行了分析, 结果表明 NCEP/NCAR 资料在对流层上层更接近于探空资料, ERA 资料和 JRA 资料在对流层中下层与探空资料更为接近. 第二种气象数据是北京海淀站的风廓线雷达观测数据和地面天气系统观测数据.

2 结果与讨论

2.1 本次污染过程的总体特征

2017年5月3~5日,包含北京在内的大范围区域发生了一次高强度大气污染过程.将北京35个站点(站点分布见图1)观测的小时浓度数据经过质控和平均计算后,得到一个整体的小时浓度值,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度随时间变化见图2,其中除了PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>小时浓度之外,还添加了AQI、PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>和污染等级随时间变化.

从图2看出,本次污染特点是持续时间短、强度大,是2017年开年以来的一次较为严重的大气污染.从5月3~6日,整个污染过程中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度随时间变化呈现出非常好的一致性,且

PM<sub>10</sub>的浓度高于PM<sub>2.5</sub>浓度.本次污染从5月4日04:00开始,属于暴起,PM<sub>2.5</sub>在400~500 μg·m<sup>-3</sup>之间,PM<sub>10</sub>则在1 000 μg·m<sup>-3</sup>左右,AQI一直维持在最大值500,污染等级在6级,属于严重污染等级.污染持续约30 h,到5月5日08:00时,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>污染物浓度骤然降低,从08:00~11:00,PM<sub>10</sub>浓度依次为858、623、349和152 μg·m<sup>-3</sup>,PM<sub>2.5</sub>依次为376、245、122和92 μg·m<sup>-3</sup>.AQI回到100以内,污染等级回到1级的良好状态.在整个污染持续期,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>维持在0.4~0.5之间,比较稳定.而在污染发生前或者污染结束之后,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>比值波动大,在0.5之上,甚至达到1.0.从PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>比值在污染前期、结束期和污染期间的变化,说明本次污染不是一次单纯的输送型沙尘污染,中间配合着局地污染,属于典型的霾-沙混合污染.因为在单纯的沙尘暴过程中,PM<sub>2.5</sub>在PM<sub>10</sub>中的比例很低<sup>[30]</sup>.从大的气象环境来说,一般沙尘和霾两种天气现象确实不容易并存.因为沙尘出现往往因为冷空气强盛,风速大容易起沙并造成沙尘天气.相反,在这种条件下,由于扩散条件有利反而容易清除霾,所以沙尘一般不容易跟霾同时出现<sup>[31]</sup>.

2.2 PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度在水平空间上随时间变化特征

根据35个地面监测站点观测数据,分析PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度在空间上随时间变化,更能清晰地看到本次污染呈现出的特点,见图3.

图3为PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>浓度随时间和空间变化

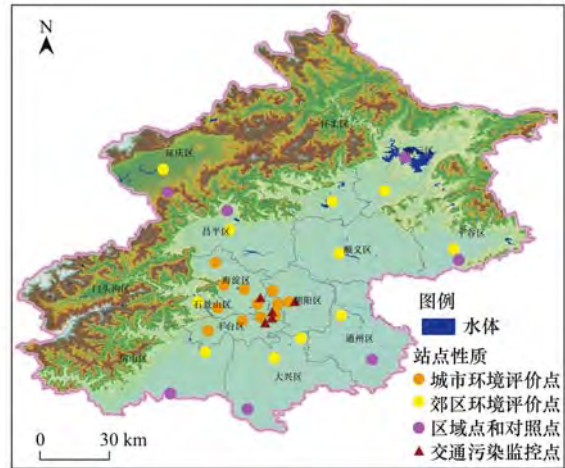


图1 污染物观测站点分布示意  
Fig. 1 Distribution of the pollutant observation sites

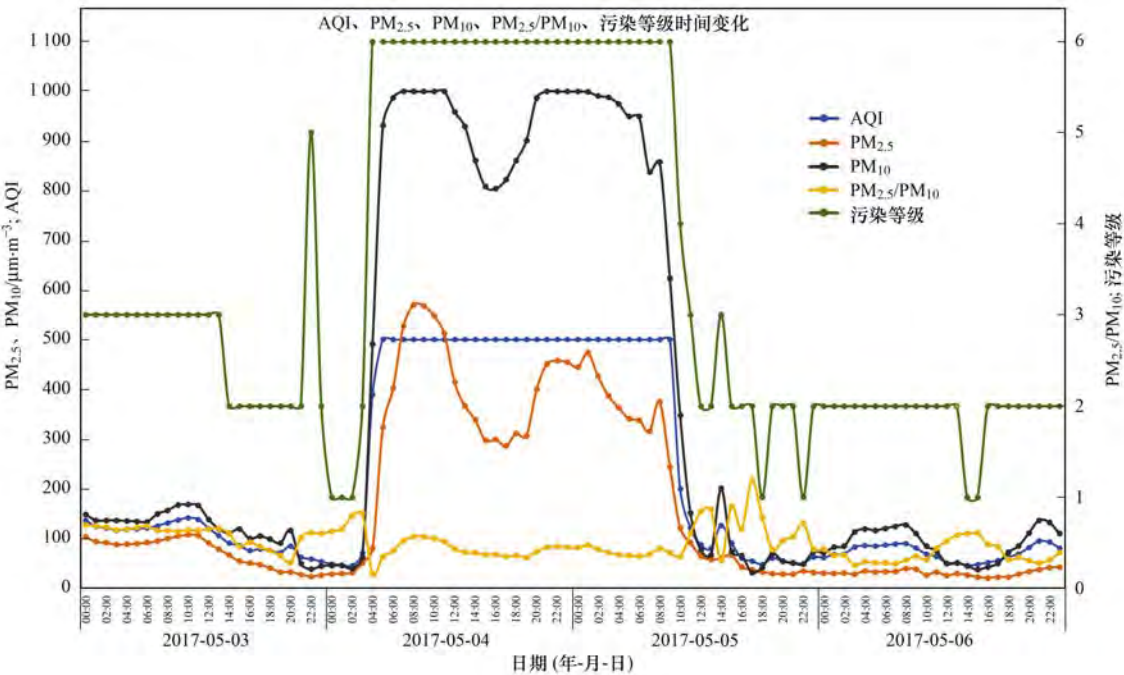


图2 2017年5月3~6日北京站点5个要素小时均值随时间变化  
Fig. 2 Time-varying hourly mean of several elements from 2017-05-03 to 2017-05-06 based on Beijing station data

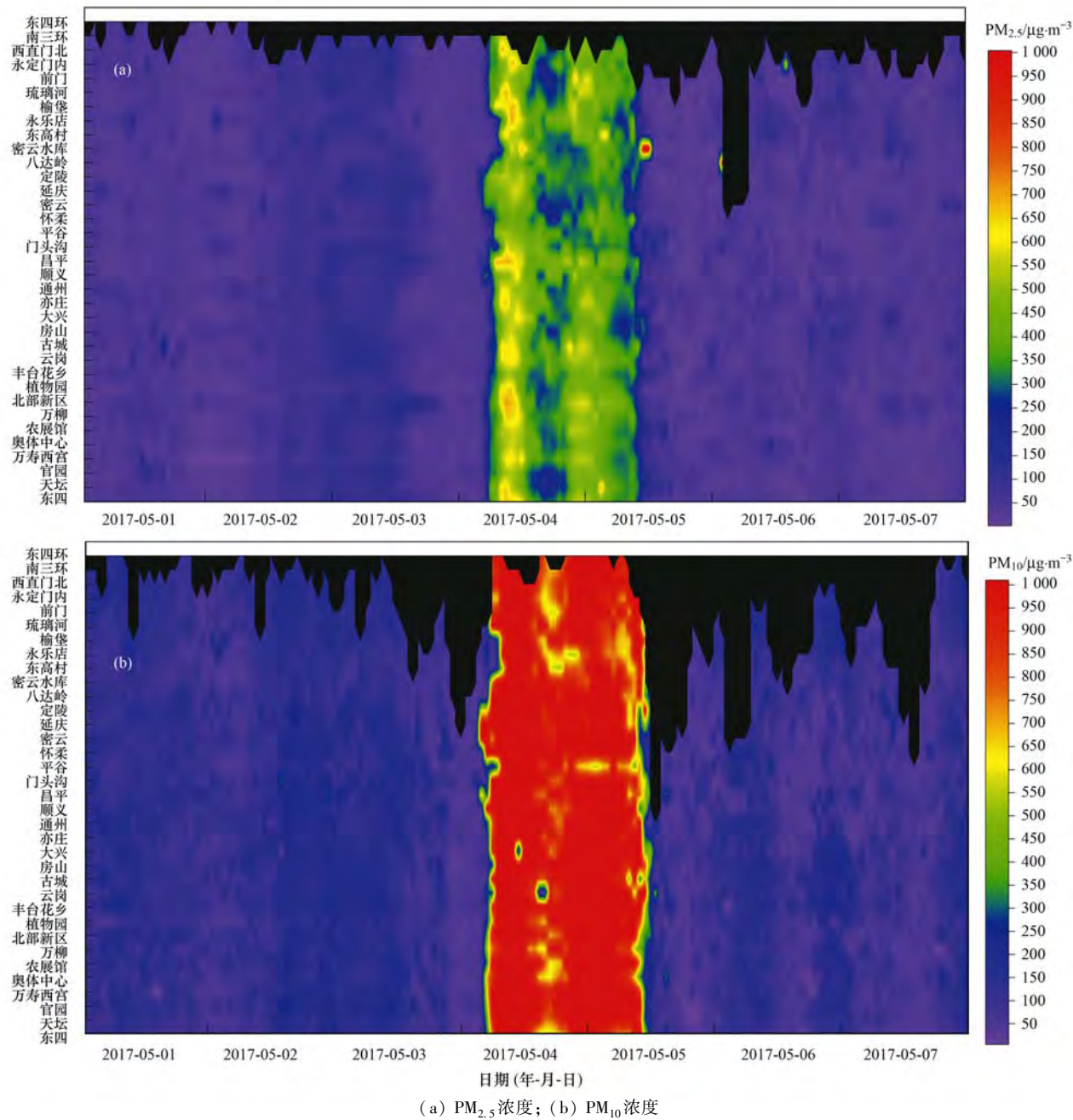


图3 2017年5月1~7日北京35个空气质量自动监测站观测的PM<sub>2.5</sub>浓度和PM<sub>10</sub>浓度时空分布

Fig. 3 Temporal-spatial variations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations from May 1 to 7, 2017, according to data observed at 35 automatic air quality monitoring stations in Beijing

分布,其揭示了本次污染过程呈现出4方面的科学现象.第一,污染浓度高,程度重,属于重度污染.第二,本次污染骤起速降,持续时间大约30 h,其间存在一个明显的污染间歇期.以此为界限,将污染过程分为三段,之前为污染前半段,持续时间为5月4日04:00~13:00,相对间歇期持续时间为13:00~19:00,之后为污染后半段,持续时间为19:00到5月5日08:00.第三,每一段呈现出的污染空间分布形态有很大差异.就前半段污染在空间上呈现出的特点而言,全部站点监测的PM<sub>10</sub>浓度在800  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,而PM<sub>2.5</sub>浓度

在空间上呈现出了差异性.北京北部区域,诸如西到延庆站、八达岭站,东到平谷站等,PM<sub>2.5</sub>浓度值为相对低值,在350~550  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 间,在南部和城区,PM<sub>2.5</sub>浓度值较高,在550~750  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 间.到了污染间歇期,PM<sub>10</sub>浓度在城区和南部区有所降低,降到了650  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,北部区域几乎未发生变化,依然保持在800  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.此时PM<sub>2.5</sub>浓度均有明显下降,尤其在城区和北部区更为明显,如延庆、天坛等站降低到了200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近.或许说明此时在风力的作用下,有沙尘向北部输送,同时在风力的作用下,对局地

的霾污染有清除作用. 到了污染的后半段,  $\text{PM}_{10}$  浓度又恢复到和前半场一样的水平, 除了最南部的琉璃河、榆堡、永乐店和最东部的平谷测站比前半场浓度低.  $\text{PM}_{2.5}$  浓度空间分布也表现出明显的特性, 同一站点的浓度都比前半场的低, 且全区域都比较均衡, 不同于前半段所呈现出具有明显的空间差异性特征. 这种前后半段污染物浓度在空间上的分布差异预示着前后半段的污染成因存在明显差别. 第四,  $\text{PM}_{10}$  浓度降低起步时间比  $\text{PM}_{2.5}$  晚 5 h 左右.

2.3 基于卫星监测的污染空间分布特征

2.3.1 MODIS 卫星监测污染水平空间分布

图 4 为 MODIS 标准二级大气产品 MOD04\_3K

中的 2017 年 5 月 4 日 550 nm 处 AOT 空间分布. AOT 不仅能定性地描述污染形态, 也能定量地描述污染程度<sup>[32, 33]</sup>. 图 4 中的结果是将暗目标法和深蓝算法得到的 0.55  $\mu\text{m}$  处的 AOT 进行了融合. 为了分析污染分布空间特征以及周边区域对北京污染的影响, 图 4 中显示了全国区域和北京周边部分. 从中看出, 北京区域: 5 月 4 日, 北京处于高 AOT, 整个区域  $\text{AOT} > 1.00$  北京城区为相对小的 AOT 覆盖区, 北京北部地区  $\text{AOT} > 2.50$ , 明显比南部地区 AOT 大. 北京周边区域: 北京南边和东边同样被高 AOT 值覆盖, 大范围区域  $\text{AOT} > 2.00$ . 离北京略远的内蒙中部也有高 AOT 值存在,  $\text{AOT} > 1.50$ .

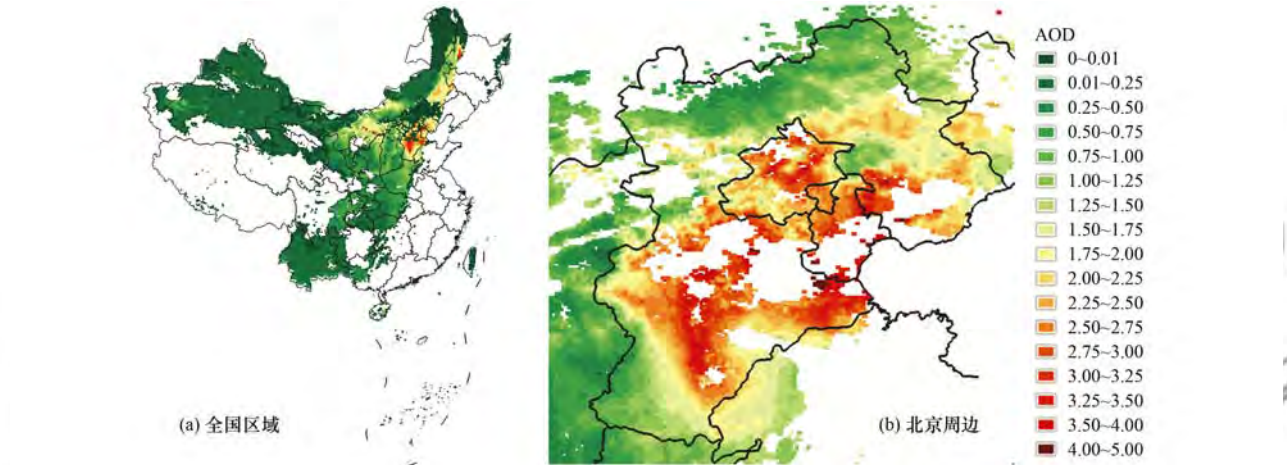
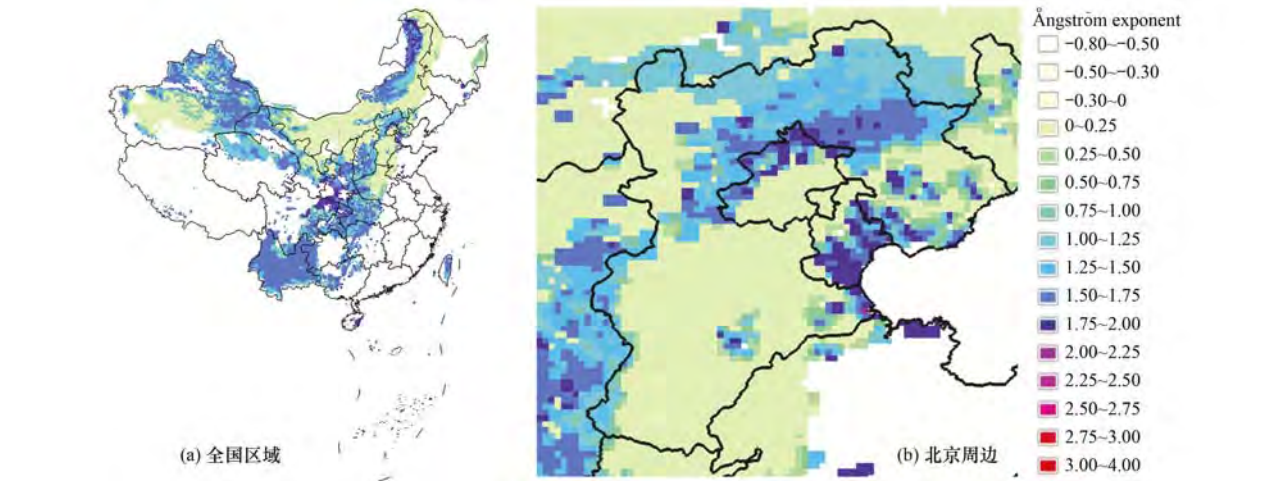


图 4 2017 年 5 月 4 日 550 nm 处空间分辨率为 3 km 的气溶胶光学厚度空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of AOT\_550 nm for the land and ocean(3 km resolution) on May 4, 2017

图 5 为 2017 年 5 月 4 日 MOD04\_L2 产品中的 Ångström exponent 空间分布. 利用 412/470 nm 两波段计算亮地表下垫面上的 Ångström exponent, 470/650 nm 波段计算植被覆盖区下垫面的

Ångström exponent, 再将二者融合. 有研究表明<sup>[34, 35]</sup>, 北京灰霾天气时 Ångström exponent 范围在 0.9 ~ 1.4 之间. 城市或工业气溶胶粒子 Ångström exponent 分布位于 1.1 ~ 2.4 之间, 这个



计算用的波段为 412/470 nm 和 470/650 nm

图 5 2017 年 5 月 4 日 Ångström exponent 空间分布

Fig. 5 Distribution of the Ångström exponent for land on May 4, 2017

范围所对应的粒子通常为细粒子. 沙尘气溶胶 Ångström exponent 一般为  $-1.0 \sim 0.5$  之间. 据此研究成果, 从图 5 可以看出, 北京地区: 南部区域 Ångström exponent 为  $-0.5 \sim 0.5$  之间, 为沙尘型气溶胶, 从图 4 的 AOT 分布图上也能明显地看到此区域的 AOT 值较高, 从地面天气系统实际观测记录也验证了此区域为浮尘和沙尘. 北部一部分区域 Ångström exponent 为  $1.5 \sim 2.0$ , 为细例子污染, 还有一小部分 Ångström exponent 在  $0.5 \sim 1.0$ , 则为灰霾污染.

综合图 4、图 5, 通过卫星监测反演结果能清晰地看到本次污染物在空间上分布特点和污染特征, 即属于典型的沙-霾型混合污染形态.

### 2.3.2 基于 CALIPSO 卫星数据的污染垂直结构特征分析

为了研究本次污染在垂直方向上的分布特征, 采用了 2017 年 5 月 4 日 Calipso 卫星的 L2 产品. 数据采集时间为 UTC 时间 2017-05-04T05:06 ~ 05:19, 对应于北京时间为 2017-05-04T13:06 ~ 13:19. 由于 Calipso 卫星于 5 月 4 日未能有效穿过北京上空, 只能选择包含北京纬度区域的观测数据进行分析研究, 见图 6 和图 7 中紫色框. 基于 Calipso 数据的 VFM 产品将气溶胶细分为若干个子类, 即: 海洋型气溶胶、沙尘型、污染大陆型/烟、洁净大陆型、污染沙尘型、烟尘型、污染海洋型、极地平流层气溶胶、火山灰型、硫酸盐类型/其它, 对应图 7 中图例的 1 ~ 10.

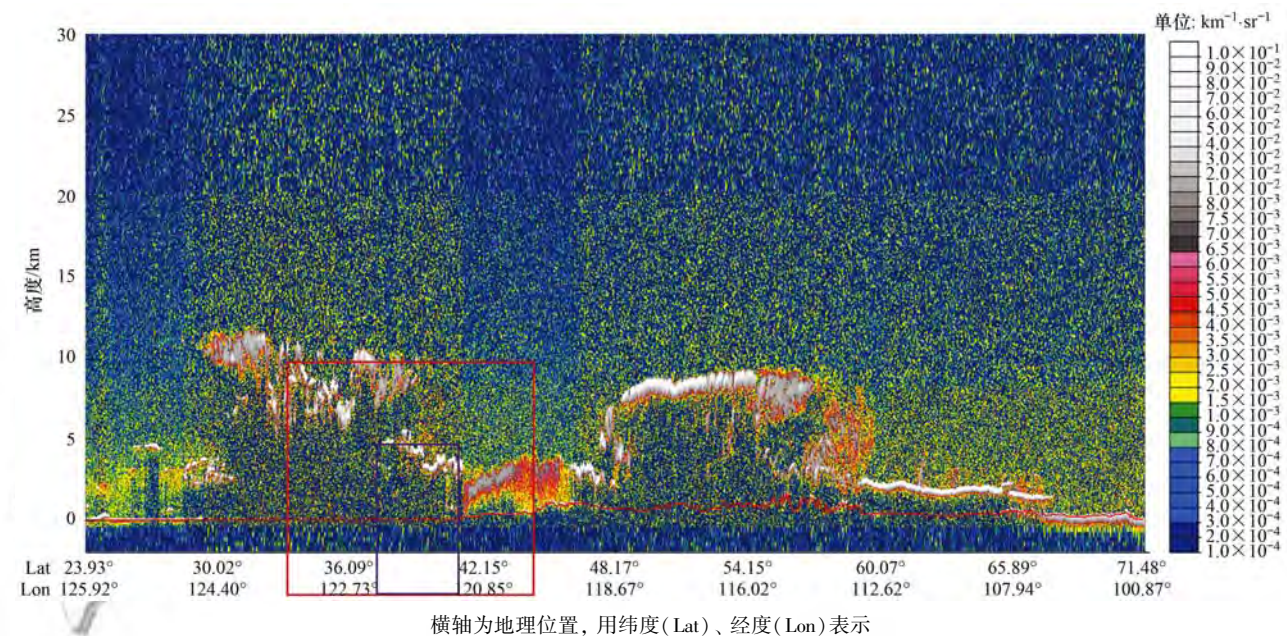


图 6 532 nm 上的总后向散射(2017-05-04)

Fig. 6 Total attenuated backscatter at 532 nm on May 4, 2017

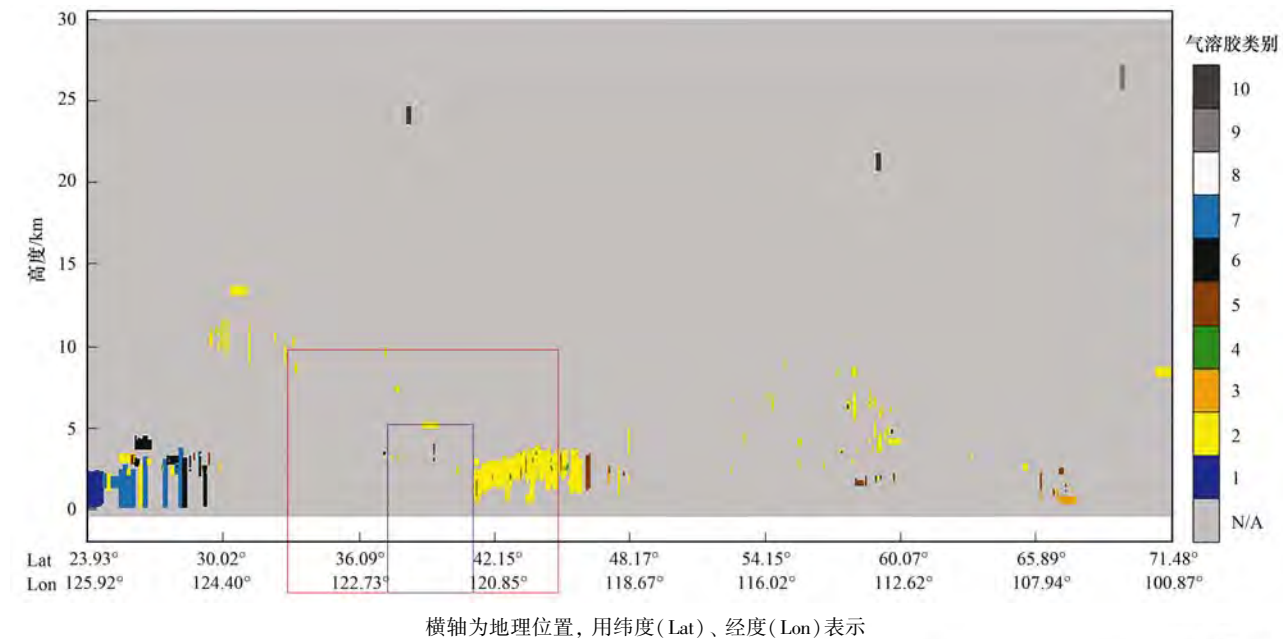
图 6 为 5 月 4 日北京时间白天 13:06 ~ 13:19 观测的 532 nm 波段上总衰减后向散射系数. 从中可以看出, 5 月 4 日白天, 北京周边区域, 如其中红框所示, 南到 35°N 附近 10 km 高度内有接近于  $10^{-1}$  量级的总后向散射系数, 西北到 45°N 附近总后向散射系数分布范围较广, 从  $2.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ , 分布高度从地面到 4 km 高度的覆盖区. 在北京的纬度区域内, 总衰减后向散射系数分布南北差异较大. 南部有散射系数为  $10^{-1}$  量级区, 高度在 3 ~ 5 km, 北部散射系数分布范围广, 量级在  $2.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ , 高度涵盖地面到 3 km 范围, 见紫色小框所示. 为了更深入地了解不同气溶胶类型随高度的分布, 利用 Calipso 二级产品中的 VFM 产品进行分析, 见图 7. 通过该数据能清晰地揭示在不同垂直高度上的气溶胶类别. 从图 7 中看出, 北

京纬度区域内气溶胶类型主要为沙尘气溶胶, 其次为霾. 南部地区霾-沙分布高度在 4 ~ 5 km, 北京西北部的霾-沙更密集, 所在高度比南部低, 集中在 2 ~ 3 km 高度的夹层范围内.

### 2.4 污染过程与天气条件关系

#### 2.4.1 地面天气系统及高空风场分析

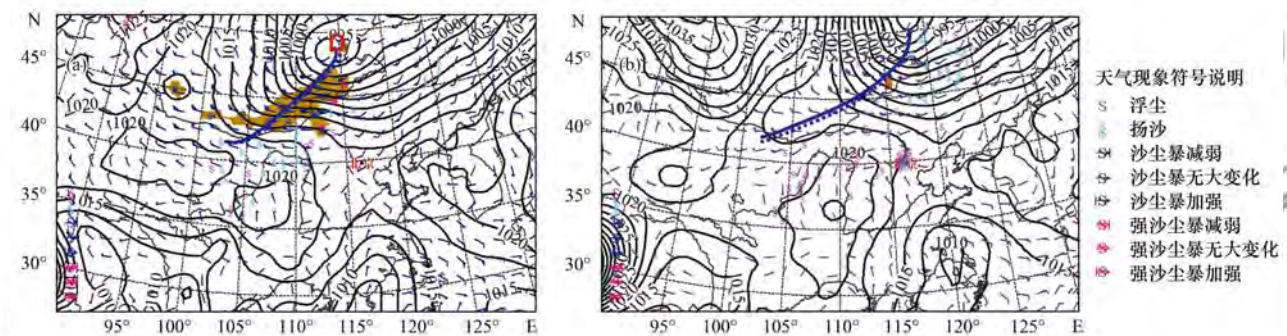
通过分析 2017 年 5 月 3 ~ 5 日高空、地面天气图(图略), 本次污染过程受 500 hPa 上空蒙古低涡低槽东移加深, 地面图上蒙古气旋强烈发展的影响, 在蒙古国、我国内蒙、河套地区, 东部地区出现大范围沙尘区(沙尘暴、扬沙、浮尘和干霾). 图 8 为污染开始前北京时间 2017-05-03T20:00 和污染起北京时间 2017-05-04T08:00 地面天气实况示例, 其中黑色线为等压线、灰色为风场、D 为低压中心、蓝色线条为槽线、不同颜色为不同天气现象. 污染



横轴为地理位置，用纬度(Lat)、经度(Lon)表示

图7 气溶胶类型随高度分布(2017-05-04)

Fig. 7 Aerosol subtype distribution with height on May 4, 2017



(a) 污染前 2017-05-03T20:00; (b) 污染开始 2017-05-04T08:00

图8 污染前和污染开始时地面天气系统观测实况示例

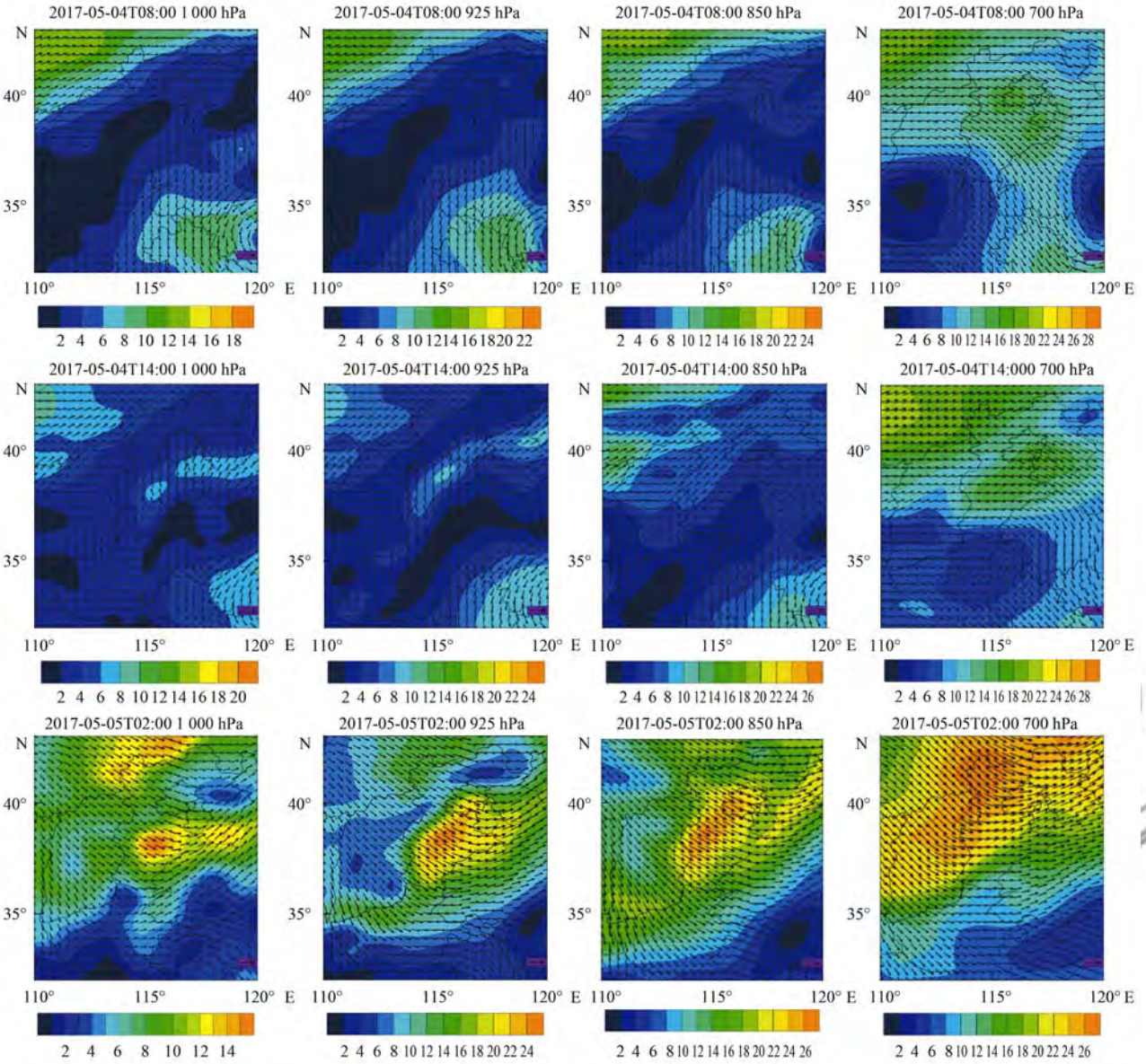
Fig. 8 Observational examples of pre-pollution and beginning pollution conditions from ground weather systems

开始前，北京西部有扬沙，在西北方向有沙尘暴区，图中的土黄色所示区域，在东北方向也有扬沙分布，北京本地比较洁净，污染尚未开始. 而污染开始后，北京地区及北京周边的南部、西北、北部都被沙尘包围.

图9 为基于 ECWMF 数据，绘出  $110^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 、 $32^{\circ} \sim 43^{\circ}\text{N}$  空间范围，在 3 个时刻(北京时间) 2017-05-04T08:00、2017-05-04T14:00 和 2017-05-05T02:00，4 个高度 1000、925、850 和 700 hPa(依次为从左至右)上的风场分布.

根据图8 地面天气系统观测实况和图9 风场分布，可以从动力和污染源的角度解释图2、3 和6 所呈现的结果. 5月4日08:00，从地面1000 hPa 到高空700 hPa 高度，北京皆为西北风，但是此时风速小，即便在700 hPa 高度处的风速也只是  $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右，配合地面观测实况图8，可以看出此时污染物从西北方向北京输送，为重污染阶段. 图6

星载 Lidar 观测时间对应的北京时间约 13:00，为污染间歇期，根据图9 风场显示，此时北京纬度区域的风场高低不同，导致污染属于受上、下夹击双重贡献的形态. 地面到 850 hPa 高度，受偏南气流影响，因而有来自南部地区的污染物输送，而高空700 hPa 受偏西风影响，来自西北向的输送也对污染有贡献. 因此在高层出现了沙尘类的污染物，散射系数大，而在低层，霾-沙混合污染，散射系数分布范围广，粗细粒子同起. 可以推断这是沙尘和霾混杂的混合层. 这和地面天气系统记录的实况极其吻合. 但是污染浓度空间差异明显，比如体现在图3 中的此时南部观测站永乐店、榆垓和琉璃河测定的  $\text{PM}_{10}$  浓度还不高，而  $\text{PM}_{2.5}$  明显偏高. 5月4日14:00，风速与之前08:00 时候相比，未发生明显变化. 风向上，除了700 hPa 高度维持西北风外，地面1000~850 hPa 高度上风向发生了切变，从西北风转变为南风，导致了此时污染进入了间歇期. 此



彩色斑块为风速大小, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

图9 3个时刻4个高度上的风场分布

Fig. 9 Distribution of the wind field at four different altitudes during three time points based on ECWMF ERA-Interim data

时的高空西北风对  $\text{PM}_{2.5}$  的抑制效果明显强于  $\text{PM}_{10}$ , 尤其在北部和城区, 但同时低层在偏南气流影响下, 对  $\text{PM}_{2.5}$  从南向北输送提供了动力条件, 已有研究指出<sup>[36]</sup>, 偏南气流为北京外来污染物的主要输送通道, 因此南部地区的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度依然保持在  $300 \sim 550 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 到了5月5日02:00, 风向又从之前的南风切变为与污染前半场一样的西北风, 与前半段最大的差异是此时从地面到高空, 风速都急速加大, 地面1000 hPa处达到  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 700 hPa处  $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 这样的风场明显具有矛盾的双重效果, 一方面是会增强  $\text{PM}_{10}$  从西北方向输送过来, 体现在此时监测到的  $\text{PM}_{10}$  浓度居于高位, 见图3, 另一方面, 对  $\text{PM}_{2.5}$  的作用既在一定程度上产生  $\text{PM}_{2.5}$  又具有相当的清除作用, 体现在图3中在

污染开始的前半场观测到  $\text{PM}_{2.5}$  浓度  $> 600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的情形此时已经基本不存在, 但是浓度依然保持在  $300 \sim 550 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 而且全区域比较均匀.

2.4.2 海淀站风廓线雷达数据分析

为了对以上 ECWMF 模式得到的大气垂直运动形态进行验证和对比, 同时从观测的角度进一步研究此次污染与气象条件间的关系, 利用了位于北京海淀站0.5 h时间分辨率的风廓线雷达观测数据, 见图10. 图10(a)为风场, 图10(b)侧重点在大气垂直运动, 垂直速度单位为  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 从图10风廓线观测数据看, 5月3日21:00到5月4日03:00, 2 km高度以下为西南气流, 而2~6 km高度范围为西北气流. 此时大气处于激烈上升阶段, 从图2看, 此时未发生大气污染,  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分别为60

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $51\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 5 月 4 日, 04:00 到 11:00, 风向明显切变, 地面到 6 km 高度基本受西北风控制, 在 2.0 km 以下和 4.0 km 以上, 分别出现中心风速达  $12\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的急流核, 而在 2.0~4.0 km 厚度的夹层内存在低风速层, 且大气垂直向下运动, 造成了此时污染最重, 即本次污染过程中的前半场污染(见图 2). 造成本时段污染的显著气象特征是此时的风场和大气垂直运动呈现出的特殊搭配, 即上下两层激流带包裹着一夹层, 使得污染物聚集在夹层内, 无法扩散. 在 14:00~18:00 期间, 在 2 km 高度内, 风向由之前的西北向转变为西南向, 同时伴随着地面气流的上升, 上升速度甚至可达  $0.6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 大气垂直扩散能力加强, 但是一方面由于上升的动力不足, 风速逐渐减小, 最小到  $1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 另一方面, 高层存在明显的下沉气流压制, 导致大气没能向上有效突破, 因此也就无法终结污染过程, 仅仅只是让污染过程稍微得到缓和, 处于一个相对的污染间歇期.  $\text{PM}_{10}$  从最大  $1000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  降低到  $800\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  从  $570\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  降低到  $300\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 5 月 4 日 20:00 至 5 月 5 日 04:00, 从地面

到 2 km 高度, 受到西南气流控制, 之上为西风气流, 这样就形成了深厚的西南风输送带, 而且风速较大, 最大达  $12\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 对外来污染物输送能力加强, 此时形成了双重输送的格局, 2 km 高度以下的西南风加重了  $\text{PM}_{2.5}$  的输送, 2 km 以上的西风加重了  $\text{PM}_{10}$  的输送. 此段时间, 虽然在低空急流的动力作用下, 会抬升大气, 向上运动, 但同样受到更高层下沉气流的压制, 最终会交汇在 2~3 km 的高度, 在这样的风场配置下, 促使污染物在一个狭窄的空间内聚集, 从而使污染再次回到严重污染状态, 此时的  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度分别达到  $975\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $388\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 可以看出, 此半场污染的气象条件和上半场大不同, 该半场除了上升气流受到压制外, 还有在西南风的动力下, 有明显的  $\text{PM}_{2.5}$  从西南方向输送过来, 在西风的动力作用下, 有明显的  $\text{PM}_{10}$  从西部输送过来. 直到 5 月 5 日 08:00, 虽然整层大气是下沉运动, 但是伴随着强烈的西北风, 风速  $\geq 12\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 污染物浓度开始直线下降,  $\text{PM}_{10}$  浓度在 08:00、09:00 和 10:00 依次为 858、623 和  $349\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 同时,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度依次为

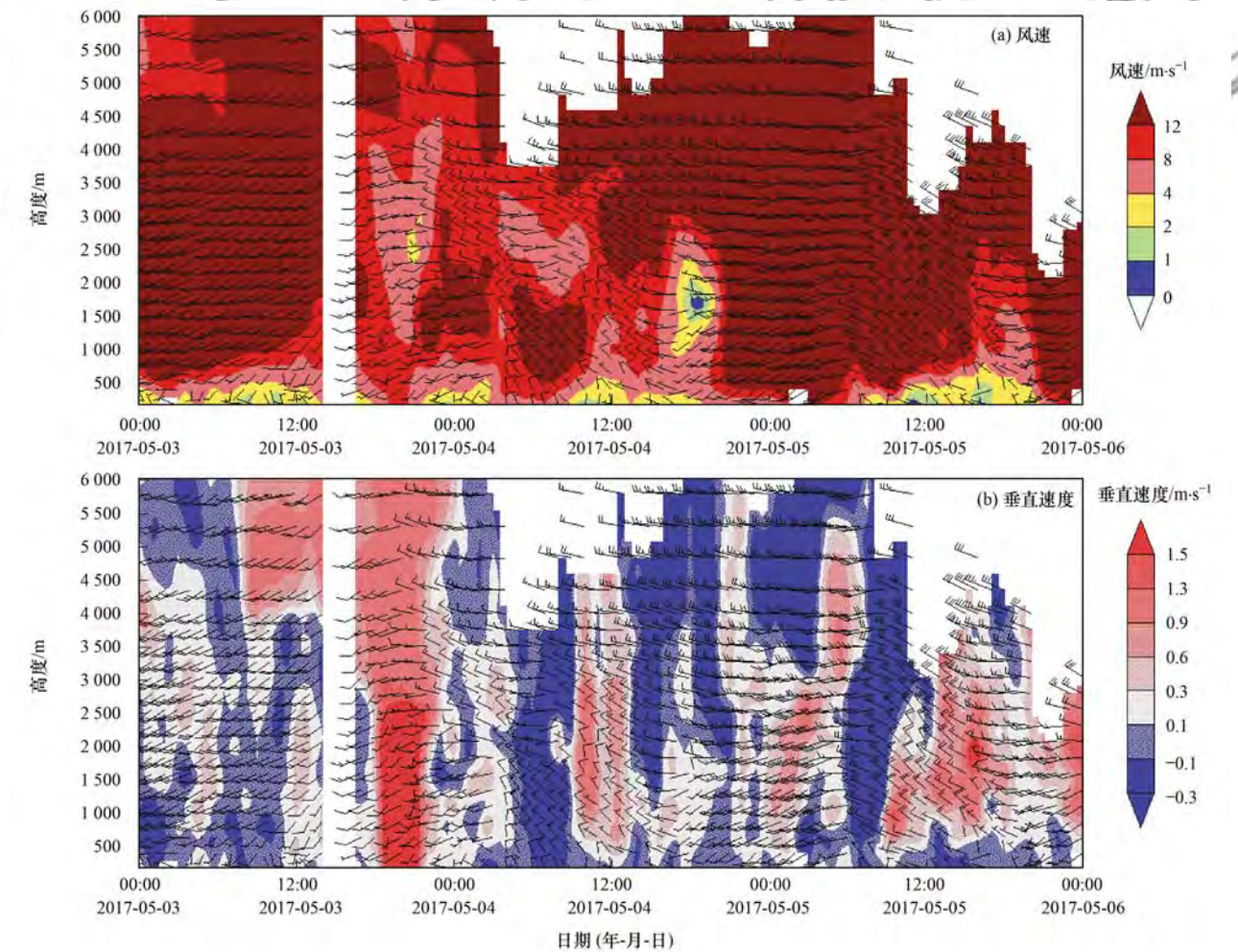


图 10 2017 年 5 月 3~5 日, 北京海淀站半小时风廓线随时间-高度分布

Fig. 10 Distribution over time and height of half-hour wind profile data at the Haidian station from May 3 to 5, 2017

376、245 和  $122 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 从 12:00 开始, 从地面到高空, (低层风向从西南转向西北), 风速逐渐加大, 在西北风控制下, 大气转而开始向上运动, 同时向东方偏移, 即向远离山地的一侧倾斜, 上升速度甚至大于  $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 有效突破上层大气的压制, 大气垂直扩散条件得到显著改善, 终结了本次重污染过程, 如 13:00 时,  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度分别为  $67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

#### 2.4.3 地面风场与污染物分布关系

图 11 为 2017 年 5 月 3~5 日 35 个环境观测站点经订正后逐小时  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度和与之距离最近的 35 个地面自动气象站逐小时风速、风向的叠合分布. 其中的彩色斑块为  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分布. 黑色多边形为主导风向, 百分比表示风频. 圆心和斑块边缘的连接线的长短为风速大小, 即圆的半径为最大风速, 体现在其中为  $12.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 从图 11 可以看出本次污染过程主要受两大风向的影响, 其一以偏南气流为主, 风频上体现为西南风和南风. 虽然风速并不大, 但在偏南气流的推送下, 除了有沙尘传输之外, 主要是大量  $\text{PM}_{2.5}$  的输送, 从污染物方向分布上, 也看到了在 S-SW 和 N-NE 的两个对角区存在着  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的高浓度分布区, 对应风

速在  $2\sim5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  为主. 其二为西北气流, 这种情况完全有别于偏南气流的影响. 在西北风而且是风速较大的影响下, 在下风向东南部地方污染物浓度并未出现大值区域, 大值区域还是分布在西北方向, 且集中在风速  $\leq 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的区间处. 特别值得注意的是在西北风达到  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度下, 在西北的个别区域发现了高  $\text{PM}_{10}$  浓度分布, 达到  $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的量级, 而同样的情况, 并未发现有高  $\text{PM}_{2.5}$  浓度出现, 这种情况说明是典型的、从西北方向输送来的沙尘污染, 从图 3 显示的北方站点如延庆站和怀柔站  $\text{PM}_{10}$  持续高浓度而  $\text{PM}_{2.5}$  浓度趋势下降的观测结果能明显地看出此情形. 总的说来, 在风的影响下, 既有沙尘污染也有  $\text{PM}_{2.5}$  污染, 偏南方向风相对小,  $\text{PM}_{2.5}$  污染明显, 偏北方向风相对较大, 以  $\text{PM}_{10}$  污染为主导. 在风的作用下,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度降低明显先于  $\text{PM}_{10}$ . 但是因为沙尘高度低 ( $2\sim3 \text{ km}$ ), 加上地形的影响, 导致无法远距离传输, 使得偏东部地区的  $\text{PM}_{10}$  浓度和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度相对较低.

#### 3 结论

(1) 地面环境监测数据表明, 本次污染属于暴起, 骤降, 全过程分为三段, 持续约 30h. 前、后半段污染所造成的  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在空间分布上存在显著差异, 且成因也各不相同. 本次污染不是一次单纯的输送型沙尘污染, 中间配合着局地污染, 属于典型的霾-沙混合型污染.

(2) 基于 MODIS 卫星反演的北京及周边南部地区  $\text{AOT} > 2.0$ . 北京大部分区域 Ångström exponent 在  $-0.5\sim0.5$  之间, 为沙尘. CALIPSO 监测到不仅在近地层有污染, 在  $2\sim3 \text{ km}$  高度大气夹层内有大量污染物累积. 从 VFM 结果看, 本次污染不仅有沙尘, 还有霾的存在. 从空间监测数据也验证了本次污染过程属于典型的沙-霾型混合污染形态, 同时也揭示污染起源.

(3) 基于 ECMWF 第三代再分析资料 ERA-Interim, 发现重污染期→污染间歇期→重污染期的风向为西北风→南风→西北风, 风速为稳→稳→激增. 海淀站风廓线雷达观测显示, 前半段在西北风控制下,  $1.5\sim2.5 \text{ km}$  厚度的夹层里存在低风速层, 而之上及之下存在中心风速达  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的急流核. 后半段由于从地面到  $2 \text{ km}$  高度, 受到西南气流控制, 之上为西风气流, 且风速较大,  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 对外来污染物输送能力加强. 在低空急流的动力作用下, 大气向上运动, 但受到更高层下沉气流的压制, 最终会交汇在  $2\sim3 \text{ km}$  的高度, 污染从间歇期又回到重污染状态.

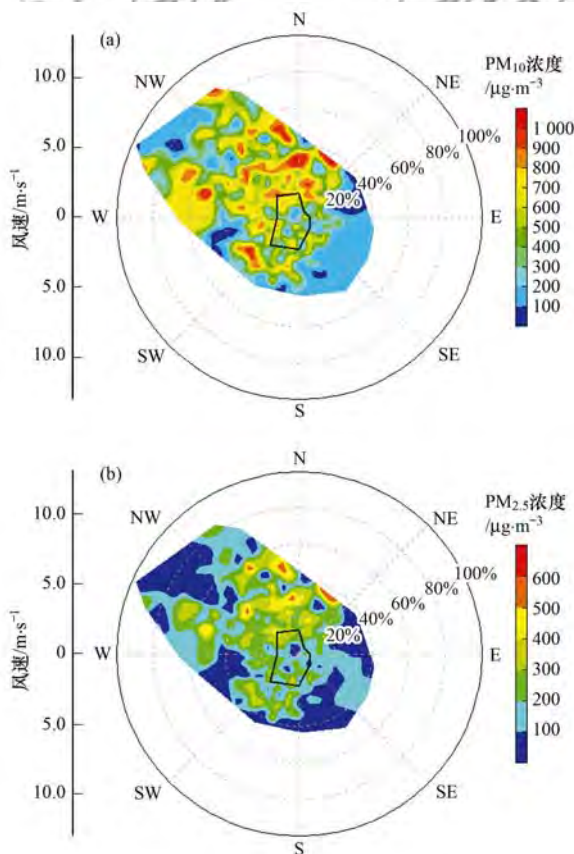


图 11 地面风场和  $\text{PM}_{10}$  浓度、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度之间的关系

Fig. 11 Relationship between the surface wind field and  $\text{PM}_{10}$  concentration and  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations

(4) 形成污染间歇期总的原因是前后风场从西北风到南风的切变. 具体到点上, 在大约 2 km 高度上下气象条件差异所致. 2 km 高度之下, 风向从西北向西南向转换, 大气上升, 速度可达  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 大气垂直扩散能力加强. 在 2 km 高度以上, 大气下沉, 对下面的上升气流形成压制, 无法形成上层辐散的大气形态, 因此无法终结污染过程, 仅仅只是让污染稍微缓和, 处于一个相对的污染间歇期.

(5) 本次污染受两种主导风的影响, 每种主导风对污染的贡献存在明显差异. 偏南风对北京本次污染的贡献既有  $\text{PM}_{10}$  (沙尘输送), 也有  $\text{PM}_{2.5}$  贡献. 而偏西风对北京污染的贡献主要是  $\text{PM}_{10}$ .

致谢: 感谢中国气象科学研究院王亚强教授在本研究中给予的帮助和指导. 感谢 NASA 提供卫星遥感数据. 多位热心人士在本研究过程中提供帮助, 在此一并致谢!

#### 参考文献:

- [1] Huang J P, Minnis P, Yi Y H, *et al.* Summer dust-aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(18): L18805.
- [2] Zhu A H, Ramanathan V, Li F, *et al.* Dust plumes over the Pacific, Indian, and Atlantic oceans: Climatology and radiative impact [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D16208.
- [3] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. *热带气象学报*, 2007, **23**(1): 1-6.
- [4] 李江波, 赵玉广, 孔凡超, 等. 华北平原连续性大雾的特征分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学学报)*, 2010, **40**(7): 15-23.
- [5] 刘建慧, 赵天良, 韩永翔, 等. 全球沙尘气溶胶源汇分布及其变化特征的模拟分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(10): 1741-1750.
- [6] 陈跃浩, 高庆先, 高文康, 等. 沙尘天气对大气环境质量影响的量化研究[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(4): 364-369.
- [7] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  in haze/fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [8] Kang C M, Lee H S, Kang B W, *et al.* Chemical characteristics of acidic gas pollutants and  $\text{PM}_{2.5}$  species during hazy episodes in Seoul, South Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(28): 4749-4760.
- [9] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1425-1431.
- [10] 时宗波, 贺克斌, 陈雁菊, 等. 雾过程对北京市大气颗粒物理化特征的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 551-556.
- [11] 范雪波, 吴伟伟, 王广华, 等. 上海市灰霾天大气颗粒物浓度及富集元素的粒径分布[J]. *科学通报*, 2010, **55**(13): 1221-1226.
- [12] 郭勇涛. 沙尘天气对我国北方和邻国日本大气环境影响的初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. 34-42.
- [13] Chu H J, Yu H L, Kuo Y M. Identifying spatial mixture distributions of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  in Taiwan during and after a dust storm [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **54**: 728-737.
- [14] Lee B K, Jun N Y, Lee H K. Comparison of particulate matter characteristics before, during, and after Asian dust events in Incheon and Ulsan, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(11): 1535-1545.
- [15] Huebert B J, Bates T, Russel P B, *et al.* An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D23): 8633.
- [16] 申莉莉, 盛立芳, 陈静静. 一次强沙尘暴过程中沙尘气溶胶空间分布的初步分析[J]. *中国沙漠*, 2010, **30**(6): 1483-1490.
- [17] Shen L L, Sheng L F, Chen J J. Preliminary analysis of the spatial distribution of the dust aerosol in a heavy dust storm [J]. *Journal of Desert Research*, 2010, **30**(6): 1483-1490.
- [18] 尹青, 何金海, 张华. 激光雷达在气象和大气环境监测中的应用[J]. *气象与环境学报*, 2009, **25**(5): 48-56.
- [19] Yin Q, He J H, Zhang H. Application of laser radar in monitoring meteorological and atmospheric environment [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2009, **25**(5): 48-56.
- [20] Pahlow M, Kleissl J, Parlange M B. Atmospheric boundary-layer structure observed during a haze event due to forest-fire smoke [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, **114**(1): 53-70.
- [21] Sugimoto N, Hara Y, Shimizu A, *et al.* Analysis of dust events in 2008 and 2009 using the lidar network, surface observations and the CFORS model [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, **49**(1): 27-39.
- [22] 姜学恭, 陈受钧, 云静波. 基于 CALIPSO 资料的沙尘暴过程沙尘垂直结构特征分析[J]. *气象*, 2014, **40**(3): 269-279.
- [23] Jiang X G, Chen S J, Yun J B. Analysis on characteristics of vertical structure of sand and dust during dust storm process based on CALIPSO data [J]. *Meteorological Monthly*, 2014, **40**(3): 269-279.
- [24] 张人禾, 李强, 张若楠. 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*, 2014, **44**(1): 27-36.

- Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 26-35.
- [22] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 空气污染气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [23] 穆穆, 张人禾. 应对雾霾天气: 气象科学与技术大有可为[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, **44**(1): 1-2.
- Mu M, Zhang R H. Addressing the issue of fog and haze: A promising perspective from meteorological science and technology [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 1-2.
- [24] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm: The second generation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(16): 9296-9315.
- [25] Sayer A M, Hsu N C, Bettenhausen C, *et al.* Effect of MODIS Terra radiometric calibration improvements on collection 6 deep blue aerosol products: validation and Terra/Aqua consistency [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(23): 12157-12174.
- [26] Mi W, Li Z Q, Xia X G, *et al.* Evaluation of the moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products at two aerosol robotic network stations in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** (D22): D22S08.
- [27] Sayer A M, Hsu N C, Lee J, *et al.* Satellite ocean aerosol retrieval (SOAR) algorithm extension to S-NPP VIIRS as part of the "deep blue" aerosol project [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(1): 380-400.
- [28] Wu Y H, Cordero L, Gross B, *et al.* Assessment of CALIPSO attenuated backscatter and aerosol retrievals with a combined ground-based multi-wavelength lidar and sunphotometer measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **84**: 44-53.
- [29] 支星, 徐海明. 三种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的季节平均特征对比分析[J]. *高原气象*, 2013, **32**(1): 97-109.
- Zhi X, Xu H M. Comparative analysis on monthly mean characteristic of free atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in China[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, **32**(1): 97-109.
- [30] 蒋大和. 北京市及周边六城市空气质量改善趋势比较[EB/OL]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-609047-1102524.html>, 2018-03-06.
- [31] 新浪新闻中心据《重庆时报》. 北京遭遇今年最严重沙尘天 PM<sub>10</sub>局地破 3000 [EB/OL]. <http://news.sina.com.cn/o/2018-03-31/doc-ifysucwn5653891.shtml>, 2018-03-31.
- [32] Ghotbi S, Sotoudeheian S, Arhami M. Estimating urban ground-level PM<sub>10</sub> using MODIS 3 km AOD product and meteorological parameters from WRF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **141**: 333-346.
- [33] Nordio F, Kloog I, Coull B A, *et al.* Estimating spatio-temporal resolved PM<sub>10</sub> aerosol mass concentrations using MODIS satellite data and land use regression over Lombardy, Italy [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 227-236.
- [34] Kim D H, Sohn B J, Nakajima T, *et al.* Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D2): D02209.
- [35] Dubovik O, Holben B, Eck T F, *et al.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, **59**(3): 590-608.
- [36] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 26-29, 40.
- Su F Q, Gao Q X, Zhang Z G, *et al.* Transport pathways of pollutants from outside in atmosphere boundary layer [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 26-29, 40.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                        |                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing .....                                                                                                                               | ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)     |
| Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing .....                                                                               | XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)                 |
| Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction .....                                                                                     | GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)          |
| Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin .....                                                                                                                 | XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)                |
| Characterization of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes .....                                                                  | ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)         |
| Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant .....                                                                                           | YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)         |
| Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method .....                          | MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)                |
| Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather .....                                                                                                                                                                 | YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)     |
| Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China .....          | LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)       |
| Health Benefit Evaluation for PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016 .....                                                                                            | HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)              |
| Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017 .....                                                                                                    | LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)              |
| Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring .....                                                                                                          | WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)    |
| Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province .....                                                                                                                   | XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)            |
| Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China .....                                                        | OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)         |
| Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River .....                                                                                                  | WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)       |
| Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments .....                                                                                  | LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)      |
| Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches .....                                                                                                                                         | LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)          |
| Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands .....                                                                                                        | LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)        |
| Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir ..... | JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)              |
| Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China .....                                                                            | FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)       |
| Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City .....                                         | ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)               |
| Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo .....                                                                                                                         | ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)   |
| Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province .....                                                                                                        | ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)       |
| C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area .....                                                                        | LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)                  |
| Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems .....                                                                                 | FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)           |
| Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer .....                                                                                                                | DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)                          |
| Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir .....                                                                              | DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)            |
| Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin .....                                                                                    | LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)           |
| Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir .....                                                                                                                                      | MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)           |
| Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir .....                                                                                     | WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)    |
| Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures .....                        | WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)                 |
| Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation .....                                                                    | ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)        |
| Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution .....                                                                                                                               | ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)      |
| Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar .....                                                                                                            | SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)                           |
| Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater .....                                                                                                             | YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)           |
| Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant .....                                                                                               | WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)     |
| Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor .....                                                                                                                             | WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)         |
| Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes .....                                                                                                                                   | GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)           |
| Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm .....                                                                                                                                  | LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)             |
| Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area .....                                                                                        | LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827) |
| Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland .....                                                                                     | DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)        |
| Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N <sub>2</sub> O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field .....                                                                   | WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)                |
| Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland .....                                                                          | HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)                 |
| Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area .....                                                                                                                  | HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)                   |
| Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China .....                                                                      | LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)          |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model .....                                                                 | BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)           |
| Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region .....                                                                                                   | WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)               |
| Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China .....                                              | QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)                  |
| Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland .....                                                                                | XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)          |
| Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil .....                                                                                                                        | YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)               |
| Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the <sup>13</sup> C-DNA-SIP Method .....                                                                                                                        | LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)      |
| Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation .....                                                                                                          | WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)              |
| Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches .....                                                                                                                                 | CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)            |
| Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting .....                                                                                                        | WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)                    |