

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 ..... 张小玲,夏祥鳌,车慧正,汤洁,唐宜西,孟伟,董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 ..... 姚波,周凌晔,刘钊,张根,夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 ..... 方双喜,周凌晔,栾天,马千里,王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 段卿,安俊琳,王红磊,缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮污染特征比较 ..... 程玉婷,王格慧,孙涛,成春雷,孟静静,任艳芹,李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM<sub>10</sub> 中主要水溶性离子的影响 ..... 王芳,陈强,张文煜,郭勇涛,赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 ..... 梁宗敏,杜睿,杜鹏瑞,王亚玲,李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 ..... 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 ..... 李璇,王雪松,刘中,吴梁,翁燕波,胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 ..... 王海林,王俊慧,祝春蕾,聂磊,郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO<sub>2</sub> 实验研究 ..... 夏芝香,项群扬,周旭萍,方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 ..... 孙鹏程,李晓璐,成钢,陆勇,吴昌敏,罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 ..... 邢建伟,钱薇微,绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 ..... 王明珠,张运林,施坤,高贇,刘刚,蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 ..... 殷燕,吴志旭,刘明亮,何剑波,虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 ..... 韩晓霞,朱广伟,许海,Steven W. Wilhelm,秦伯强,李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征:以军山湖为例 ..... 刘霞,钱奎梅,谭国良,邢久生,李梅,陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>和营养盐垂向分布特征及相关性分析 ..... 王小雷,杨浩,顾祝军,张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 ..... 姜烈,何江涛,姜永海,刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 ..... 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,王巍,蒋新跃,刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 ..... 王红宇,刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 ..... 孙德帅,郑强强,张晓东,方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd<sup>2+</sup> 的影响 ..... 王建涛,孟昭福,杨亚提,杨淑英,李彬,马麟莉,许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 ..... 唐伟,郭悦,吴景贵,黄兆琴,代静玉 (2604)

TiO<sub>2</sub> 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 ..... 李明洁,喻泽斌,陈颖,王莉,刘晴,刘钰鑫,何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用 ..... 朱江鹏,梅婷,彭云,葛思怡,李时银,王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 ..... 马楠,田耀金,杨广平,谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 ..... 王梦月,马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 ..... 刘佳,沈志强,周岳溪,曹蓉,李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 ..... 青亮,黄锦琼,余小巍,张素坤,杨艳艳,任明忠,温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 ..... 卫丹,万梅,刘锐,王根荣,张讯达,文晓刚,赵远,陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 ..... 李晓玲,彭永臻,柴同志,朱建平,王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 ..... 郭雪,毕春娟,陈振楼,王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 ..... 江敏,Le Huy Tuan,梅卫平,阮慧慧,吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 ..... 谢婷,张淑娟,杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评价 ..... 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,李绘,陈文文,张莉,胡婷,石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 ..... 张鸿,赵亮,何龙,柴之芳,沈金灿,杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 ..... 李磊,任景玲,刘素美,蒋增杰,杜金洲,方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例 ..... 王幼奇,白一茹,王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 ..... 李楚娴,孙荣国,王定勇,赵铮,张金洋,马明,张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评价 ..... 何秀婷,王奇,聂湘平,杨永涛,程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 ..... 张春荣,吴正龙,姚春卉,高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究 ..... 伯鑫,王刚,温柔,赵春丽,吴铁,李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 ..... 王辉,谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 ..... 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,窦静,李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 ..... 陈喆,铁柏清,雷鸣,刘孝利,叶长城,罗梅梅,毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 潘莹,胡正华,吴杨周,孙银银,盛露,陈书涛,肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 ..... 贾曼莉,郭宏,李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 ..... 王宁,彭胜,陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 ..... 牟姝君,李秀芬,任月萍,王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 ..... 赵晨阳,魏源送,葛振,钟佳,才兴,张媛丽,李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NO 排放特征研究 ..... 丁钢强,韩圣慧,袁玉玲,罗琳,王立刚,李虎,李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 ..... 黄友福,许心雅,范良鑫,方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 ..... 王东梅,刘丹,刘庆梅,陶丽霞,刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 ..... 马兰,毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 ..... 赵志瑞,侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476,2556,2713,2770)

# 区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究

张小玲<sup>1,2</sup>, 夏祥鳌<sup>3\*</sup>, 车慧正<sup>4</sup>, 汤洁<sup>5</sup>, 唐宜西<sup>6</sup>, 孟伟<sup>1</sup>, 董璠<sup>1</sup>

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 3. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029; 4. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 5. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 6. 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 620225)

**摘要:** 基于华北区域大气本底站(北京上甸子站)地面观测和卫星遥感监测数据, 分析了2011年10月1~15日在天气系统和人为污染物排放的影响下3次华北平原地区污染输送事件对本底地区气溶胶质量浓度及其光学特性的显著影响。结果表明, 受人为污染事件输送影响, 上甸子站10月4~5日、7~9日及11~12日气溶胶浓度和反应性气体浓度显著增加, 和10月1~3日背景条件相比, 反应性气体NO<sub>x</sub>、CO体积浓度增加3~6倍, SO<sub>2</sub>体积浓度增加了10~20倍; PM<sub>2.5</sub>质量浓度10月9日达到200 μg·m<sup>-3</sup>; 污染期间500 nm日平均气溶胶光学厚度达到0.60~1.00, 气溶胶单次散射反照率低于0.88, 黑碳浓度增加4~8倍, 表明此次污染事件气溶胶吸收很强, 因气溶胶吸收作用导致大气吸收太阳辐射增加100~400 W·m<sup>-2</sup>, 气溶胶吸收和散射导致地表入射太阳辐射下降100~300 W·m<sup>-2</sup>, 地表入射太阳辐射减弱且大气加热增强将导致大气稳定度增加, 这可能会显著影响云和降水过程, 对区域天气和气候产生重要影响。

**关键词:** 气溶胶光学特性; 大气污染; 辐射强迫; 地基和卫星遥感观测; 上甸子本底站

中图分类号: X122; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2439-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.001

## Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes

ZHANG Xiao-ling<sup>1,2</sup>, XIA Xiang-ao<sup>3</sup>, CHE Hui-zheng<sup>4</sup>, TANG Jie<sup>5</sup>, TANG Yi-xi<sup>6</sup>, MENG Wei<sup>1</sup>, DONG Fan<sup>1</sup>

(1. Institute of Urban Meteorology, Chinese Meteorology Administration, Beijing 100089, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 3. LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 5. Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 6. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 620225, China)

**Abstract:** The significant effect of anthropogenic pollutants transportation on the physical and optical properties of regional background atmospheric aerosol was studied by using ground-based and satellite remote sensing data obtained at the atmospheric background station (Shangdianzi, Beijing) of North China during October 1 to 15 in 2011. The aerosol mass concentration and reactive gases concentration increased obviously during periods of October 4-5, October 7-9, and October 11-12. Comparing with the background period of October 1-3, volume concentration increased by a factor of 3-6 for reactive gases such as NO<sub>x</sub> and CO, and a factor of 10-20 for SO<sub>2</sub>. Mass concentration of PM<sub>2.5</sub> was about 200 μg·m<sup>-3</sup> on October 9. During haze period, the AOD at 500 nm varied between 0.60 to 1.00. The single scattering albedo (SSA) was lower than 0.88. And the black carbon concentration increased 4-8 times, which suggested the aerosol absorption was very strong during this pollution episode. The absorption of aerosol particles could cause 100-400 W·m<sup>-2</sup> increase of atmospheric radiation. The surface radiation decreased by about 100-300 W·m<sup>-2</sup> due to the aerosol scattering and absorption. This could cause higher stability of atmosphere, which will significantly affect the cloud and precipitation, and thus the regional weather and climate.

**Key words:** aerosol optical properties; air pollution; radiative forcing; ground-based and satellite remote sensing data; Shangdianzi background station

气溶胶通过与之密切相关的物理化学和生物过程对环境、健康和气候产生重要影响。气溶胶是导致地面能见度下降的首要原因<sup>[1,2]</sup>; 气溶胶, 特别是细颗粒气溶胶可能呼吸至肺细胞从而影响人体健康<sup>[3]</sup>, 并通过直接和间接辐射效应对区域乃至全球

收稿日期: 2013-08-28; 修订日期: 2014-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41075111, 41030107, 41005086, 41175031); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806027, GYHY201206037)

作者简介: 张小玲(1972~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为大气环境, E-mail: xlzhang@ium.cn

\* 通讯联系人, E-mail: xxa@mail.iap.ac.cn

气候产生重要影响<sup>[4,5]</sup>.大量研究分析表明,城市化和人为大气气溶胶排放量的影响可能是造成全球太阳辐射从变暗转为变亮趋势的主要原因<sup>[6-9]</sup>.气溶胶不仅来源于直接排放的大量粒子,而且来源于污染气体通过多种非均相化学反应转化形成的二次气溶胶粒子,气溶胶粒子的成分谱和尺度谱分布对气溶胶光学的光学特性有重要影响.研究指出<sup>[10]</sup>我国气溶胶浓度水平比较高,且不同区域气溶胶的化学组成有比较大的差异,对雾和霾的形成有重要贡献,进而减少到达地面的辐射,增加大气层结稳定度.吴兑等<sup>[11]</sup>对珠三角地区气溶胶及其辐射特性的观测分析表明气溶胶吸收系数、散射系数以及单次散射反照率存在着比较明显季节变化、日变化特征.气溶胶极大的时空变化特征以及复杂的物理、化学和光学特性是导致评估气溶胶气候环境效应不确定性较大的原因所在,因此通过各种观测手段获取气溶胶光学特性是减小这一不确定性的重要手段.

华北地区是我国气溶胶区域污染比较突出的地区之一,自然和人类活动排放的人为气溶胶和沙尘气溶胶复合作用使得该地区成为气溶胶浓度高值区之一<sup>[1,12]</sup>.因排放源和大气环流季节变化,该地区地面气溶胶浓度呈现显著季节变化特征,一般是冬春季较高,夏秋季较低.而柱浓度(气溶胶光学厚度)则是春夏较高、秋冬较低<sup>[13-15]</sup>,在相对清洁的背景地区气溶胶浓度表现为春季和夏季较高,而冬季则最低<sup>[16]</sup>.这种相反的季节变化特征与边界层高度季节变化密切相关,春季受沙尘天气影响较大,夏季与强光化学过程二次气溶胶的生成和较强偏南气流的输送关系密切,气溶胶吸湿增长也是导致该现象的原因之一<sup>[17]</sup>.

中国气象局在我国 14 个典型气候关键区已建立了 7 个大气本底站,开展气候、环境要素长期观测,为我国区域气候和生态环境变化研究以及大气污染防治和应对气候变化等工作提供基础数据.北京上甸子大气成分本底观测站是 20 世纪 80 年代初我国最早建立的华北区域大气本底观测站,也是世界气象组织(WMO)区域大气本底观测站之一,2005 年作为京津冀经济圈区域本底站入选科技部国家野外科学观测研究站.该站开展的观测项目包括气溶胶物理化学光学特性、微量反应性气体、温室气体、气象要素、辐射、降水化学等六大类世界气象组织区域大气观测系统,其中基本气象要素已有 50 多年的长期气候观测资料;气溶胶物理光学特性、微量反应性气体等连续在线观测已有近 10

年的累积资料.观测研究结果表明,上甸子本底站基本观测资料对华北区域大气本底(或背景)具有较好的代表性<sup>[16,18]</sup>,既反映了区域相对清洁的大气状况,也代表华北区域,特别是京津冀城市群人类活动对区域大气成分的影响.以往有关上甸子大气成分的研究多集中在分析温室气体、反应性气体、气溶胶理化特性以及气象条件的影响等方面<sup>[19-23]</sup>,研究这些大气成分变化的特征和机制;而有关气溶胶光学特性方面的研究还较少<sup>[24,25]</sup>,尤其是在气溶胶对太阳辐射影响方面的研究还较缺乏.

本研究利用华北区域上甸子本底站连续在线的气溶胶及其光学特性观测数据,结合卫星遥感监测和气象资料,针对 2011 年 10 月上中旬发生在华北地区的连续 3 次污染过程,分析在区域天气背景和污染物输送影响下的华北区域本底地区气溶胶的物理和光学特性及其变化,并定量评估气溶胶的辐射强迫效应和对地表辐射的影响.研究成果将加深对华北背景地区气溶胶光学特性的认识以及华北人为污染长距离输送对背景地区的影响.

## 1 观测仪器与数据处理

### 1.1 观测站点与仪器

上甸子本底站位于北京市东北部的密云县高岭镇上甸子村(117°07'E,40°39'N,海拔高度 293.3 m),距密云县城 55 km,距北京市区距离约 150 km,该站远离市区和主要公路,周围无明显污染源.本底站北面 and 东面为连续的丘陵山峰,西南方向的坡地为耕地,以南 1 200 m 左右为上甸子村居民生活区,与本底站的相对高差约为 50 m.该站常年平均气温为 10.4℃,年均降水量 592.3 mm,年均风速 2.7 m·s<sup>-1</sup>,主导风向为东北风和西南风,年日照时数 2 657.2 h.2003 年以来上甸子本底站主要大气成分观测系统均采用连续自动观测仪器,有严格的观测业务流程和规范,对仪器进行正常的巡检、校准和标定,保证观测数据的质量可靠.本研究分析数据使用的观测仪器见表 1.地面气象要素(风向、风速、温度、相对湿度、露点温度、气压)采用 CAWS 600B(S)-NEW 型自动气象站连续测量结果,天气现象为本底站人工观测记录.

### 1.2 观测资料处理

PM<sub>2.5</sub>质量浓度是利用 RP 1400a 锥形振荡天平法(TEOM-tapered element oscillating microbalance)观测仪器测量得到,该仪器每周进行流量和滤膜负载率检查,当滤膜负载率超过 30% 时更换新的滤

表 1 上甸子本底站地基观测项目及观测仪器

观测项目	代码	观测仪器	观测方法	观测频率/min
PM <sub>2.5</sub> 质量浓度	PM <sub>2.5</sub>	RP 1400a (美国热电公司)	TEOM 锥形振荡天平法	5
散射系数	ASP	M9003 浊度仪(澳大利亚 ECOTech 公司)	Nephelometer 光学测量, 波长 525 nm	5
黑碳浓度	BC	AE31 黑碳仪(美国 Magee Scientific)	Aethalometer 滤膜测量气溶胶光吸收技术, 7 波段	5
光学厚度	AOD	CE318 太阳光度计(法国 CIMEL 公司)	自动跟踪扫描太阳辐射计, 可见光至近红外有 8 个光谱通道	15
能见度	Vis	FD12 能见度仪(美国 Visala)	前向散射	1
氮氧化物浓度	NO <sub>x</sub>	TE 42CTL(美国热电公司)	化学发光法	5
二氧化硫浓度	SO <sub>2</sub>	TE 43CTL(美国热电公司)	脉冲荧光法	5
一氧化碳浓度	CO	TE 48C(美国热电公司)	气体透镜相关法	5
臭氧浓度	O <sub>3</sub>	TE 49C(美国热电公司)	紫外光度吸收法	5
辐射测量	Rad	辐射表(美国 Eppley 公司)	热电堆	1

膜. 气溶胶散射系数观测资料是利用澳大利亚 ECOTech 公司生产的 Nephelometer M9003 积分浊度仪连续观测得到波长为 525 nm 的气溶胶散射系数. 该仪器测量范围为  $0 \sim 2\,000 \text{ Mm}^{-1}$ , 积分角度为  $0^\circ \sim 170^\circ$ , 对一般大气气溶胶细粒子, 浊度仪由于积分角度不理想带来的截断误差不大于 10%. 日常运行中每日自动进行仪器零点检查, 每周采用厂家推荐的标准气 R134 气体进行人工跨点检查, 如果零点和跨点检查偏离较大, 则需对仪器进行全标定, 仪器自带加热系统对进气管湿度控制在 60% 以下. 观测数据的质量控制根据仪器零点检查和跨点检查结果进行数据订正, 并结合观测日志信息, 对奇异点数据进行甄别, 将质控后的 5 min 数据根据有效性统计平均计算出小时平均值和日平均值. 气溶胶吸收系数(黑碳浓度)所用观测仪器是 Magee Scientific Aethalometer AE31 型黑碳仪, 该仪器有 7 个测量通道, 波长分别为 370、470、520、590、660、880 和 950 nm. 基本测量原理是利用石英滤纸带所收集的粒子对光的吸收造成的衰减, 相对于黑碳气溶胶的吸收来说, 气溶胶其他成分对可见光的吸收可忽略不计. 当用一束光照射附有黑碳气溶胶的滤膜时, 由于黑碳气溶胶对可见光具有吸收特性, 通过测量透过采样滤膜的不同波长光的光学衰减量, 来确定某时段空气样品中的黑碳气溶胶质量浓度. 得到原始观测数据的频率为 5 min, 人工进行原始数据的质量检查和质量控制后, 计算出小时平均值和日平均值. PM<sub>2.5</sub> 浓度、气溶胶散射系数、吸收系数的观测仪器均安装在实验室内, 进气管直接伸出屋顶, 进气口高出屋顶观测平台约 1.5 m, 并装有防虫网.

气溶胶光学特性基于 Cimel 太阳光度计观测数据反演得到. 太阳光度计自动测量 340、380、440、500、670、870、940 和 1 020 nm 波段太阳直接辐射,

其中 940 nm 位于水汽吸收波段, 用于大气水汽含量反演, 其他波段则用于气溶胶光学厚度观测, 基于比尔朗伯定律得到气溶胶光学厚度:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda) \exp(-m\tau_T) \quad (1)$$

式中,  $F(\lambda)$  为太阳光度计测量的太阳光谱直接辐射,  $F_0(\lambda)$  为大气上界太阳光谱入射辐射, 即仪器响应常数, 该仪器每年秋季与标准仪器在中国气象科学研究院楼顶同步观测, 采用对比传递定标方式定标, 而标准仪器标定可追踪到国际气溶胶自动监测网络(AERONET)定标结果<sup>[26]</sup>.  $m$  为大气光学路径,  $\tau_T = \tau_a + \tau_r + \tau_{O_3} + \tau_{NO_2}$  为大气总光学厚度, 其中依次包括气溶胶光学厚度、分子散射光学厚度、O<sub>3</sub> 吸收光学厚度和 NO<sub>2</sub> 吸收光学厚度. 分子散射光学厚度由地面气压推出, O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 吸收光学厚度等于其总量乘以各自吸收系数[O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 来自臭氧监测仪(OMI)反演结果]. 气溶胶光学厚度随波长的变化可用以下公式描述:

$$\tau_\lambda = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $\alpha$  为 Angstrom 指数,  $\beta$  为浑浊度系数, 亦即 1 000 nm 气溶胶光学厚度, Angstrom 指数通常被用来反映粒子大小, 该值越大则表明气溶胶粒子越小, 反之亦然, 文中基于 440、670、870 和 1 020 nm 四波段气溶胶光学厚度拟合得到 Angstrom 指数.

Cimel 太阳光度计测量 440、670、870 和 1 020 nm 四波段光谱天空辐亮度, 并结合气溶胶光学厚度测量用于气溶胶尺度谱和折射指数反演. 本研究使用法国里尔大学光学实验室提供的 AERONET 标准最优反演算法处理观测数据<sup>[27,28]</sup>, 其基本过程简介如下.

当太阳天顶角( $\theta_s$ )与仪器观测天顶角( $\theta_o$ )相等时, 天空光谱辐亮度可简化为:

$$I(\Theta; \lambda) = F_0(\lambda) m_0 \exp(-m_s \tau_a) \times$$

$\omega_a P_a(\Theta; \lambda) + M(\tau_a; \omega_a; P_a(\Theta; \lambda); A; \theta; \Omega)$   
 式中,  $I(\Theta; \lambda)$  为天空光谱辐亮度,  $\Theta$  为散射角,  $\omega_a$   
 和  $P_a$  分别为气溶胶单次散射反照率和相函数,  
 $M(\dots)$  表示多次散射贡献, 该项与气溶胶光学特性、  
 地表反射率 ( $A$ ) 以及观测方位角 ( $\Omega$ ) 相关. 气溶胶  
 光学厚度和散射相函数 [ $\tau_{\text{sca}}(\lambda) P(\Theta; \lambda)$ ] 与尺度  
 谱 [ $n(r)$ ] 和折射指数 ( $\tilde{m}$ ) 关系如下:

$$\tau_a = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_\tau(r, \tilde{m}) n(r) dr \quad (3)$$

$$\tau_{\text{sca}}(\lambda) P(\Theta; \lambda) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_{\text{sca}}(\Theta; \lambda; r; \tilde{m}) n(r) dr \quad (4)$$

式中,  $K_\tau$  和  $K_{\text{sca}}$  分别为消光和散射截面, 反演算法中  
 使用 Mie 散射(球形粒子)和 T-Matrix(非球形粒子)  
 计算不同尺度参数和折射指数条件下气溶胶粒子消  
 光和散射截面库函数<sup>[29]</sup>, 用于反演调用,  $r$  表示气  
 溶胶半径,  $r_{\min}$  和  $r_{\max}$  为气溶胶最小最大半径, 算法中取  
 0.05  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$ ,  $n(r)$  为气溶胶尺度谱, 一般为 2  
 个对数正态分布之和, 分别对应细模态(粒子半径  
 小于 0.6  $\mu\text{m}$ ) 和粗模态(粒子半径大于 0.6  $\mu\text{m}$ ) 用  
 下列公式表示.

$$n(r) = \sum_{i=1}^2 \frac{c_{n,i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(r) - \ln(r_{n,i})}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (5)$$

式中,  $c$  为体积浓度,  $r$  为模态半径,  $\sigma$  为模态标准  
 偏差.

积分方程(3)和(4)为弗雷德霍姆第一类积分  
 方程, 其数值解受观测数据误差影响极大, 因此需要  
 先验知识加以约束反演. AERONET 最优反演算法  
 中使用的多源数据不仅包括观测的  $\tau_a$  和  $I(\Theta; \lambda)$ ,  
 也包括重要的物理约束, 如物理量非负且物理量平  
 滑(折射指数随波长变化、气溶胶尺度谱随粒径变  
 化). 此外基于上述公式可知反演算法必是一个迭  
 代的最优拟合过程, 迭代的作用在于消除多次散  
 射贡献. 反演中  $A$  采用中分辨率光谱成像仪(MODIS)  
 地表反射率数据. 气溶胶散射系数与消光系数之比  
 为气溶胶单次散射反照率(SSA), 是表征气溶胶粒  
 子吸收特性的关键参数. 基于反演得到的气溶胶尺  
 度谱和折射指数以及气溶胶粒子消光和散射截面  
 库函数即可计算得到气溶胶消光系数和散射系数,  
 进而得到 SSA. 基于反演得到的气溶胶光学特性,  
 驱动反演程序中辐射传输模式计算得到大气顶和  
 地表短波辐射通量, 此外还计算大气中没有气溶  
 胶存在时

的短波辐射通量用于分析气溶胶对大气顶和地表  
 辐射通量的可能影响, 即气溶胶直接辐射强迫. 气  
 溶胶导致大气顶和地表短波辐射通量变化之差即  
 为气溶胶对大气中短波辐射强迫. 云干扰是气溶  
 胶光学测量中的一个很大的干扰因素, 为尽可能  
 消除云的干扰, 文中采用 AERONET 云检测算法  
 对气溶胶光学厚度数据进行了数据控制.

华北地区日气溶胶光学厚度空间分布来自  
 MODIS 的 5.1 版本二级产品, 国内外已有大量  
 验证 MODIS 气溶胶光学厚度产品的研究<sup>[30,31]</sup>.  
 与华北 AERONET 站点气溶胶光学厚度对比表明  
 MODIS 气溶胶光学厚度精度达到仪器设定目标,  
 即在陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度不确定性  
 小于 20%<sup>[32]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 天气过程对气溶胶及气态污染物浓度的影响

2011 年 9 月 30 日较强冷空气在华北平原过  
 境后, 10 月 1~3 日北京地区天气以晴为主, 日照  
 时数大于 10 h 以上, 上旬以偏北风为主, 湿度  
 较低、气压较高, 各项污染物浓度都在很低的  
 水平, 大气透明度好, 能见度在 20 km 以上. 随  
 后, 地面冷高压逐渐变性, 强度减弱, 地面逐渐  
 转为高压和高压后部较稳定型天气, 10 月 4~11  
 日华北平原大部分地区出现雾霾天气. 10 月 4  
 日低空 850 hPa 转为浅槽前, 低层偏南风加强,  
 湿度增大[图 1(a)]. 10 月 5 日午后, 随着空  
 中小浅槽的接近, 地面气压梯度加大, 从地面  
 到低空形成较强的偏南气流[图 1(b)], 致使上  
 旬本底站湿度增大, 污染物浓度不断积累, 反  
 应性气体浓度、气溶胶浓度以及吸收散射特性  
 增强(图 2). 10 月 5 日夜到 10 月 6 日因一小  
 股冷空气影响北京, 污染物浓度明显降低. 10  
 月 7 日大气低层 850~925 hPa 暖脊发展东移,  
 低层偏南气流逐渐加强, 10 月 7 日 20 时 850  
 hPa 西南风 12  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 有逆温存在和维持, 大  
 气层结处于稳定状态, 地面为弱高压控制, 天  
 气比较稳定, 地面相对湿度逐渐增加, 天空云  
 量增多, 反应性气体和气溶胶浓度逐渐增大,  
 能见度降低. 8 日低层偏南气流仍较强[图 1(c)],  
 9 日天气系统东移, 虽偏南气流有所减弱, 但  
 北京地区地面处于鞍型场控制, 辐合加强[图  
 1(d)], 污染最为严重,  $\text{PM}_{2.5}$  和黑碳浓度最  
 大小时值分别达到 323  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 12.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  
 能见度只有 400 m, 北京及华北平原大部分  
 地区出现轻雾或霾天气. 10 月 9 日北京地区  
 部分地区出现 1 mm 以下的微量降水. 由于受  
 降水蒸发、低层南风输送和地形遮挡等影响,

造成在北京北部地区湿度增大和污染物堆积, 大气能见度较差, 出现大雾和高污染浓度的雾霾天气. 10月10日08:00一股弱冷空气从北京地区扫过, 污染物浓度有所降低. 随后转为高压南部, 偏东风加强, 后又转为高压后部影响, 到10月11~12日污染物浓度继续增加. 10月13日北京地区出现全市性降水,  $PM_{2.5}$  和黑碳浓度稍降低, 10月14日后较强冷空气过境, 华北平原转受高压前部控制, 偏北风较明

显, 污染物浓度大幅降低, 云量减少, 大气透明度增强, 能见度转好.

从图2可见, 受天气系统和边界层气象要素变化的影响, 10月1~15日华北平原地区出现了3次污染物浓度增加和3次降低的过程, 在偏南风输送作用下, 华北平原南部污染物不断向下游地区及本底站输送, 造成区域及本底站微量反应性气体和气溶胶浓度及其光学特性有明显的增加.

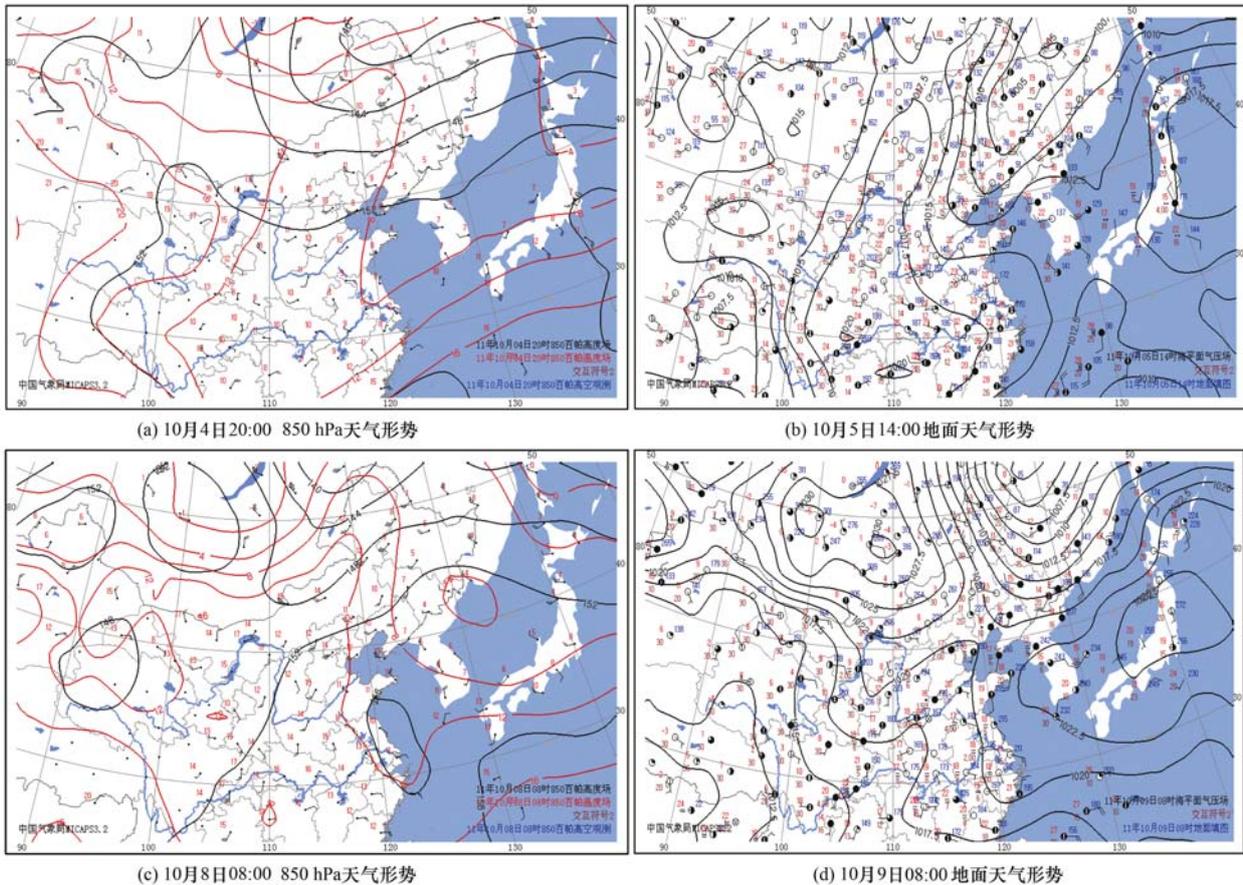


图1 污染过程形成和发展阶段低空(850 hPa)和地面天气形势

Fig. 1 Low level and surface weather condition during the air pollution period of Oct. 4-5<sup>th</sup> and 8-9<sup>th</sup>

## 2.2 气溶胶浓度、光学特性与反应性气体浓度逐日变化特征分析

图3是10月1~15日上午甸子站观测的气溶胶  $PM_{2.5}$  质量浓度、气溶胶散射系数 ASP、黑碳气溶胶浓度 BC 以及反应性气体  $SO_2$ 、 $NO_x$  和 CO 体积浓度, 污染期间  $PM_{2.5}$  质量浓度超过  $100 \mu g \cdot m^{-3}$ , 10月9日最高日平均浓度达到  $204 \mu g \cdot m^{-3}$ , 达到空气质量5级重度污染级别, 表征人为污染的气体成分也表现出类似变化特征, 气溶胶的散射系数和黑碳浓度同步出现最高值, 分别为  $1578 M \cdot m^{-1}$  和  $8.9 \mu g \cdot m^{-3}$ , 远高于非污染期间的浓度.

## 2.3 气溶胶光学特性及直接辐射效应

图4给出了华北地区2011年10月1~15日逐日 MODIS 气溶胶光学厚度(AOD)分布, 可见10月1~3日华北地区北部( $39^\circ N$  以北) AOD 小于 0.20, 而其南部地区污染严重, 部分地区 AOD 超过 0.80 以上, 需要注意的是 MODIS 只能在晴空条件下反演气溶胶光学厚度, 因此结果图上有大量空白, 对分析气溶胶空间分布特征有一定影响. 10月4~5日在较强偏南气流的控制下, 南部污染物北移至燕山南麓, 10月5日华北平原全部污染严重, AOD 增加到 0.80 以上. 10月6日 AOD 高值区南移至  $37^\circ N$  以南, 而10月7~8日华北平原地区呈现更大范围且强度大的区域污染特征, 整个华北平原气溶胶光学

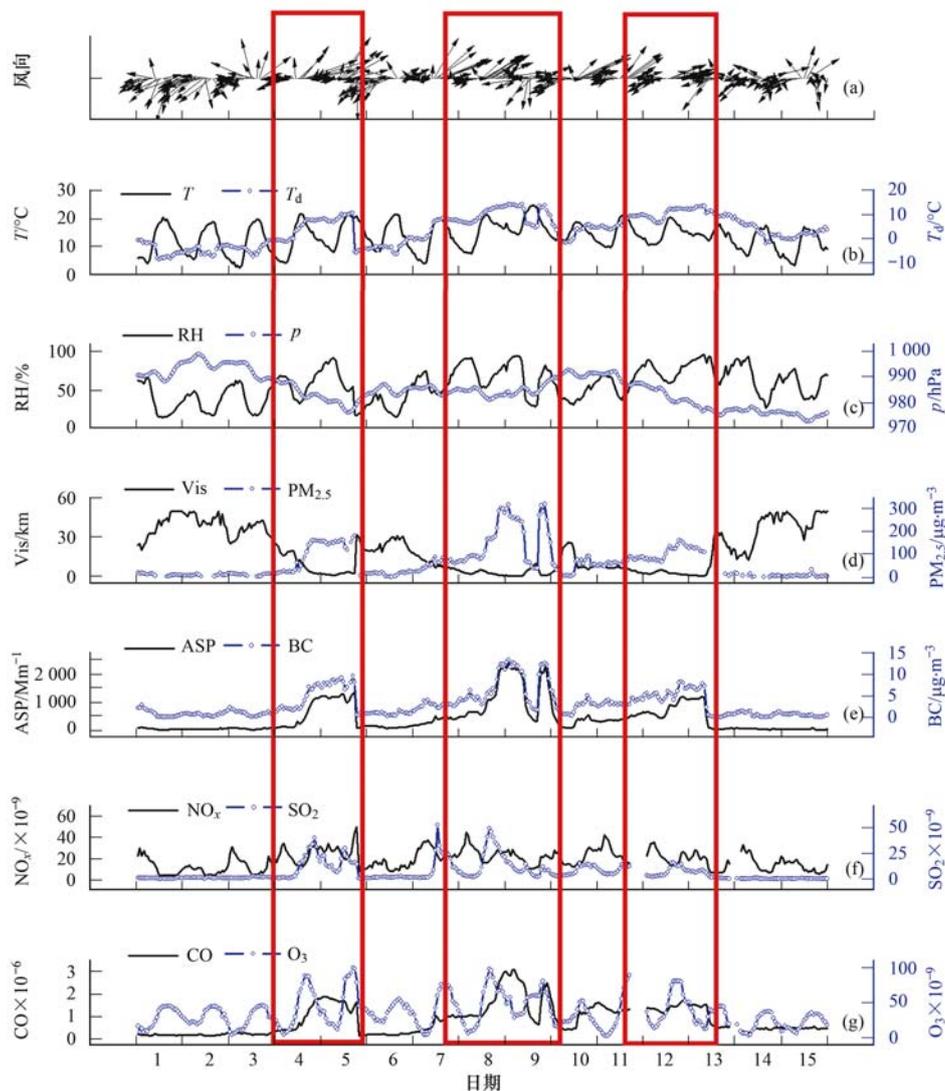


图2 上甸子本底站 2011 年 10 月 1 ~ 15 日地面气象要素和污染物浓度逐时演变与 3 次污染过程

Fig. 2 Hourly variation of surface meteorological parameters and concentration of air pollutants at Shangdianzi background station from Oct. 1 to Oct. 15, 2011

厚度均超过 0.8, 10 月 9 ~ 10 日华北因受云的影响, MODIS 卫星未能大面积反演出华北平原气溶胶光学厚度, 但从零星反演结果来看, 9 日华北平原气溶胶光学厚度也可能处在高值. 10 月 11 日华北平原南部大部分地区再次显现气溶胶光学厚度高值.

图 5 给出了上甸子站 CE318 太阳光度计观测的 10 月 1 ~ 15 日 500 nm 日平均 AOD 以及 Angstrom 波长指数, 日平均计算中需要 10 个以上观测数据. 从中可见上甸子站 AOD 与卫星 AOD 有很好的匹配, 10 月 1 ~ 3 日 AOD 维持在 0.18 左右, 而 10 月 4 日 AOD 达 0.60, 日平均 AOD 最高值出现在 10 月 7 日达 1.00, 随后逐日下降, 到 10 月 14 ~ 15 日 AOD 恢复至 10 月初水平. 而从 Angstrom 波长指数来看, 此次气溶胶污染事件主要源于人为活动排

放的细模态气溶胶, 同时粗模态气溶胶粒子也有一定贡献, 这可从图 6 给出的气溶胶体积谱看得十分清晰. 污染期间粗细模态气溶胶体积浓度显著增加 6 ~ 10 倍, 污染期间细模态对气溶胶消光贡献占 90%, 表明人为排放细模态气溶胶以及二次生成的气溶胶对气溶胶消光贡献占绝对主导地位. 近地面气溶胶  $PM_{2.5}$  质量浓度、黑碳浓度、散射系数以及 CO、 $SO_2$ 、 $NO_x$  等反应性气体浓度(图 3)与地基和卫星遥感观测的 AOD 变化有比较好的一致性, 这与其他关于 MODIS 气溶胶光学厚度与地基太阳光度计测量值和地面  $PM_{2.5}$  质量浓度之间较好的相关性结论一致<sup>[15,33,34]</sup>. 需要强调指出的是  $PM_{2.5}$  值表征的是地面气溶胶浓度, 而 MODIS 和太阳光度计反演的是整层大气气溶胶消光能力, 与  $PM_{2.5}$  值有关联但存

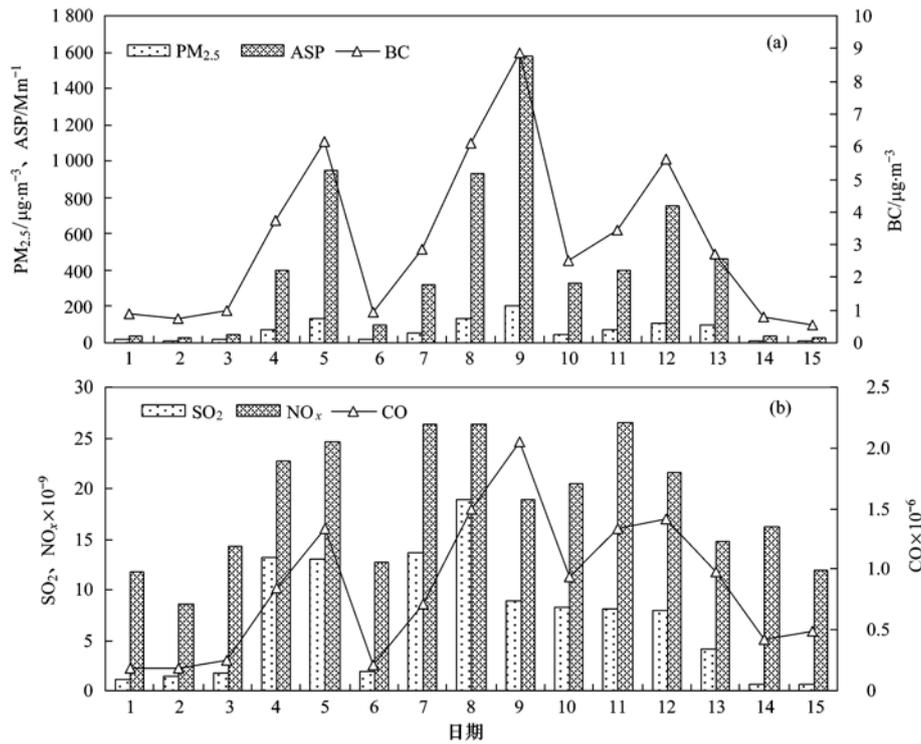


图3 2011年10月1~15日上午甸子本底站气溶胶质量浓度与光学特性及反应性气体浓度逐日变化  
 Fig. 3 Daily average variation of aerosol and reactive gases concentration and optical properties at Shangdianzi background station from Oct. 1 to Oct. 15, 2011

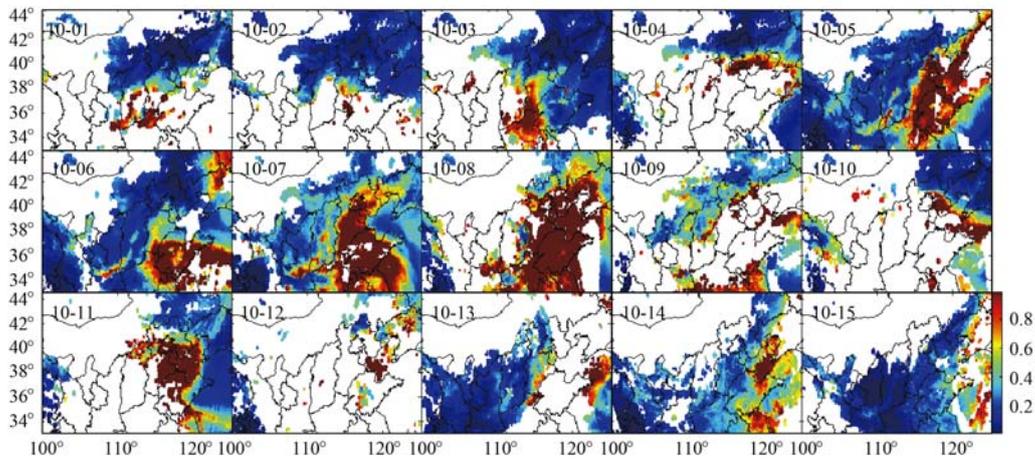


图4 2011年10月1~15日华北地区MODIS气溶胶光学厚度(550 nm)逐日分布  
 Fig. 4 Daily distribution of MODIS AOD (550 nm) over Northern China from Oct. 1 to 15, 2011

在一定区别,因此一些时段  $PM_{2.5}$  值可能与气溶胶光学厚度对应较差,这可能与气溶胶垂直结构有密切关系,此外气溶胶物理化学成分的差异也可导致两者变化不同步。

图7给出了10月4、5、7、11日这4个污染日440 nm气溶胶单次散射反照率(SSA)日平均值,从反演结果来看,此次污染事件气溶胶吸收很强,气溶胶消光中吸收贡献达到15%~25%。SSA的结果比

北京地区10月平均值略偏小(440 nm的SSA约0.88),但北京地区10年的观测数据表明有约13%的SSA反演结果小于0.85,表明文中反演结果处于合理范围。大气气溶胶中主要吸收成分包括黑碳,棕色碳和沙尘,由于此次污染事件中从尺度谱来看是一次人为污染事件,因此可以排除沙尘,此次强吸收的污染事件可能与黑碳和有机碳的吸收密切关系,这从黑碳气溶胶浓度测量值可以部分印证,地面监

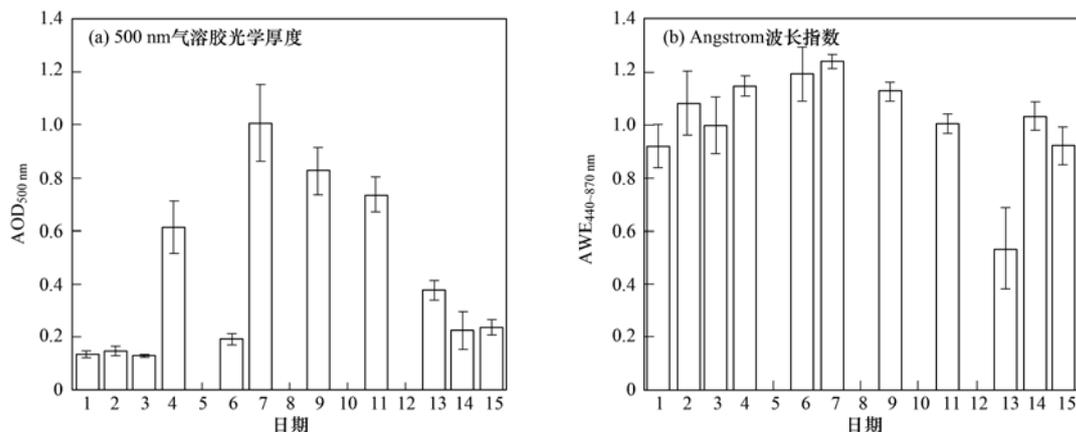


图 5 2011 年 10 月 1 ~ 15 日上午子本底站地基太阳光度计 CE318 观测的 500 nm 气溶胶光学厚度和 Angstrom 波长指数

Fig. 5 Aerosol optical depth and angstrom index based on CE318 (500 nm) observation at Shangdianzi background station from Oct. 1 to 15, 2011

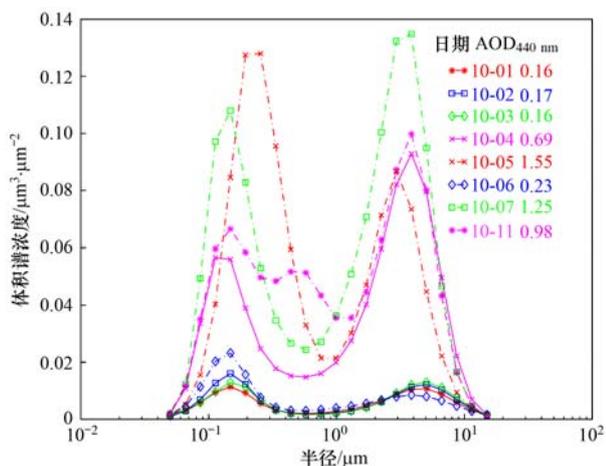


图 6 2011 年 10 月 1 ~ 7 日和 11 日气溶胶体积谱浓度分布及对应气溶胶光学厚度

Fig. 6 Aerosol volume concentration and corresponding AOD during Oct. 1 to 7 and 11, 2011

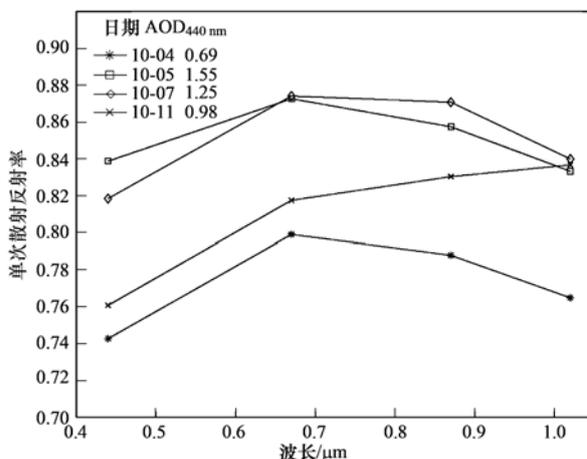
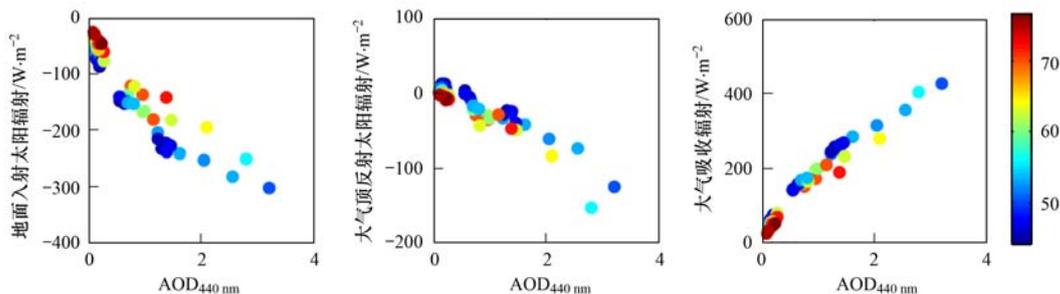


图 7 污染条件下气溶胶单次散射反照率

Fig. 7 Aerosol single scattering albedo under the pollution condition

测到的黑碳气溶胶浓度显示污染期间黑碳浓度增加迅速(图 3). 但由于 SSA 不仅与黑碳浓度有关,还与气溶胶尺度以及气溶胶混合状态有密切关系,此外黑碳测量反应的主要是地面浓度,而反演的 SSA 代

表的是整层信息,因此 SSA 未能与黑碳浓度有非常好的对应关系. 强吸收性气溶胶导致气溶胶气候辐射效应可能是加热而不是冷却效应. 图 8 给出了气溶胶对瞬时地面入射太阳辐射和大气顶反射太阳辐射以及大气吸收的影响,从中可看出污染期间气溶



图中色标表示的是太阳天顶角

图 8 气溶胶对地面入射太阳辐射、大气顶反射太阳辐射和大气吸收辐射的可能影响

Fig. 8 Effect of aerosol on surface incoming solar radiation, scattering solar radiation on the top of the atmosphere and absorbed solar radiation within the atmosphere

胶导致瞬时地面太阳辐射显著下降  $100 \sim 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 而大气顶反射的太阳辐射也因气溶胶的强烈吸收而显著下降, 最高可达  $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 气溶胶极强的吸收导致大气吸收太阳辐射增加  $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  以上, 最高甚至超过  $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . 气溶胶直接辐射效应因大气顶入射辐射量值(太阳天顶角)变化而变化. 地面入射太阳辐射下降而大气吸收太阳辐射增加将导致大气稳定度增加, 从而可能对云和降水生消过程产生重要影响.

### 3 结论

(1) MODIS 气溶胶光学厚度数据揭示 2011 年 10 月 4 ~ 15 日华北地区发生了 3 次由南而北的大范围污染事件, 因华北南部人为污染输送导致上甸子站大气成分发生显著变化. 10 月 4 ~ 11 日气溶胶  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和反应性气体浓度显著增加, 与 10 月 1 ~ 3 日晴空背景条件相比, 反应性气体  $\text{NO}_x$ 、CO 体积浓度增加 3 ~ 8 倍,  $\text{SO}_2$  体积浓度增加了 10 ~ 20 倍;  $\text{PM}_{2.5}$  浓度 10 月 9 日超过  $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 黑碳浓度增加 4 ~ 8 倍.

(2) 区域性污染事件中人为污染气溶胶吸收很强, 人为活动排放的细模态气溶胶以及二次生成的气溶胶对气溶胶消光贡献占绝对主导地位. 污染期间 500 nm 气溶胶光学厚度达到 0.60 ~ 1.00, 粗细模态气溶胶体积浓度显著增加 6 ~ 10 倍, 细模态粒子对气溶胶消光特性贡献超过 90%, 气溶胶单次散射反照率低于 0.88.

(3) 因气溶胶极强的吸收作用导致气溶胶大气顶气候辐射效应为加热效应, 即气溶胶导致大气顶太阳辐射强迫下降而并非增加, 气溶胶吸收和散射导致地表入射太阳辐射下降  $100 \sim 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而大气吸收太阳辐射增加  $100 \sim 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . 地表入射太阳辐射减弱且大气加热增强将导致大气稳定度增加, 这可能将显著影响云和降水过程, 对区域天气和气候产生重要影响.

致谢: 感谢上甸子区域大气本底站和气象观测站工作人员在数据获取和处理上提供的帮助.

### 参考文献:

- [ 1 ] Li Z Q, Chen H, Cribb M, *et al.* Preface to special section on East Asian studies of tropospheric aerosols: an international regional experiment (EAST-AIRE) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D22), doi: 10.1029/2007JD008853.
- [ 2 ] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 北京市大气能见度规律及下降原因[J]. *环境科学研究*, 2003, **16**(2): 10-13.
- [ 3 ] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. *大气环境化学*[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 274-275.
- [ 4 ] 罗云峰, 周秀骥, 李维亮. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状[J]. *地球科学进展*, 1998, **13**(6): 572-581.
- [ 5 ] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟[J]. *大气科学*, 1998, **22**(4): 418-427.
- [ 6 ] Alpert P, Kishcha P, Kaufman Y, *et al.* Global dimming or local dimming?: Effect of urbanization on sunlight availability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**, L17802, doi: 10.1029/2005GL023320.
- [ 7 ] Streets D G, Wu Y, Chin M. Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition [J]. *Geophysical Research Letters*, **33**(15), L15806, doi: 10.1029/2006GL026471.
- [ 8 ] Wild M, Gilgen H, Roesch A, *et al.* From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface [J]. *Science*, 2005, **308**(5723): 847-850.
- [ 9 ] Xia X. A closer looking at dimming and brightening in China during 1961-2005 [J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**(5): 1121-1132.
- [ 10 ] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [ 11 ] 吴兑, 毛节奏, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39**(11): 1542-1553.
- [ 12 ] Xia X, Chen H, Zhang W. Analysis of the dependence of column-integrated aerosol properties on long-range transport of air masses in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(36): 7739-7750.
- [ 13 ] 车慧正, 石广玉, 张小曳. 北京地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射强迫的研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, **24**(5): 699-704.
- [ 14 ] 李本纲, 冉阳, 陶澍. 北京市气溶胶的时间变化与空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1425-1429.
- [ 15 ] 王静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的特征及其相关性[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, **27**(1): 10-16.
- [ 16 ] Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Seasonal and diurnal variations of ambient  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in urban and rural environments in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(18): 2893-2900.
- [ 17 ] Li W J, Shao L Y, Buseck P R. Haze types in Beijing and the influence of agricultural biomass burning [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(17): 8119-8130.
- [ 18 ] Lin W, Xu X, Zhang X, *et al.* Contributions of pollutants from North China Plain to surface ozone at the Shangdianzi GAW Station [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(19): 5889-5898.
- [ 19 ] 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{2.5}$  变化特征的城郊对比分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1059-1065.

- [20] Zhang F, Zhou L, Yao B, *et al.* *In-situ* measurement of atmospheric CFC-11 at the Shangdianzi Global Atmosphere Watch (GAW) regional station [J]. *Science China Earth Sciences* 2011, **54**(2): 298-304.
- [21] 赵普生, 张小玲, 孟伟, 等. 京津冀区域气溶胶中无机水溶性离子污染特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1546-1549.
- [22] 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.
- [23] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 PM<sub>2.5</sub> 污染与气溶胶光学特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 416-423.
- [24] Che H Z, Yang Z F, Zhang X Y, *et al.* Study on the aerosol optical properties and their relationship with aerosol chemical compositions over three regional background stations in China [J]. *Atmospheric Environment*, **43**(5): 1093-1099.
- [25] 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**: 2229-2242.
- [26] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, *et al.* Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China aerosol remote sensing network [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D3), doi: 10.1029/2008JD011030.
- [27] Dubovik O, Sinyuk A, Lapyonok T, *et al.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(D11), doi: 10.1029/2005JD006619.
- [28] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D16): 20673-20696.
- [29] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比 [J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(Z1): 127-135.
- [30] 朱爱华, 李成才, 刘桂青, 等. 北京地区 MODIS 卫星遥感气溶胶资料的检验与应用 [J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(1): 86-90.
- [31] Xie Y, Zhang Y, Xiong X X, *et al.* Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(33): 5970-5978.
- [32] Xia X G, Chen H B, Goloub P, *et al.* Climatological aspects of aerosol optical properties in North China Plain based on ground and satellite remote-sensing data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, **127**: 12-23.
- [33] Liu Y, Franklin M, Kahn R, *et al.* Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in the St. Louis area: a comparison between MISR and MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **107**(1-2): 33-44.
- [34] Kumar N, Chu A, Foster A. An empirical relationship between PM<sub>2.5</sub> and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(21): 4492-4503.

## CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM <sub>2.5</sub> in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM <sub>10</sub> in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO <sub>2</sub> Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between <sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub> Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd <sup>2+</sup> onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO <sub>2</sub> Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-tuan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu <sup>2+</sup> on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N <sub>2</sub> Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin	(2834)

# 《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)

2014年7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行