

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响 陶俊,柴发合,高健,曹军骥,刘随心,张仁健(409)

北京地区秋季雾霾天 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析 赵秀娟,蒲维维,孟伟,马志强,董璠,何迪(416)

上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 王倩,陈长虹,王红丽,周敏,楼晟荣,乔利平,黄成,李莉,苏雷燕,牟莹莹,陈宜然,陈明华(424)

杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征 谢小芳,孙在,付志民,杨文俊,林建忠(434)

保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别 李杏茹,杜熙强,王英锋,王跃思(441)

春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究 周变红,张承中,王格慧(448)

华东区域高山背景点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 背景值及污染特征 苏彬彬,刘心东,陶俊(455)

基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估 田秀英,蔡强,刘锐,张永明(462)

积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征 张刚,王宁,艾建超,张蕾,杨净,刘子琪(468)

靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 徐林波,高勤峰,董双林,刘佳,傅秀娟(476)

正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究 欧杰,王延华,杨浩,胡建芳,陈霞,邹军,谢云(484)

干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素 刘玉燕,刘浩峰,张兰(494)

降尘收集方法对降尘效率的影响 张正德,董治宝(499)

海河流域水生生态功能一级二级分区 孙然好,汲玉河,尚林源,张海萍,陈利顶(509)

长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究 时志强,张运林,王明珠,刘笑茵(517)

内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究 黄昌春,李云梅,徐良将,杨浩,吕恒,陈霞,王延华(525)

溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响 邱昭政,罗专溪,赵艳玲,颜昌宙(532)

自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究 张华兵,刘红玉,李玉凤,安静,薛星宇,侯明行(540)

淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制 周亮,徐建刚,孙东琪,倪天华(547)

高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征 崔玉洁,刘德富,宋林旭,陈玲,肖尚斌,向坤,张涛(555)

城市雨水径流水质演变过程监测与分析 董雯,李怀恩,李家科(561)

复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果 任峰,陆忆夏,刘琴,汤杨杨,王世和,高海鹰,乔红杰,王为进(570)

给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究 郑琦,陈超,张晓健,陆品品,刘源源,陈雨乔(576)

1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用 李三华,张奇亚(583)

水生植物热解生物油对中肋骨条藻抗氧化酶活性的影响 姚远,李锋民,李媛媛,单时,李杰,王震宇(589)

TiO₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学 张轶,黄若男,王晓敏,王齐,丛燕青(596)

皮革废水有机污染物生物降解特性研究 王勇,李伟光,杨力,宿程远(604)

链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究 谢练武,方继生,郭亚平(611)

一种负载型生物载体的制备及性能研究 杨基先,曾红云,周义,邱珊,马放,王蕾,肖大伟(616)

基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*) 培养研究 嵇雯雯,夏会龙,方治国,刘惠君(622)

温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响 陈汉龙,严媛媛,何群彪,戴晓虎,周琪(629)

天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH₄ 的影响 姚敦璠,陈天虎,王进,周飞跃,岳正波(635)

蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征 青宪,韩静磊,温炎桑(642)

基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 钟茂生,姜林,姚珏君,夏天翔,朱笑盈,韩丹,张丽娜(647)

区域地下水污染风险评价方法研究 杨彦,于云江,王宗庆,李定龙,孙宏伟(653)

地下水有机污染源识别技术体系研究与示范 王晓红,魏加华,成志能,刘培斌,纪轶群,张干(662)

祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究 朱凌宇,潘剑君,张威(668)

黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应 骆坤,胡荣桂,张文菊,周宝库,徐明岗,张敬业,夏平平(676)

根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响 张晶,于玲玲,辛木贞,苏德纯(685)

长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究 罗璐,周萍,童成立,石辉,吴金水,黄铁平(692)

外源Cr(III)在我国22种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究 郑顺安,郑向群,李晓辰,刘书田,姚秀荣(698)

某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征 潘峰,王利利,赵浩,尤奇中,刘林(705)

大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析 刘芳,王书肖,吴清茹,林海(712)

天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征 姚丹,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波,王艳萍,刘国卿(718)

沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定 吴唯,史江红,陈庆彩,张晖,刘晓薇(724)

动物饲料中砷、铜和锌调查及分析 姚丽贤,黄连喜,蒋宗勇,何兆桓,周昌敏,李国良(732)

氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究 王点点,宋宁慧,吴文铸,由宗政,何健,石利利(740)

2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性 倪雪,刘娟,高彦征,朱雪竹,孙凯(746)

嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究 厉闾,钱坤,肖伟,王进军,邓新平(753)

固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响 唐阔,马安周,于清,邓雪梅,吕迪,庄国强(760)

16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性 刘卫国,梁存珍,杨金生,王桂萍,刘苗杰(767)

氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响 刘涛,李冬,曾辉平,畅晓燕,张杰(773)

筒青霉(*Penicillium simplicissimum*) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征 沈莹,胡天觉,曾光明,黄丹莲,尹璐,刘杨,吴娟娟,刘晖(781)

石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究 杨萌青,李立明,李川,李广贺(789)

土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响 王桂珍,李兆君,张树清,马晓彤,梁永超(795)

生活垃圾填埋过程含水率变化研究 李睿,刘建国,薛玉伟,张媛媛,岳东北,聂永丰(804)

动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化 吴昊,张盼月,郭建斌,吴永杰(810)

《环境科学》征订启事(447) 《环境科学》征稿简则(493) 信息(508,588,610,731) 专辑征稿通知(788)

北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析

赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要: 利用北京城区和郊区 2011 年 9 月 1 日 ~ 12 月 7 日 $PM_{2.5}$ 质量浓度、气溶胶散射系数 (σ_{sca}) 和黑碳浓度观测资料, 研究了雾霾天气条件下北京地区 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学参数的变化特征, 并讨论了气象条件的作用. 结果表明, 北京地区 $PM_{2.5}$ 污染和气溶胶光学特性受雾霾天气的影响非常明显. $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和气溶胶吸收系数 (σ_{abs}) 在雾霾期均明显高于非雾霾期, 雾霾期日均 $PM_{2.5}$ 浓度在城区和郊区分别达到 $97.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $64.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 为非雾霾期日均浓度的 3.3 和 4.8 倍. 城区高 $PM_{2.5}$ 浓度造成雾霾类天气出现频率明显高于郊区. 轻雾天城区 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 明显高于郊区, 区域输送的影响相对较弱, 轻雾和霾天城郊差异较小, 区域性特征明显, 而雾天 σ_{sca} 城郊非常接近且在各雾霾类天气中相对最高, 气溶胶散射能力最强, 区域性特征较为明显. 气象条件的不同造成各雾霾过程 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 的空间分布、 $PM_{2.5}$ 污染及气溶胶消光强度上呈现不同的特点. 边界层以上偏南风将南部地区污染物向北京输送, 在整层下沉气流作用下使得边界层内污染物浓度增加, 加之边界层高度持续稳定在 600 m 左右, 边界层内风速很低, 污染物水平、垂直扩散均很弱, 造成局地污染物的累积, 形成了 $PM_{2.5}$ 污染和气溶胶消光强度最强的一次雾霾过程.

关键词: 雾霾; $PM_{2.5}$ 浓度; 散射系数; 吸收系数; 气象条件

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0416-08

$PM_{2.5}$ Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area

ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, MA Zhi-qiang, DONG Fan, HE Di

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

Abstract: A study on the $PM_{2.5}$ pollution and aerosol optical properties in haze-fog days was carried out from Sep. 1st to Dec. 7th, 2011 in Beijing area by using $PM_{2.5}$ concentration, aerosol scattering coefficient (σ_{sca}) and absorption coefficient (σ_{abs}) measured under urban and rural environment. The effect of weather condition on the $PM_{2.5}$ pollution and aerosol optical properties was discussed as well. The results showed that the $PM_{2.5}$ concentration, σ_{sca} and σ_{abs} were evidently higher in haze-fog days than those in non-haze-fog days. The average $PM_{2.5}$ concentrations in haze-fog days with values of $97.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $64.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ were as 3.3 and 4.8 times as those in non-haze-fog days at urban and rural stations, respectively. The higher $PM_{2.5}$ concentration in urban area resulted in the more frequent fog and haze phenomena than that in rural area. The $PM_{2.5}$ concentration, σ_{sca} and σ_{abs} were significantly higher in urban area than that in rural area in mist days, while relatively close in mist-haze days. This difference suggested that the effect of regional transport of pollution was relatively evident in mist-haze days but weak in mist day. In fog days the σ_{sca} showed no evident difference between urban and rural area, and was the highest in all types of fog and haze weather. The scattering property of aerosol was the strongest in fog days. The different weather conditions resulted in various characteristics of spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentration, σ_{sca} and σ_{abs} , as well as the strength of $PM_{2.5}$ pollution and aerosol extinction. The pollutants transported by the strong southwest wind above the boundary layer and subsided in the boundary layer accompanying with the local accumulation of pollutants due to the weak diffusion resulted in the most serious haze-fog episode with the strongest $PM_{2.5}$ pollution and aerosol extinction.

Key words: fog and haze; $PM_{2.5}$ concentration; scattering coefficient; absorption coefficient; weather condition

多年来的观测和研究表明,北京地区首要污染物为可吸入颗粒物,而随着能源结构调整,机动车排放增多,北京地区的复合型大气污染日益凸显,细颗粒物尤其是二次气溶胶污染加重. 根据近几年自动监测资料统计,北京城区 $PM_{2.5}$ 的年均浓度基本在 $85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右^[1], 相比 2000 年的观测结果并没有明显降低的趋势^[2], 且化学组成分析结果表明北京地区 $PM_{2.5}$ 的主要成分是 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、有机物、矿物质和元素碳^[3-5]. 细颗粒物中的硫酸盐和

硝酸盐对能见度的降低起到重要的消光贡献, 细颗粒物污染导致的持续性雾霾天气和重污染过程逐渐增多. 据赵普生等^[6] 研究表明, 北京地区 1980 ~ 2008 年霾日总体呈增加趋势, 从 1980 年的年均 50 d 左右增加到 2008 年的 72 d, 城区则出现频率更高. 针

收稿日期: 2012-05-11; 修订日期: 2012-07-03

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8092010, 8121002); 国家自然科学基金项目(41105092); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(IUMKY201209)

作者简介: 赵秀娟(1977~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大气环境, E-mail: xjzhao@ium.cn

对雾霾天大气气溶胶的化学特性、粒子谱分布状况、细粒子浓度垂直梯度变化等方面均开展了相关的研究^[7~9],但对雾霾天气溶胶光学特性的研究相对较少。于兴娜等^[10]利用太阳光度计资料分析发现北京地区雾霾天气期间气溶胶光学厚度较高,气溶胶主要以细粒子为主,气溶胶体积尺度谱分布表现为双峰型结构。这些结果对研究雾霾天气溶胶辐射效应具有很好的参考价值,但对雾霾天能见度影响最显著的是气溶胶的消光能力,气溶胶的消光主要分为散射和吸收两部分。针对北京地区气溶胶散射系数(σ_{sca})和吸收系数(σ_{abs})的时间变化特征已有不少工作。如在北京大学的观测结果显示^[11], σ_{sca} 在夏季高于冬季,接近中午时出现峰值而傍晚出现最低值, σ_{abs} 则在下午出现最低值,夜间出现最高值。在上甸子地区 σ_{sca} 和 σ_{abs} 均在冬季最低,但 σ_{sca} 在秋季最高而 σ_{abs} 在夏季最高^[12]。柯宗建等^[13]还对上甸子地区秋冬季气溶胶散射特征进行了分析。在北京南部郊区,夏季 σ_{sca} 和 σ_{abs} 呈明显的早晚双峰型变化,下午出现最低值^[14]。这些工作使人们对北京地区气溶胶光学特性的认识更加全面,但这些工作较少涉及到雾霾天气条件下气溶胶的光学特性。颜鹏等^[15]通过分析秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性发现,在雾霾期间上甸子地区 σ_{sca} 、 σ_{abs} 和单次散射反照率都远高于清洁时段的数值,且雾霾过程对光散射性气溶胶的增加更为有利。在以往的研究中,笔者利用北京城区到郊区3个站点1 a的观测资料分析了 σ_{sca} 的时空变化特征^[16],其中对两个雾霾过程的对比分析发现,弱的偏东北风会造成 σ_{sca} 从城区到郊区呈明显降低的趋势,而强西南风过程 σ_{sca} 的空间分布比较均匀,易造成区域污染。另外,笔者对上甸子地区不同雾霾类天气气溶胶散射特征也进行了分析,并得到了一些初步的认识^[17],但这些工作大部分都是在郊区开展的,在城郊同时开展雾霾天细颗粒物污染与气溶胶光学特征研究的工作还比较缺乏,而这对了解一个地区气溶胶光学特性是非常必要的,同时对进一步认识北京地区气溶胶特点及其环境、气候效应也具有重要意义。

2011年入秋以后北京地区连续出现了雾霾天气,造成空气质量下降,引起了社会公众的普遍关注。南郊观象台记录显示2011年9月1日~12月7日共出现雾霾日60 d,比近10年均值(57.3 d)、去年同期(48 d)均偏多。其中,大雾日数是1999年以来最多(与1999年、2003年并列);霾日数是1981年以来最多。连续4 d以上的雾霾天气过程达7次。

因此这一时期的大气气溶胶光学特性具有较好的代表性。在天气学上雾霾天均有明确的定义。根据中国气象局2003年版的《地面气象观测规范》规定,雾指“大量微小水滴浮游空中,常呈乳白色,使水平能见度小于1.0 km”。轻雾是指“微小水滴或已湿的吸湿性质粒所构成的灰白色的稀薄雾幕,使水平能见度大于等于1.0 km至小于10.0 km。”,而霾的定义是指“大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于10.0 km的空气普遍混浊现象”。2010年6月1日起实施的《气象标准汇编》(QX/T 113-2010)中在原来霾的定义基础上,增加了霾观测的判识条件,即能见度小于10 km,排除特殊天气造成的视程障碍。相对湿度小于80%,判识为霾;相对湿度80%~95%时,按照地面气象观测规范规定的描述或大气成分指标进一步判识,大气成分指标包括PM_{2.5}和PM₁的质量浓度,气溶胶散射和吸收系数,其中PM_{2.5}质量浓度的参考限值是75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。本研究依据北京市南郊观象台(54511站)天气记录,通过对雾霾日的PM_{2.5}浓度和气溶胶光学参数的变化及典型个例的细致分析,探讨雾霾天气条件下北京城区和郊区细颗粒物污染与大气气溶胶光学特性的变化特征,特别是城区与郊区之间存在的差异,并讨论了气象条件对雾霾天气气溶胶光学特性的影响。

1 观测与方法

1.1 站点简介

气溶胶综合观测分别在城区宝联站(39°56'N, 116°17'E, 75.0 m a. s. l.)和远郊区上甸子站(40°39'N, 117°07'E, 293.9 m a. s. l.)同时开展。站点地理位置如图1所示。宝联站座落于海淀区宝联体育公园内,该站位于北京西三环和西四环之间,周边没有大的污染源,主要为居民区,可代表城区。北京上甸子区域大气本底站是世界气象组织区域大气本底观测站之一。该站位于北京市东北部的密云县高岭镇上甸子村,距北京市区约110 km。该站座落于山的南侧,三面环山,仅西南方向为平原,由于地形作用,该站常年盛行东北和西南风,因此在西南风作用下,来自北京城区和周围区县的污染气团很容易输送到上甸子地区,而来自其他方向的气团相对较为清洁。

1.2 仪器和数据简介

本研究采用美国R&P公司生产的1400a TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)仪器观测PM_{2.5}浓度,该仪器每周检查一次流量和滤膜负载

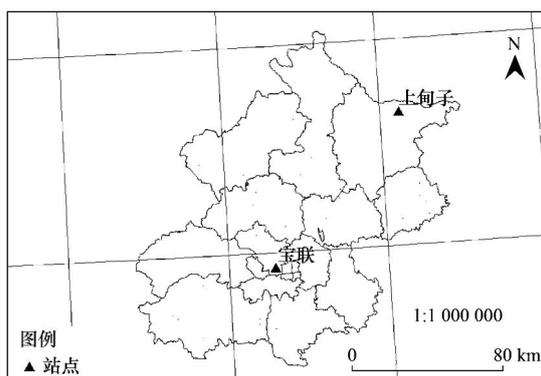


图1 观测站点地理位置示意

Fig. 1 Location of monitoring stations

率,当用于测量的滤膜负载率超过 30% 时则进行更换,定期对管路、切割头和泵进行检查和清洗,并定期对流量进行校准,同时根据仪器显示状态,更换气水分离器芯或过滤器. 气溶胶散射系数采用澳大利亚 EcoTech 公司生产的 M9003 浊度计进行连续观测,仪器测量波长为 525 nm,测量范围为 0 ~ 2 000 Mm^{-1} ,积分角度为 $0^\circ \sim 170^\circ$. 对一般大气气溶胶细粒子,浊度计由于积分角度不理想带来的截断误差不大于 10%. 仪器在使用前利用零气(用高性能颗粒物过滤器制备)与国产的 HFC-R134a(纯度为 99.5% 以上)进行标定,标定值符合规定的标准,稳定度达 95% 以上,这相当于仪器的零点检查偏差低于 2.0 Mm^{-1} ,跨点检查偏差不高于 10%. 观测中浊度计每日自动进行定时零点检查,每周采用厂家推荐的标准气进行人工跨点检查. 测量时相对湿度保持在 60% 以下,由仪器自带加热系统对进气管湿度进行控制. 黑碳气溶胶浓度采用的是美国加州玛基科学公司(Magee Scientific Co.)生产的 AE-31 型 7 波段(370、470、520、590、660、880 和 950 nm)黑碳仪在线测量,其原理是通过实时测量石英滤膜上收集的气溶胶粒子对光的衰减,并假设光衰减是由黑碳吸收造成的,由此根据连续测量透过滤膜的光衰减的变化计算出黑碳浓度. 测量时需定期检查光源的稳定性,并定期进行标定、更换滤膜、清洗光室等维护工作. 浊度计和黑碳仪均安放在实验室内,进气管直接伸到屋顶之上,进气口装有防虫网,高出屋顶约 1.5 m,距地面高度大约 5 m,不带气溶胶粒径切割器. 此外,在宝联和上甸子分别开展了能见度的在线观测. 宝联采用的是美国 Belfort Model 6000 能见度传感器,采用的是向前散射原理,监测范围 6 m ~ 80 km,光源为波长 880 nm 的红外线,散射角为 42° ,精度 3 m. 上甸子站能见度数据采用 Visala 的

FD12 能见度仪观测获得,该仪器是通过测量红外线光束对空气中颗粒质点(固体和液体)的散射获得气象光学能见度,是一种前向散射测量仪,对能见度的探测范围是 10 m ~ 50 km.

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 σ_{scat} 和黑碳浓度的数据每 5 min 记录一组,经过极值法、连续性和多物理量相关判定对比等质量控制方法质控后,计算得到小时平均值,且用于计算小时平均值的有效数据样本量不低于 75%,由于 $\text{PM}_{2.5}$ 分析仪在转折性天气发生初期短时间内可能会出现负值,本研究将负值列入无效数据,不计入小时平均值的计算. 上甸子站同时监测逐时的气象要素. 城区宝联站,气象数据采用海淀气象站观测资料,该气象站位于宝联站的北部,直线距离约 4 km 左右. 气象要素的观测均按照国家气象局的标准规范进行,仪器设备均有标准的维护和标校规范.

1.3 气溶胶吸收系数和消光系数

从黑碳仪测量的黑碳(BC)浓度计算气溶胶吸收系数 σ_{abs} 选用下述公式:

$$\sigma_{\text{abs}} = \alpha_{\text{BC}} \cdot c_{\text{BC}} \quad (1)$$

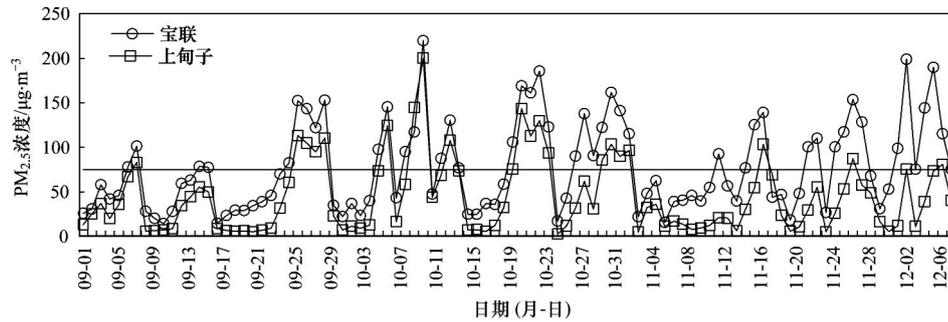
式中,气溶胶吸收系数 σ_{abs} ,单位为 Mm^{-1} , c_{BC} 为 880 nm 通道测量的黑碳浓度,单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, α_{BC} 为 BC 的质量吸收系数. 式(1)计算的气溶胶吸收系数为 532 nm 波长处的值. 计算中 α_{BC} 取 $8.28 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,具体确定方法参考文献[12,15].

2 结果与讨论

2.1 雾霾期间气溶胶光学特性的平均特征

图 2 是 2011 年 9 月 1 日 ~ 12 月 7 日宝联与上甸子站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐日变化情况,雾霾期(以南郊气象台记录为依据,共 60 d)宝联站和上甸子站日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别达到 $97.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $64.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,为非雾霾期(38 d)日均浓度的 3.3 和 4.8 倍,宝联站在雾霾期的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度超过了国家环境空气质量二级标准限值(24 h 平均为 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). 由于城区人为排放较强,宝联站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显高于上甸子本底站的浓度水平,但在不同的雾霾过程中城郊差异不尽相同.

为了分析雾霾天气的光学特征及气象条件的影响,笔者根据人工天气记录,将天气过程分为:霾天、轻雾和霾天、轻雾天和雾天这 4 种天气类型进行统计. 霾天即该日天气现象记录中只有霾,轻雾和霾天则是记录中有轻雾又有霾,轻雾天则天气记录中仅为轻雾,雾天则记录中出现了雾,多为轻雾和雾这类天气现象. 与笔者 2011 年工作^[17]不同之处在于,此



其中黑色实线为国家环境空气质量 PM_{2.5} 二级标准, 24 h 平均浓度限值 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 2 2011 年 9 月 1 日 ~ 12 月 7 日宝联与上甸子站 PM_{2.5} 浓度逐日对比

Fig. 2 Daily average PM_{2.5} concentration at Baolian and Shangdianzi from Sep. 1st to Dec. 7th, 2011

次统计将轻雾与雾进行了分类统计, 结果表明这两类天气情况下 PM_{2.5} 浓度与气溶胶光学特性确实存在明显的差别. 对这 4 类雾霾天气再基于能见度低于 10 km 的原则进行小时数据的筛选, 分类统计 PM_{2.5} 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 的平均结果如表 1 所示. 从 4 类天气对比来看, 轻雾和霾天气最多, 其次为轻雾天、雾天, 日记录仅为霾的天气较少. 城区雾霾类天气出现频率明显高于郊区, 这一方面可能是气象条件造成的空间分布差异, 但城区人为排放产生的高细颗粒物浓度应该是最重要的一个原因. 在同类型天气中, 轻雾和霾天 PM_{2.5} 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 城郊差异较小, 表明此类天气区域性特征更强, 上甸子地区的 PM_{2.5} 浓度水平和气溶胶消光能力的增强主要是受到区域输送的影响. 轻雾

天三者城区明显高于郊区, 表明在此类天气中区域输送的影响相对较弱. 在雾天城区 PM_{2.5} 浓度和 σ_{abs} 略高于郊区, 但 σ_{sca} 比较接近, 区域输送的影响也比较明显. 在城区, PM_{2.5} 浓度和 σ_{sca} 均在霾天最低, 轻雾和霾天与轻雾天居中且非常接近, 雾天最高. σ_{abs} 仅在雾天最高, 在其他几类天气中差别不大. 在郊区, 轻雾天 PM_{2.5} 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 平均最低, PM_{2.5} 浓度和 σ_{abs} 在轻雾和霾天与雾天比较接近, 但是雾天 σ_{sca} 明显高于其他两类天气, 这与笔者在上甸子地区利用 1 a 的观测资料分析的结果基本一致^[17]. 雾天 σ_{sca} 在宝联和上甸子都达到了 1 000 Mm^{-1} 以上, 气溶胶的散射能力较其他雾霾类天气都强, 这可能与雾过程多会生成散射能力很强的硫酸盐气溶胶有关^[18].

表 1 雾霾天气宝联和上甸子站 PM_{2.5} 浓度、 σ_{sca} 与 σ_{abs} 的平均值

Table 1 Averages of PM_{2.5} concentration, σ_{sca} and σ_{abs} under haze-fog weather conditions at Baolian and Shangdianzi

项目	宝联				上甸子			
	霾	轻雾和霾	轻雾	雾	霾	轻雾和霾	轻雾	雾
样本量/h	57	534	326	158	—	251	234	24
PM _{2.5} 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	108.4	127.0	121.3	145.5	—	115.0	78.5	112.1
$\sigma_{\text{sca}}/\text{Mm}^{-1}$	619.8	830.1	869.1	1 121.7	—	789.0	535.2	1 228.9
$\sigma_{\text{abs}}/\text{Mm}^{-1}$	57.4	56.5	57.4	67.1	—	53.3	36.8	59.9

2.2 典型雾霾过程 PM_{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析

为了分析气象条件在不同雾霾过程中的影响, 本研究根据北京南郊观象台的雾霾天气记录, 结合 PM_{2.5} 日均浓度变化(图 2), 对 7 次连续 4 d 以上的雾霾天气过程光学特征进行了统计分析, 统计结果见表 2.

从表 2 可以看出, 除过程 5 以外, 每个过程宝联站 PM_{2.5} 平均浓度都在 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 细颗粒物污染非常严重, σ_{sca} 在 841.7 ~ 1 203.6 Mm^{-1} 之间, 上甸子站 PM_{2.5} 基本在 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上(过程 6 除外), σ_{sca} 的变化范围较城区要大, 在 368.8 ~ 906.9 Mm^{-1} 之间. 从过程对比来看, 过程 2 的区域性最强,

城郊差异非常小, PM_{2.5} 浓度、 σ_{sca} 与 σ_{abs} 的平均值差异均在 10 个单位以内. 此次过程主要以轻雾和霾为主, 从 10 月 5 ~ 15 日西北东部、华北、黄淮、东北、长江中下游等大部分地区都出现了雾霾天气, 区域污染特征明显. 在区域性雾霾天气条件下, 颗粒物浓度增加显著, 宝联站和上甸子站 PM_{2.5} 在 10 月 9 日达到最高, 日均浓度分别为 212.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 199.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是本研究所选时段内的最高值, 上甸子站 σ_{sca} 也出现了日平均最高值 1 537.8 Mm^{-1} , 本底地区出现的极高值表明这种大范围的区域性雾霾天非常有利于污染物的区域输送. 过程 3 的 PM_{2.5} 污染程度和消光强度总体都是最强的, 3 d 的雾伴随轻雾和

霾,使得 $PM_{2.5}$ 浓度和 σ_{sca} 持续维持高值, σ_{sca} 平均值在宝联和上甸子均为 7 个过程的最高值,在上甸子的平均值是 $906.9 Mm^{-1}$,是 2004 年同期一次 σ_{sca} 最高的雾霾过程平均值的 1.4 倍^[15],是非常典型的一次雾霾天气过程. 12 月 4~7 日为一次出现大雾的天气过程,但大雾主要出现在城区,上甸子主要是轻雾天气,宝联站 $PM_{2.5}$ 浓度比上甸子站高 $97.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右, σ_{abs} 高 $35.1 Mm^{-1}$,特别是 12 月 5 日

表 2 2011 年 9 月 1 日~12 月 7 日主要雾霾过程 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 与 σ_{abs} 的平均值

过程	日期(月-日)	天气简介	宝联			上甸子		
			$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	σ_{sca}/Mm^{-1}	σ_{abs}/Mm^{-1}	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	σ_{sca}/Mm^{-1}	σ_{abs}/Mm^{-1}
1	9 月 24~29 日	轻雾和霾	130.7	847.2	52.1	96.8	592.8	43.3
2	10 月 7~13 日	轻雾和霾	137.2	890.0	47.2	121.8	880.7	58.6
3	10 月 18~23 日	轻雾、雾和霾	156.4	1 203.6	73.7	114.4	906.9	53.4
4	10 月 26~11 月 1 日	轻雾和雾	136.9	966.1	65.6	80.7	—	40.4
5	11 月 15~18 日	轻雾和雾	99.5	654.4	49.7	72.4	536.3	36.6
6	11 月 24~28 日	轻雾和霾	126.9	841.7	65.8	55.2	368.8	31.8
7	12 月 4~7 日	雾和轻雾	172.0	1 174.5	76.0	74.2	—	40.9

2.3 雾霾期间 $PM_{2.5}$ 与气溶胶光学特性变化

为了进一步分析天气条件的影响,选择了 $PM_{2.5}$ 污染程度和消光强度总体都是最强的 10 月 18~23 日这次雾霾过程,结合天气形势与气象要素资料,分析城区和郊区两个站点雾霾天气条件下大气气溶胶的累积过程及气溶胶光学特性的演变特点.

图 3 是 10 月 18~23 日宝联站观测的 $PM_{2.5}$ 浓

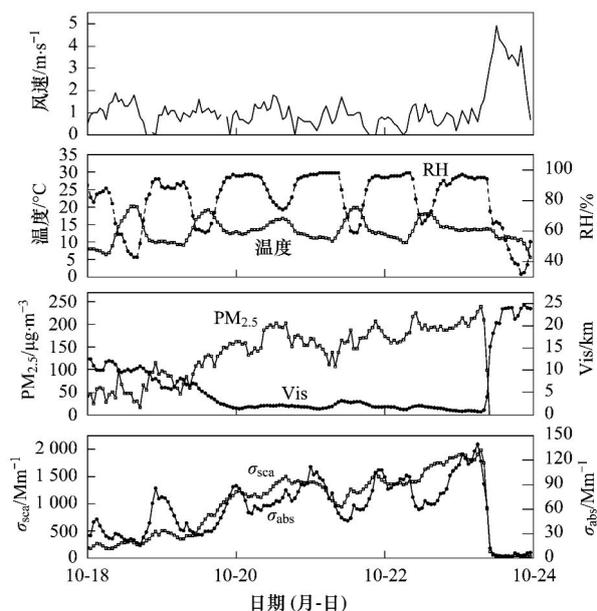


图 3 2011 年 10 月 18~23 日海淀站地面气象要素(风速、温度、相对湿度)与宝联站 $PM_{2.5}$ 浓度、能见度 (Vis)、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 的逐时变化

Fig. 3 Hourly variation of the surface meteorological elements at Haidian station and $PM_{2.5}$ concentration, visibility, σ_{sca} and σ_{abs} at Baolian station during Oct. 18th-23rd, 2011

宝联站日均 $PM_{2.5}$ 浓度比上甸子站偏高达 $118.2 \mu g \cdot m^{-3}$,该过程的城郊差异是 7 个过程中最大的,区域输送对上甸子的 $PM_{2.5}$ 浓度和气溶胶消光能力的影响相对较小.通常认为一个区域短期内排放源不会出现显著变化,因此,造成这些雾霾过程 $PM_{2.5}$ 污染及光学特性存在显著差异的原因主要是气象条件的变化,下面就针对气象条件的影响作用进行深入分析.

度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 的小时平均结果,以及该时段海淀站地面风速、温度和湿度的逐时变化情况.从地面风速可以发现,自 10 月 18 日开始一直到 23 日上午,海淀站地面风每天基本呈现相似的周期变化,即中午前后,伴随地面温度的升高,地面风速增大,此时测点相对湿度下降;到夜间,随着温度降低,地面风速降低,相对湿度逐渐增大,特别是 19 日以后,夜间相对湿度基本都在 95% 以上,出现大雾,在此期间

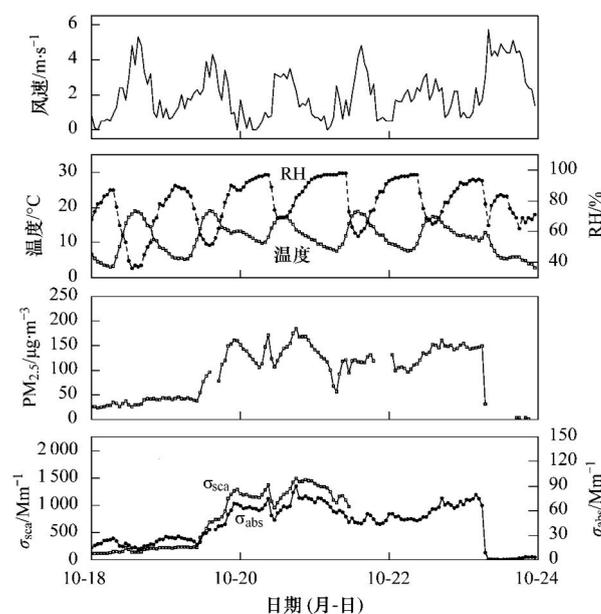


图 4 2011 年 10 月 18~23 日上甸子地面气象要素(风速、温度、相对湿度)与 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 的逐时变化

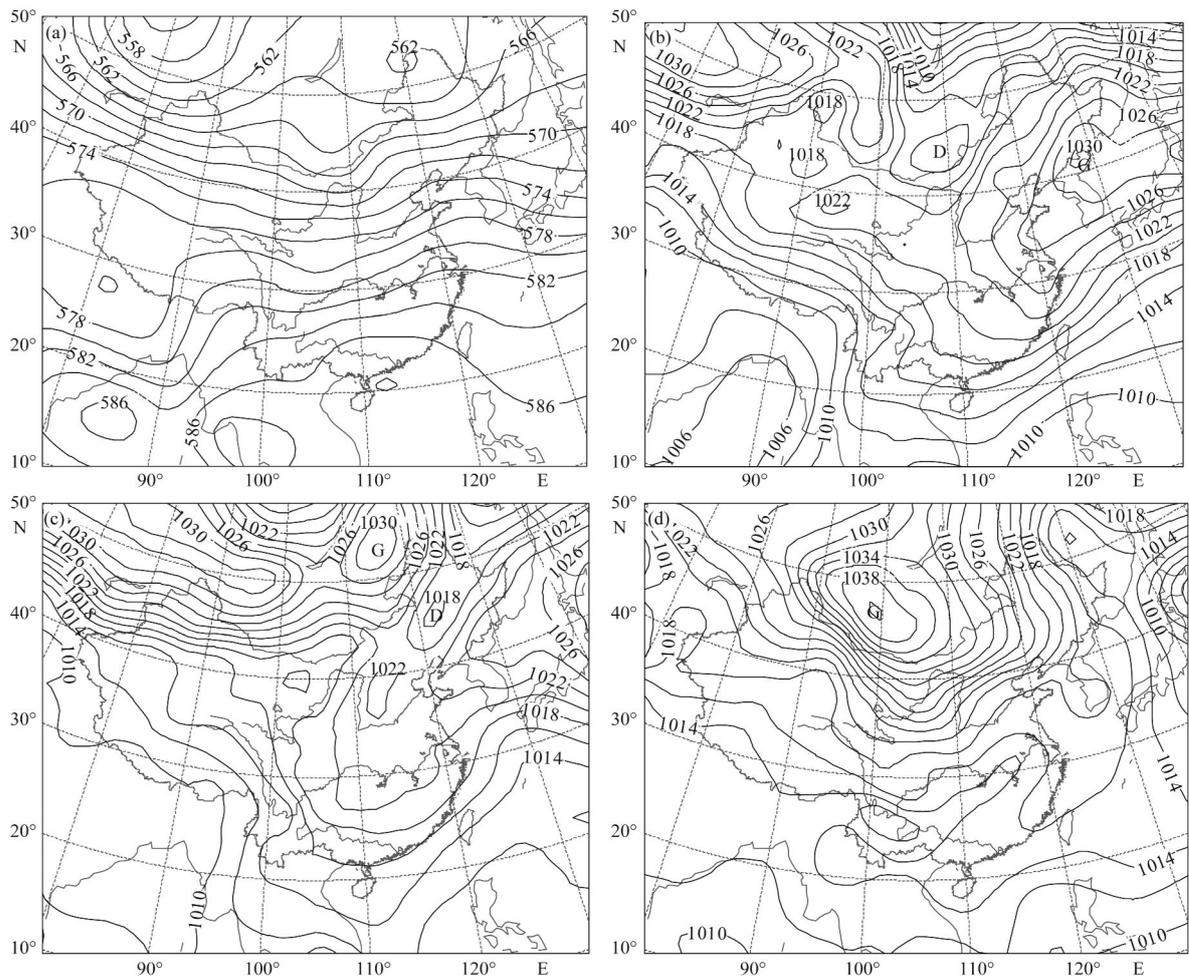
Fig. 4 Hourly variation of the surface meteorological elements and $PM_{2.5}$ concentration, visibility, σ_{sca} and σ_{abs} at Shangdianzi station during Oct. 18th-23rd, 2011

地面风速很低,平均为 $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大不到 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,非常不利于污染物的扩散,与此对应, $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 都呈现持续的增加。 σ_{sca} 从18日 272.6 Mm^{-1} 增加到22日的 1555.6 Mm^{-1} ,19日以后每日最大小时平均 σ_{sca} 都在 1000 Mm^{-1} ,23日上午达到近 2000 Mm^{-1} , σ_{abs} 虽然也呈明显的增加,但增加幅度较 $PM_{2.5}$ 和 σ_{sca} 偏弱,且日变化更加明显,这可能与黑碳主要来自于机动车的一次排放有关,而气溶胶散射更多的取决于二次生成的细粒子,在雾霾天气条件下,气溶胶的散射能力增加更快.随着相对湿度和气溶胶消光能力的增加,能见度随之迅速降低,20日之后,日均能见度基本在 2.0 km 以下,小时最低能见度 0.73 km 出现在23日07:00.图4给出的是上甸子站的情况,上甸子站风速相比城区要高,但也呈现明显的周期性日变化,受地形的影响,白天为偏西南风,夜间为东北和偏东风,这种情况持续到23日上午,反映了这段时间天气系统很稳

定.相比城区而言, $PM_{2.5}$ 浓度和 σ_{sca} 在上甸子站增加更加迅速,前者从19日上午(00:00~10:00的平均)的 $41.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 迅速增加到傍晚(18:00~23:00的平均)的 $142.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,增加了2.4倍左右,而城区同时增加约1倍左右. σ_{sca} 同时段增加了近4倍左右.对比来看,虽然宝联站 $PM_{2.5}$ 浓度比上甸子站明显偏高,但散射系数在两个站却比较接近,表明上甸子站的气溶胶具有更强的光散射能力.

2.4 雾霾期间天气条件及区域输送对气溶胶光学特性的影响

这里以2011年10月18~23日天气过程为例,分析了天气条件的变化及其对气溶胶光学性质的影响.图5为天气图,从环流形势来看,10月18日,北京高空500 hPa处于弱高压脊前,地面受冷高压控制(图略),19日高空转变为槽前,地面处于高压后部,北京及南部地区盛行偏南气流,风速较小,大气条件稳定,气象条件非常有利于污染物的累积和向



(a)和(b)分别为19日08:00时500 hPa和地面;(c)21日08:00时地面;(d)23日11:00时地面;其中G为高压中心,D为低压中心

图5 2011年10月19~23日高空和地面天气

Fig. 5 Surface and upper air weather charts from Oct. 19th to Oct. 23rd

北输送,地面 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 开始增加. 21 日地面形成低压辐合带, 污染物进一步汇聚累积, 22 日地面受均压场控制, 整层为下沉气流, 前几日汇聚的污染物不能很好的扩散, 高 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 依然维持. 此外, 这种天气形势有利于偏南水汽输送, 区域内湿度大, 从而造成了 20、22 和 23 日雾的出现. 这种天气形势一直维持到 23 日清晨, 造成城区 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 的极高值. 23 日随着蒙古高压迅速向东北移动, 东北风急剧增大, 迅速清除了大气中的污染物, 使得观测的气溶胶浓度水平迅速降低(图 3 和 4). 随着污染物的清除, 湿度降低, 能见度迅速好转.

为了分析区域输送的影响, 本研究采用海淀站风廓线雷达资料对此雾霾过程期间风场的垂直变化特征进行了分析. 该雷达为边界层风廓线雷达, 使用频率为 1 290 MHz, 探测高度为 3 500 m, 垂直分辨率 50 m, 时间分辨率为 5 min. 从风廓线探测结果可见, 从 18~23 日上午大气流动以约 600 m 高度为界[图 6(a)], 这与以往北京秋季雾霾天边界层结构的观

测结果基本一致^[19], 该高度可确认为边界层顶的高度. 在边界层内风速很小, 且风向存在明显的日变化, 即白天特别是下午为偏南风, 夜间至上午为东北风, 体现了北京地形作用下局地山谷平原风的特点, 也是造成 $PM_{2.5}$ 、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 出现小幅度日变化的原因. 边界层以上大部分时间为偏南风控制, 风速大, 风向维持在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 之间, 特别是 19 日 10:00 时以后, 北京上空转为强西南风, 对应宝联和上甸子的 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 随之急剧增加, 特别是上甸子地区增加更为显著, 配合垂直速度的监测结果可见[图 6(b)], 在边界层以上盛行偏南风的高度层内基本以下沉气流为主, 部分时段甚至到达地面, 偏西南风将南部城市地区污染物向北京输送, 在整层下沉气流作用下向边界层内输送, 使得地面污染物浓度随之增加, 且宝联和上甸子的 $PM_{2.5}$ 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 很快达到了相同的水平, 表明此雾霾过程中北京地区 $PM_{2.5}$ 污染和气溶胶光学参数明显受到了来自西南方向污染物输送的影响, 加之水平扩散非常弱, 造成局地污染物持续累积, 形成了 $PM_{2.5}$ 污染和

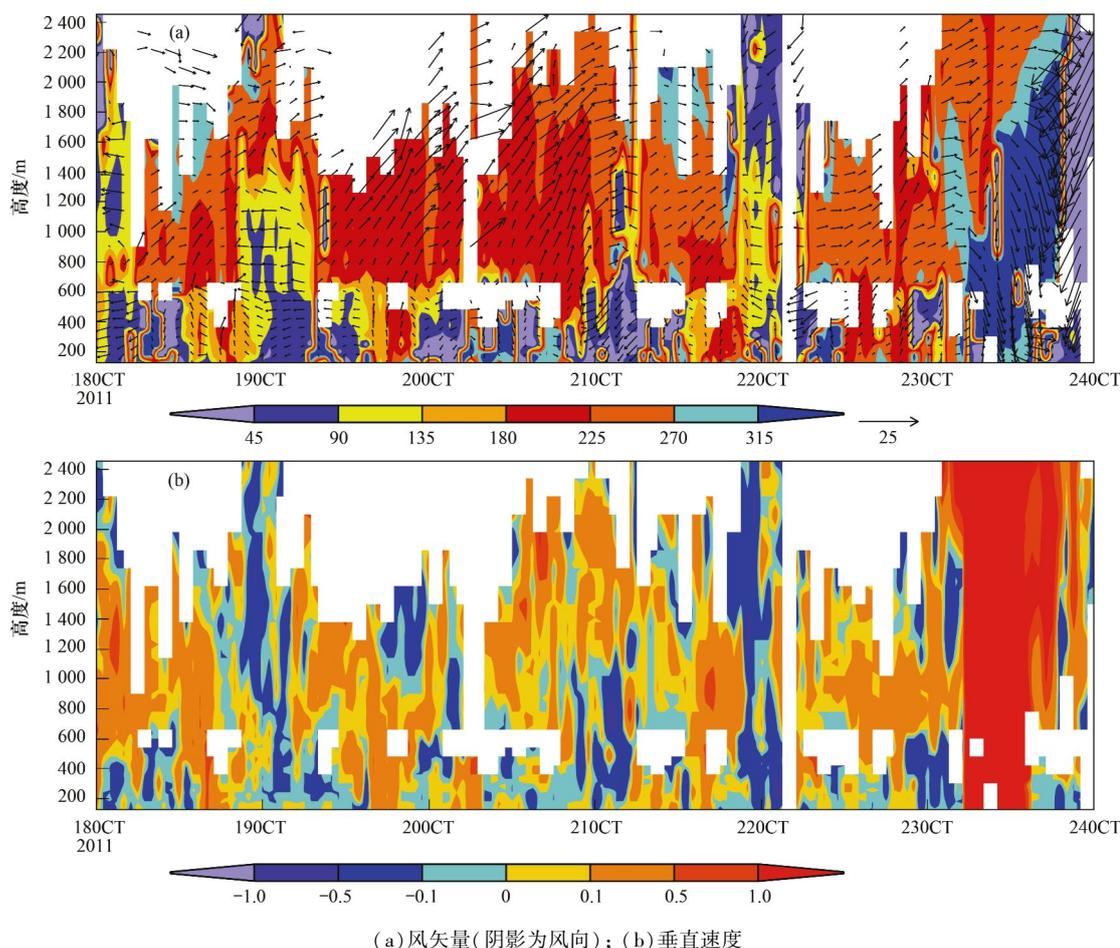


图 6 2011 年 10 月 18~23 日海淀站 1 h 间隔风廓线雷达探测

Fig. 6 One hour interval wind vector and vertical speed detected by windprofile lidar at Haidian during Oct. 18th-23rd, 2011

气溶胶消光最强的一次雾霾天气过程。

3 结论

(1) 2011 年秋季雾霾期北京城区和郊区 PM_{2.5} 浓度明显增高, 分别为非雾霾期的 3.3 和 4.8 倍, 城区高 PM_{2.5} 浓度造成雾霾类天气出现频率明显高于郊区。PM_{2.5} 浓度、 σ_{sca} 和 σ_{abs} 在轻雾和霾天城郊差异较小, 区域性特征最为明显, 轻雾天城区明显高于郊区, 区域输送的能力相对较弱, 而雾天 σ_{sca} 比较接近, 且雾天 σ_{sca} 在城区和郊区均达到了 1 000 Mm⁻¹ 以上, 气溶胶的散射能力较其他雾霾类天气都强, 区域输送的影响也较为明显。

(2) 气象条件的不同造成各雾霾过程 PM_{2.5} 污染和气溶胶光学特征呈现不同的特点。区域性最强的雾霾天气过程中, PM_{2.5} 浓度、 σ_{sca} 与 σ_{abs} 的城郊差异非常小, 平均值差异均在 10 个单位以内。10 月 18 ~ 23 日为雾、轻雾和霾集中出现的一次过程, 天气现象最为复杂, 也是 PM_{2.5} 污染程度和消光强度最强的一次过程。12 月 4 ~ 7 日的大雾天气过程是 PM_{2.5} 浓度和气溶胶光学参数城郊差异最大的一次过程。

(3) 典型雾霾天气过程分析表明, 北京地区地面多受低压辐合带或均压场控制, 区域内盛行偏西南风, 有利于污染物的汇聚和向北输送。同时, 边界层高度非常低, 基本维持在 600 m 左右, 上下分层明显, 上层偏西南风将南部城市地区污染物向北京输送, 在下沉气流的作用下造成边界层内污染物浓度增高, 边界层内风速很小, 水平扩散能力较弱, 造成局地污染物累积, 区域输送和局地累积共同作用形成了 PM_{2.5} 污染和气溶胶消光强度最强的一次过程。

致谢: 上甸子本底站的周怀刚、王振发、周礼岩等在仪器的日常维护及巡视方面做了大量工作, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Seasonal and diurnal variations of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environments in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(18): 2893-2900.
- [2] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [3] Dan M, Zhuang G S, Li X X, *et al.* The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 3443-3452.
- [4] Sun Y L, Zhuang G S, Wang Y, *et al.* The air-borne particulate pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(35): 5991-6004.
- [5] Huang X F, He LY, Hu M, *et al.* Annual variation of particulate organic compounds in PM_{2.5} in the urban atmosphere of Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(14): 2449-2458.
- [6] 赵普生, 张小玲, 徐晓峰. 利用日均值及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(4): 704-708.
- [7] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [8] 范焯, 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.
- [9] 樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测 [J]. *气候与环境*, 2009, **14**(6): 631-638.
- [10] 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1057-1062.
- [11] He X, Li C C, Lau A, *et al.* An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(22): 8903-8915.
- [12] Yan P, Tang J, Huang J, *et al.* The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(8): 2229-2242.
- [13] 柯建建, 汤洁. 北京上甸子秋冬季大气气溶胶的散射特征 [J]. *大气科学*, 2007, **31**(3): 553-559.
- [14] Garland R M, Schmid O, Nowak A, *et al.* Aerosol optical properties observed during campaign of air quality research in Beijing 2006 (CAREBeijing-2006): characteristic differences between the inflow and outflow of Beijing city air [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**: D00G04, doi: 10.1029/2008JD010780.
- [15] 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性 [J]. *应用气象学报*, 2010, **21**(3): 257-265.
- [16] Zhao X J, Zhang X L, Pu W W, *et al.* Scattering properties of the atmospheric aerosol in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 799-808.
- [17] 赵秀娟, 张小玲, 蒲维维, 等. 气象条件对上甸子地区气溶胶散射特征的影响 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3153-3159.
- [18] 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.
- [19] 张鑫, 蔡旭晖, 柴发合. 北京市秋季大气边界层结构与特征分析 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2006, **42**(2): 220-225.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-chen, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yue-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, <i>et al.</i> (810)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊