

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM<sub>2.5</sub>时空演变过程 ..... 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)

西安市PM<sub>2.5</sub>健康损害价值评估 ..... 魏国茹,史兴民 (3014)

河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 ..... 江琪,王飞,孙业乐 (3022)

南京北郊秋季PM<sub>2.5</sub>碳质组分污染特征及来源分析 ..... 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)

临安夏季霾和清洁天气PM<sub>2.5</sub>化学组成特征比较 ..... 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)

盘锦市秋冬季节PM<sub>2.5</sub>中碳组分特征及来源解析 ..... 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)

南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应 ..... 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)

夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量 ..... 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)

太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源 ..... 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)

杭州地区大气CO<sub>2</sub>体积分数变化特征及影响因素 ..... 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)

典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征 ..... 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)

地级市域工业VOCs排放源排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例 ..... 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)

青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价 ..... 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)

轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究 ..... 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)

南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 ..... 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金凤,李慧明 (3118)

西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析 ..... 石栋奇,卢新卫 (3126)

三峡库区主要河流秋季pCO<sub>2</sub>及其影响因素 ..... 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)

泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素 ..... 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)

生物滞留对城市地表径流磷的去除途径 ..... 李立青,刘雨情,杨佳敏,王娟 (3150)

淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 ..... 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)

抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系 ..... 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)

蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响 ..... 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)

生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响 ..... 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)

Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能 ..... 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)

Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制 ..... 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)

铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制 ..... 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)

铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验 ..... 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)

制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法 ..... 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)

电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响 ..... 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)

不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求 ..... 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)

基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响 ..... 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)

采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除 ..... 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)

间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 ..... 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)

基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析 ..... 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)

纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响 ..... 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)

气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响 ..... 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)

活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 ..... 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)

耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性 ..... 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)

PFOS前体物质(PreFOs)降解菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)

采油井场土壤微生物群落结构分布 ..... 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)

铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征 ..... 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)

广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 ..... 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)

邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析 ..... 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)

成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素 ..... 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性 ..... 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)

塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系 ..... 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)

高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制 ..... 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)

施硼对水稻幼苗吸收和分泌硼的影响 ..... 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)

不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 ..... 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)

南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估 ..... 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)

三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析 ..... 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)

人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性 ..... 时红蕾,王晓昌,李倩 (3434)

COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>对青霉素菌渣厌氧消化影响 ..... 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)

果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征 ..... 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH<sub>3</sub>挥发的影响 ..... 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)

《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451)

# 南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应

黄聪聪<sup>1,2</sup>, 马嫣<sup>1,2\*</sup>, 郑军<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

**摘要:** 2016 年 1 月 1 ~ 19 日在南京北郊利用三波长光声黑碳光度仪 (PASS-3) 对气溶胶的光学性质进行了实时在线观测, 同时结合气溶胶化学组成分析了黑碳气溶胶的光吸收增强效应. 结果表明, 观测期间气溶胶在 532 nm 下的吸收系数、散射系数、单散射反照率的平均值为  $(64.19 \pm 35.28) \text{ Mm}^{-1}$ 、 $(454.68 \pm 238.71) \text{ Mm}^{-1}$ 、 $0.87 \pm 0.03$ , 受边界层高度及颗粒物浓度的影响, 呈现出明显的日变化特征. 黑碳气溶胶的质量吸收截面 (MAC) 在观测期间的变化趋势为前期低, 后期高, 与非 EC 组分相对 EC 比值的变化趋势一致, 受不同污染条件下二次物质的占比及覆盖物厚度变化的影响. 基于 MAC 计算得到的 405、532、781 nm 下的光吸收增强 ( $E_{\text{MAC}}$ ) 平均值分别为  $1.53 \pm 0.56$ 、 $1.34 \pm 0.47$ 、 $1.14 \pm 0.40$ , 随着波长增加而降低, 存在棕色碳 (BrC) 的贡献. 各非 EC 组分相对 EC 的比值与  $E_{\text{MAC}}$  均有一定相关性, 其中 OC/EC 与  $E_{\text{MAC}}$  相关性最高, 说明有机物的积累是导致黑碳光吸收增强的主要原因.  $\text{K}^+/\text{EC}$  与  $E_{\text{MAC}}$  的高相关性表明生物质燃烧过程对光吸收增强也有一定影响.

**关键词:** 气溶胶; 光学特性; 黑碳; 覆盖物; 光吸收增强

中图分类号: X122; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3057-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711221

## Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing

HUANG Cong-cong<sup>1,2</sup>, MA Yan<sup>1,2\*</sup>, ZHENG Jun<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** A three-wavelength photoacoustic soot spectrometer (PASS-3) was employed for real-time online measurement of aerosol optical properties and light absorption enhancement of EC together with chemical composition analysis in the northern suburb of Nanjing during January 1-19, 2016. The average aerosol absorption coefficient, scattering coefficient, and single scattering albedo at 532 nm during the observation period were  $(64.19 \pm 35.28) \text{ Mm}^{-1}$ ,  $(454.68 \pm 238.71) \text{ Mm}^{-1}$ , and  $0.87 \pm 0.03$ , respectively, and showed clear diurnal variation, mainly affected by planetary boundary layer height and  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration. The mass absorption cross section (MAC) showed an increasing trend during the observation period, consistent with the trend of variation in ratios between non-EC and EC components, resulting from the difference in relative percentage of secondary materials and coating thickness under different pollution conditions. The estimated light absorption enhancement, denoted  $E_{\text{MAC}}$ , was calculated based on the change in MAC. The campaign-averaged  $E_{\text{MAC}}$  at 405, 532, and 781 nm were  $1.53 \pm 0.56$ ,  $1.34 \pm 0.47$ , and  $1.14 \pm 0.40$ , respectively, showing a decrease with increasing wavelength, suggesting the contribution of brown carbon (BrC). All non-EC components showed linear correlation with  $E_{\text{MAC}}$ , with the most significant correlation between OC/EC and  $E_{\text{MAC}}$ , indicating that an increase in organics was likely the main contributor to light absorption enhancement in our study. In addition, the high correlation of  $\text{K}^+/\text{EC}$  and  $E_{\text{MAC}}$  revealed the contribution of biomass burning.

**Key words:** aerosol; optical properties; element carbon; coating materials; light absorption enhancement

气溶胶对气候变化、人类健康及大气能见度有重要影响. 气溶胶是气候变化预测中最大的不确定性因子<sup>[1]</sup>, 一方面原因是气溶胶时空分布不均匀, 另一方面是由于辐射强迫与气溶胶理化性质间复杂的相互作用. 作为影响地气系统辐射收支平衡的重要参数, 明确气溶胶的光学性质对评估气溶胶的气候效应和辐射强迫有重要意义.

国内关于光学特性的地面观测研究已有很多, 主要集中在华北平原<sup>[2-4]</sup>、长三角地区<sup>[5, 6]</sup>和珠三角地区<sup>[7, 8]</sup>. 气溶胶的光学特性与其粒径分布、化

学组成密切相关<sup>[9]</sup>. 许多学者应用 IMPROVE 公式分析不同化学组分对散射、消光的贡献, 发现硫酸铵、有机物及硝酸铵是国内城市中最主要的消光物质, 对能见度的衰减起主要作用<sup>[10-13]</sup>. 然而, 目前关于化学组分对光吸收影响的报道还相对较少.

收稿日期: 2017-11-24; 修订日期: 2018-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0202401, 2016YFC0202402); 国家自然科学基金项目 (21377059, 41575122, 41675126)

作者简介: 黄聪聪 (1993 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为气溶胶光学特性, E-mail: hcc212@163.com

\* 通信作者, E-mail: my\_nj@163.com

黑碳是气溶胶中主要的吸收性组分,对气候系统有增温作用<sup>[14]</sup>. 当黑碳气溶胶与其他物质内混时,其表面的覆盖物(coating materials)会产生透镜效应(lensing effect),增加黑碳的质量吸收截面(mass absorption cross section, MAC),从而对光吸收起到增强作用<sup>[15, 16]</sup>. 除透镜效应外,若覆盖物本身具有吸光性,如棕色碳(brown carbon, BrC),也会影响气溶胶的光吸收. 国外学者通过模式计算<sup>[14, 17]</sup>及外场观测<sup>[18~22]</sup>考察了覆盖物对黑碳光吸收的影响. 模式计算的结果表明内混态的黑碳光吸收约为外混态的2倍<sup>[14]</sup>. 外场观测研究多通过加热方法去除黑碳表面覆盖物,直接对比加热前后的光吸收变化,或通过黑碳质量吸收截面的改变估算光吸收增强的大小. 外场观测结果普遍低于模式计算,认为具体光吸收增强的大小可能与覆盖物厚度、颗粒物来源及区域污染条件等相关,不同的研究差异较大. 美国加州地区的光吸收增强平均值为1.06,基本不受气溶胶老化的影响<sup>[23]</sup>. 英国冬季的研究发现吸光增强随着覆盖物厚度的增加而增大<sup>[21]</sup>,平均值为1.4. 日本地区的光吸收增强值平均为1.22,其中的高值主要受长距离传输影响<sup>[22]</sup>.

目前,国内关于光吸收增强的研究还很少,仅在华北地区<sup>[24, 25]</sup>、珠三角<sup>[26]</sup>地区有相关报导,在人口密集,经济发达的长三角地区还未有相关结果的报导. 鉴于黑碳光吸收增强效应的研究仍具有较大不确定性,且受区域污染条件的影响,有必要在长三角地区进行相关研究. 本文通过外场观测,对南京冬季气溶胶的光学性质、化学组成进行了分析,估算了黑碳气溶胶的吸光增强大小,探究了气溶胶中化学组分对光吸收增强的影响,这对正确评估黑碳的辐射强迫及气候影响有重要的参考意义.

## 1 材料与方 法

### 1.1 观测时间及地点

观测时间为2016年1月1~19日,观测点位于南京北郊南京信息工程大学观测场(32.2°N, 118.7°E),在观测点东向约1.5 km处有江北大道快速路,3.5 km处为南京钢铁厂,东北方向约7 km处为扬子石化、12 km处为化工园区,西向主要为农田和居民生活区. 因此,该观测点可以作为受工业、交通、农业及人类生活源共同影响的复合污染区域的代表点.

### 1.2 观测仪器及分析方法

样气经过PM<sub>2.5</sub>切割头进入干燥管,将湿度降至

30%以下,进入三波长光声黑碳光度仪(Three-wavelength photoacoustic soot spectrometer, PASS-3, 美国DMT),在线原位测定干状态下气溶胶在405、532、781 nm下的吸收系数( $\beta_{\text{abs}}$ )和散射系数( $\beta_{\text{sca}}$ ). PASS-3测定吸收系数、散射系数的工作原理及技术细节在Flower等<sup>[27]</sup>的研究中已有详细介绍. PASS-3的采样流量为1 L·min<sup>-1</sup>,时间分辨率为2 s,三波长下的吸收系数和散射系数检测限分别为1.5、2.0、0.15 Mm<sup>-1</sup>和2.0、3.0、1.0 Mm<sup>-1</sup>. 仪器每5 min自动做一次背景校正,去除背景气体的吸收、散射影响. 在观测前后使用激光功率计,硫酸铵,高浓度NO<sub>2</sub>气体对激光能量、散射系数及吸收系数进行标定.

小时分辨率的PM<sub>2.5</sub>质量浓度由PM<sub>2.5</sub>在线监测仪(BAM-1020)观测得到,其检测原理是依据 $\beta$ 射线吸收测试法,检测分辨率为0.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

PM<sub>2.5</sub>膜样品使用100 L·min<sup>-1</sup>的中流量采样器(HY-100 PM<sub>2.5</sub>, 青岛恒远)进行采集. 采样时长为12 h,换膜时间为每日07:00和19:00. 采样前,直径90 mm的石英滤膜需在450°C的马弗炉中焙烧4 h,再置于恒温恒湿箱中平衡24 h后称重保存. 采样后滤膜在同样条件下平衡24 h后进行称重,之后将样品封装,在避光、低温(-4°C)条件下保存. 使用Dionex ICS-3000和ICS-2000离子色谱仪同步分析气溶胶样品中的水溶性离子组分. 利用DRI Model 2001A热/光碳分析仪(OC/EC)对膜样品中的有机碳(OC)、元素碳(EC)进行定量分析. EC与BC虽然测量方法不同,但两者大致对应<sup>[28, 29]</sup>,不少研究直接用EC代替BC作为黑碳质量浓度,对两者不做区分<sup>[24, 25, 27, 30]</sup>,因此,在本研究中用EC代表BC.

小时分辨率的气象数据包括风向、风速、温度、相对湿度及能见度等由南京信息工程大学地面观测站同步测量得到. 应用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)空气资源实验室开发的HYSPLIT后向轨迹模型对气团来源进行分析,选取地面高度500 m作为起始高度,轨迹起始时间为每日07:00和19:00,模拟时长为24 h.

### 1.3 光吸收增强计算

黑碳气溶胶的MAC由气溶胶的光吸收系数与EC质量浓度的比值<sup>[24, 25, 27, 31, 32]</sup>计算得到[见式(1)].

$$\text{MAC}_\lambda = \beta_{\text{abs},\lambda} / [\text{EC}] \quad (1)$$

式中, $\lambda$ 代表波长,EC为黑碳质量浓度,数据时间分辨率为12 h,光吸收数据取同时段的12 h平均值与

之对应. 其他组分与 EC 内混时会覆盖在 EC 表面, 覆盖物的存在会对 EC 的光吸收有增强作用. 本研究中, 利用观测得到的  $MAC_{\lambda}$  与已有研究中新鲜黑碳的  $MAC_{ref}$  值之比来计算光吸收增强的大小, 用  $E_{MAC}$  来表示<sup>[21, 27]</sup>, 计算公式如下[见式(2)].

$$E_{MAC,\lambda} = MAC_{\lambda}/MAC_{ref,\lambda} \quad (2)$$

式中, 三波长下的  $MAC_{ref,\lambda}$  是依据 Bond 等<sup>[28]</sup>报道的 550 nm 下新鲜黑碳 MAC 值  $[(7.5 \pm 1.2) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$  经过波长转换 (AAE = 1) 得到的<sup>[21]</sup>, 取值分别为 10.2、7.8、5.3  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 光学特性概述

图 1 为观测期间气溶胶光学参数 (吸收系数  $\beta_{abs}$ 、散射系数  $\beta_{sca}$ 、单散射反照率 SSA)、气象要素 (风向、风速、降雨量) 及  $PM_{2.5}$  质量浓度的小时变

化情况. 观测期间, 气溶胶在三波长下的  $\beta_{abs}$ 、 $\beta_{sca}$  呈现出相同的变化趋势, 波动范围较大, 在 1 月 5 日晨间达到最低值, 分别为  $16.3 \text{ Mm}^{-1}$ 、 $65.7 \text{ Mm}^{-1}$  (532 nm), 在 1 月 17 日达到最高值, 分别为  $197.9 \text{ Mm}^{-1}$ 、 $1410.8 \text{ Mm}^{-1}$  (532 nm), 约为最低值的 12 倍和 21 倍. 532 nm 下气溶胶  $\beta_{abs}$ 、 $\beta_{sca}$  的平均值分别为  $(64.19 \pm 35.28) \text{ Mm}^{-1}$ 、 $(454.68 \pm 238.71) \text{ Mm}^{-1}$ , 与 2013 年南京北郊冬季的观测结果较为接近<sup>[5]</sup>. 与其他城市相比 (表 1),  $\beta_{abs,532}$  平均值与上海冬季<sup>[6]</sup>、成都冬季<sup>[13]</sup>、北京冬季<sup>[33]</sup> 的结果接近, 低于广州冬季<sup>[7]</sup>、武汉<sup>[34]</sup> 的结果.  $\beta_{sca,532}$  与广州冬季<sup>[7]</sup> 的观测结果较为接近, 高于上海冬季<sup>[6]</sup>、北京冬季<sup>[33]</sup>、武汉<sup>[34]</sup>, 低于成都冬季<sup>[13]</sup>. 此外,  $\beta_{abs,532}$  和  $\beta_{sca,532}$  均远高于香港<sup>[35]</sup> 和国外地区, 如日本<sup>[19]</sup> 的观测结果. 总体上来说, 此次南京冬季的污染程度相对较高.

表 1 不同地区的光学特性观测结果

Table 1 Optical property observations for the different sites

地点	时间	$\beta_{abs}/\text{Mm}^{-1}$	$\beta_{sca}/\text{Mm}^{-1}$	SSA	观测仪器 <sup>1)</sup>
南京 (本研究)	2016-01	$64.19 \pm 35.28$ (532)	$454.68 \pm 238.71$ (532)	$0.87 \pm 0.03$ (532)	PASS-3
南京 <sup>[5]</sup>	2013-01	$61.65 \pm 40.59$ (532)	$511.47 \pm 239.58$ (532)	$0.89 \pm 0.04$ (532)	PASS-3
北京 <sup>[33]</sup>	2009-05 ~ 2010-06	$64 \pm 62$ (525)	$360 \pm 405$ (525)	$0.82 \pm 0.09$ (525)	AE31, Nephelometer (Aurora3000)
成都 <sup>[13]</sup>	2015-01	$60.2 \pm 28.6$ (550)	$724.9 \pm 301.6$ (550)		AE31, Nephelometer (NGN-3A)
上海 <sup>[6]</sup>	2010-12 ~ 2011-03	$65.81 \pm 46.8$ (532)	$292.81 \pm 206.39$ (532)	$0.81 \pm 0.04$ (532)	AE31, Nephelometer (M9003)
广州 <sup>[7]</sup>	2010-01	$79.3 \pm 47.5$ (532)	$469.3 \pm 279.4$ (550)		AE31, Nephelometer (TSI3563)
武汉 <sup>[34]</sup>	2009-12 ~ 2014-03	$119.06$ (520)	$377.54$ (550)	$0.73$ (520)	AE31, Nephelometer (TSI3563)
香港 <sup>[35]</sup>	2012-02 ~ 2015-02	$8.3 \pm 6.1$ (550)	$151 \pm 100$ (550)	$0.93 \pm 0.05$ (550)	AE31, Nephelometer (TSI3563)
日本 Nagoya <sup>[19]</sup>	2011-01	$9.1 \pm 6.7$ (532)	$38.4 \pm 24.8$ (532)	$0.80 \pm 0.06$ (532)	PASS-3

1) AE31: 黑碳仪 (Aethalometer, Magee Scientific, USA); Nephelometer: 浊度仪

图 1 中灰色阴影区域是依据气溶胶消光系数 ( $>500 \text{ Mm}^{-1}$ ) 选取的两次持续性污染时段 p1、p2, 蓝色阴影区域是依据  $PM_{2.5}$  质量浓度 ( $<75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 选取的清洁时段 c1, 各时段具体的气象要素和光学参数的详细信息在表 2 列出. 从图 1 中可以看出,  $\beta_{abs}$  和  $\beta_{sca}$  与  $PM_{2.5}$  浓度具有一致的变化趋势, 相关性分析表明吸收、散射系数与  $PM_{2.5}$  浓度呈显著线性正相关, 相关系数分别为 0.97、0.79, 这表明颗粒物浓度对气溶胶的光学特性, 尤其是散射系数起重要作用. 此外, 气象要素与气溶胶光吸收、散射也有一定相关性. 污染阶段 p1、p2 均受内陆气团影响 (图 2), 风速明显偏低, 不利于污染物的扩散, 易造成颗粒物在局地累积, 加重污染程度, 使得气溶胶的光吸收、散射系数出现连续的高值. 而在清洁时段 c1 中, 风向稳定, 气团主要来自东向海洋, 风速相对偏高, 有利于污染物的扩散稀释, 同时伴随

着降雨的清除作用,  $PM_{2.5}$  浓度明显下降, 吸收、散射系数也在 1 月 5 日晨间达到最低.

SSA 是衡量气溶胶辐射强迫的重要参数. 本次观测中的 SSA 平均值为  $0.87 \pm 0.03$ , 与以往南京地区的研究结果<sup>[5, 36, 37]</sup> ( $0.82 \sim 0.90$ ) 较为一致, 普遍高于其他城市地区的结果, 这表明在此次观测中气溶胶中的散射性物质占主导地位. 不同时期的 SSA 略有不同, 污染时段 p2 中的 SSA 明显高于其他时段, 说明此次污染过程中气溶胶中散射性物质的占比较高, 相反在 p1 时段的吸收性物质贡献相对较高.

埃系数 (Ångström exponent) 可以反映气溶胶光吸收系数、散射系数的波长依赖性. 吸收埃系数 (AAE) 在一定程度上可以反映碳质气溶胶的来源<sup>[38~41]</sup>. 有研究表明<sup>[28]</sup>, 当 AAE 值接近于 1 时的主要吸收物质为新鲜排放的黑碳, 而当 AAE 大于

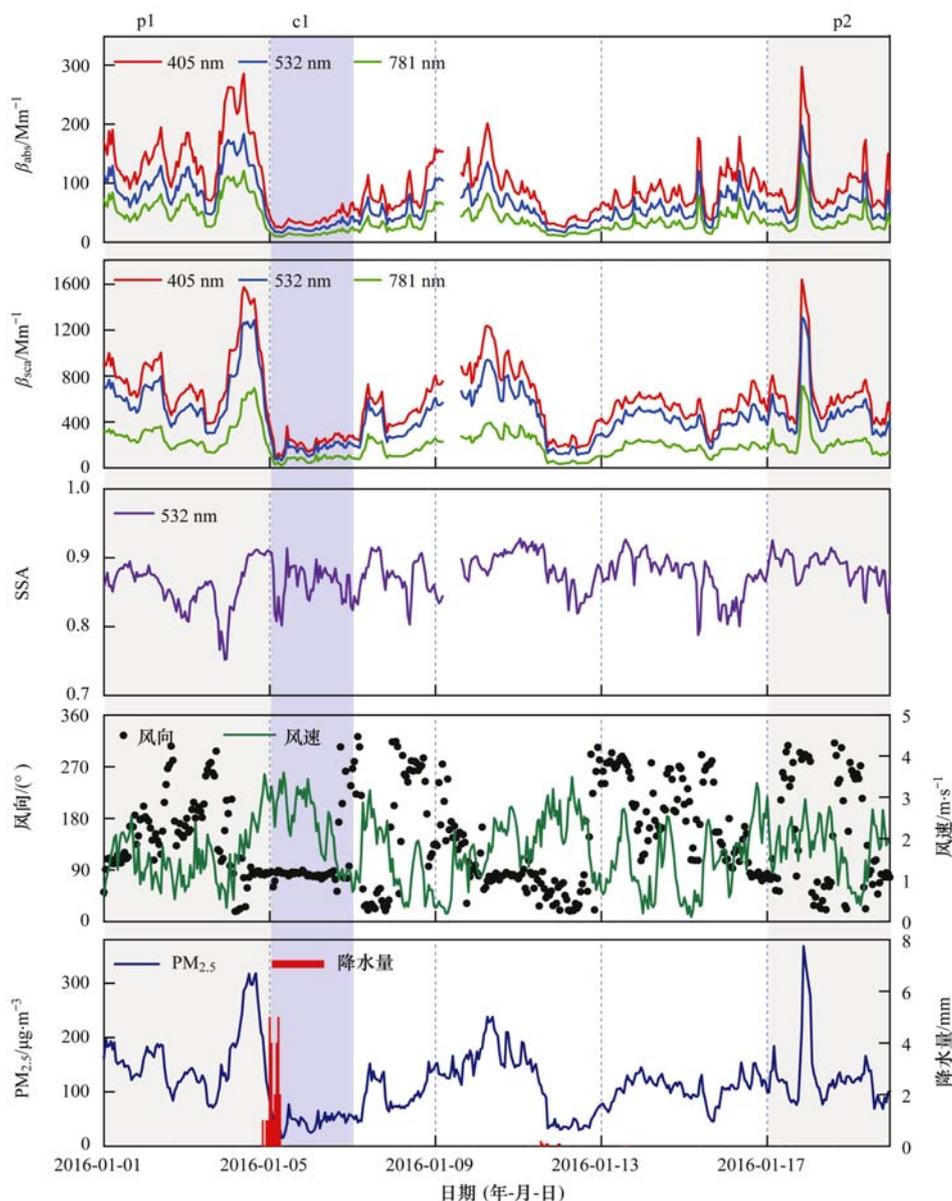


图 1 观测期间气溶胶光学特性、气象要素及  $PM_{2.5}$  质量浓度的时间序列

Fig. 1 Time series of optical properties, meteorological parameters and  $PM_{2.5}$  mass concentration during the observation period

表 2 不同时段及总体平均的  $PM_{2.5}$  浓度、气象要素、光学性质参数汇总

Table 2 Summary of averaged  $PM_{2.5}$  mass concentration, meteorological parameters, and optical properties for select episodes and for the entire observation period

项目	污染时段 p1 (01-01 ~ 01-04)	污染时段 p2 (01-17 ~ 01-19)	清洁时段 c1 (01-05 ~ 01-06)	总体平均
$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	160.18	128.53	46.00	116.72
风速/ $m \cdot s^{-1}$	1.52	1.80	2.37	1.69
$\beta_{abs,405}/Mm^{-1}$	150.24	96.84	37.74	95.79
$\beta_{abs,532}/Mm^{-1}$	101.81	64.21	24.86	64.19
$\beta_{abs,781}/Mm^{-1}$	63.07	37.75	14.43	38.28
$\beta_{sca,405}/Mm^{-1}$	808.62	632.96	220.50	586.51
$\beta_{sca,532}/Mm^{-1}$	643.19	498.64	166.70	454.68
$\beta_{sca,781}/Mm^{-1}$	299.32	226.42	77.12	201.80
$\beta_{ext,532}/Mm^{-1}$	745.00	562.85	191.56	518.87
$SSA_{532}$	0.86	0.89	0.87	0.87
AAE405/781	1.34	1.47	1.46	1.43
SAE405/781	1.55	1.63	1.64	1.70

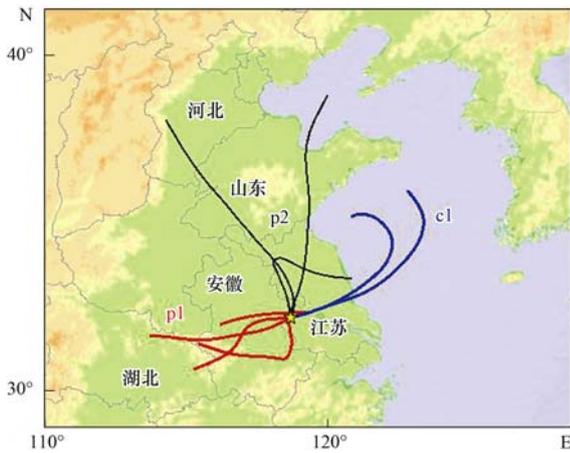


图2 不同时段 24 h 后向轨迹图  
Fig. 2 The 24 h backward-trajectory of air mass during select episodes

1.6 时表明存在具有较强波长依赖性的物质, 如 BrC, 可能受到生物质燃烧的影响. 在本次观测中, AAE 值在 1.17 ~ 1.74 间波动, 平均值为  $1.43 \pm 0.09$ , 说明南京北郊冬季主要受交通源影响, 生物质燃烧可能也有重要贡献. 其中, 污染时段 p1 的 AAE 值相对偏低 (1.34), 可能受交通源的影响更大, 而污染时段 p2 和清洁时段 c1 较高的 AAE 表明其可能受到生物质燃烧的影响. 散射埃系数 (SAE) 主要反映气溶胶粒子尺度的大小, 通常 SAE 越大, 表明粒子尺度越小. 当 SAE 大于 2 时, 表明气溶胶中细

粒子 ( $< 500\text{nm}$ ) 占主导地位, 当 SAE 小于 1 时, 代表气溶胶中沙尘、海盐等粗粒子的占比较高<sup>[42, 43]</sup>, 观测期间 SAE 在 1.1 ~ 2.5 范围内波动, 平均值为  $1.70 \pm 0.26$ , 说明细粒子在此次观测中占主导地位.

## 2.2 日变化

图 3 展示了 532 nm 下气溶胶光学特性、 $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度及边界层高度 (planetary boundary layer height, PBL) 的日变化情况, 其中 PBL 的数据来源于 <http://ready.arl.noaa.gov/READYamet.php>. 从中可以看出,  $\beta_{\text{abs}}$  在早上 08:00 ~ 09:00 达到峰值, 随后下降, 至 14:00 降到最低值, 之后上升, 在夜间保持相对平稳. 这种早晚高, 白天低的变化趋势主要受到一次排放和边界层高度的影响, 在早晚高峰时段, 交通源排放增加, 排放的黑碳物质对吸收系数有明显贡献, 同时边界层高度较低, 污染物易于积聚, 而午后, 边界层高度最高, 垂直对流作用增强, 污染物被稀释扩散.  $\beta_{\text{scat}}$  与  $\beta_{\text{abs}}$  具有相同的日变化规律, 同样在早上 08:00 ~ 09:00 时达到峰值, 在 14:00 降到最低值. 不同的是,  $\beta_{\text{scat}}$  日变化幅度相对较小, 日平均最高值与最低值之比仅为 1.3, 低于吸收系数的变化 (1.7), 出现这种现象的原因一方面是由于一次排放对气溶胶吸收作用影响高于散射, 另一方面, 午后光化学反应生成的硫酸盐、硝酸盐等二次物质使得气溶胶散射系数增加, 可能抵消了部分由于稀释扩

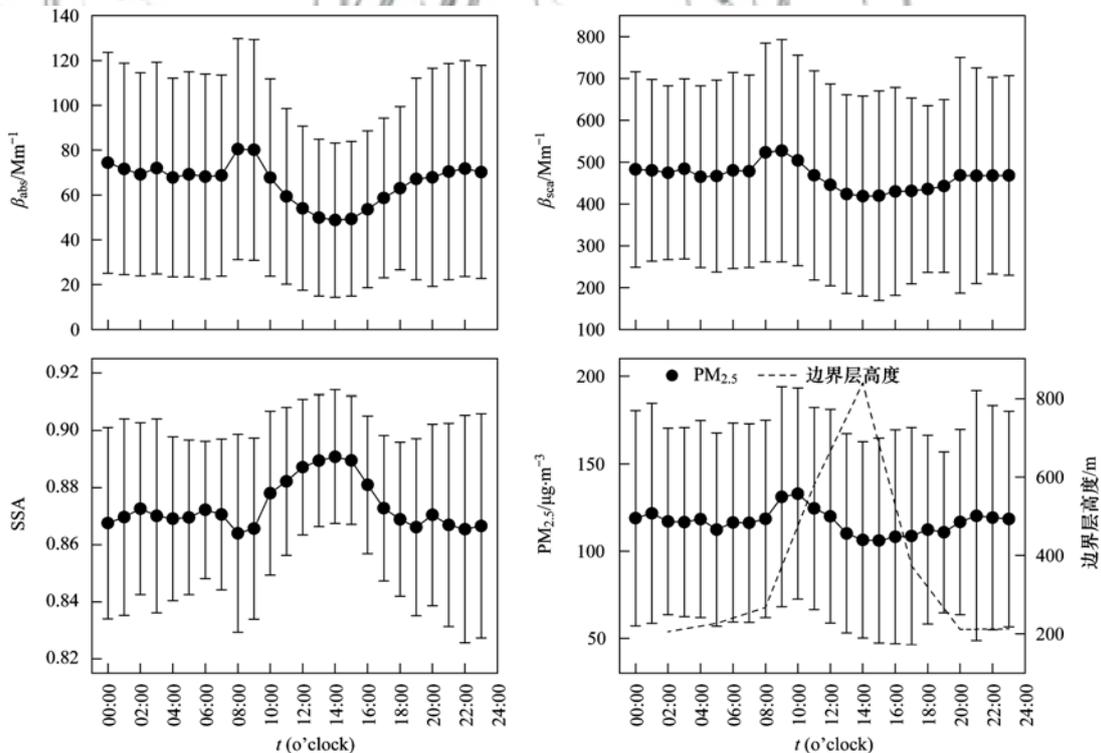


图3 气溶胶光学特性 (532 nm)、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度及边界层高度 (PBL) 的日变化情况

Fig. 3 Diurnal variation of  $\beta_{\text{abs}}$ ,  $\beta_{\text{scat}}$ , SSA,  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration, and PBL

散作用造成的散射系数降低. SSA 呈现出相反的日变化特征,早晚低,白天高,在午后 14:00 达到最高值,这与其他研究<sup>[2, 5]</sup>中 SSA 的日变化规律一致. 低 SSA 可能是由于早晚时段机动车排放及烹饪活动造成的,而午后高 SSA 的出现可能是大气光化学反应生成的二次物质增强了气溶胶的散射作用.

### 2.3 黑碳气溶胶的光吸收增强

黑碳是气溶胶中最主要的吸收性组分,主要来源于化石燃料和生物质的不完全燃烧<sup>[44]</sup>. 观测期间,EC 平均浓度为 $(7.34 \pm 4.55) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,在  $\text{PM}_{2.5}$  中占比为 5.3%,与 Li 等<sup>[45]</sup>在南京冬季的研究结果较为一致. 本次观测中 EC 与 OC 具有明显的线性关系,相关系数为 0.73,说明这两者具有相似来源. 通过其他组分与碳质气溶胶的相关性分析发现, $\text{K}^+$  与 EC、OC 均具有较高的相关性,相关系数分别为 0.82、0.69,由于  $\text{K}^+$  是生物质燃烧的标识物<sup>[45]</sup>,表明本次观测中碳质气溶胶有部分来源于生物质燃烧的贡献. 这与 AAE 的分析结果一致,表明了生物质燃烧对本次观测有不可忽视的影响. OC/EC 还可以用于估算二次有机碳 (SOC) 的含量,通常认为 OC/EC 大于 2 时,有 SOC 生成<sup>[46]</sup>. 观测期间 OC/EC 的平均值为 2.75,表明碳质气溶胶有部分来自二次源的贡献. 其中,污染时段 p1 的 OC/EC 普遍低于 2,表明该时段主要受一次排放影响较大,而在

p2 时段, OC/EC 平均值较高(3.45),最高达 5.54,说明受二次源影响较大, SOC 占比较高.

MAC 是评估黑碳气溶胶辐射强迫的重要参数. 目前关于 MAC 的研究仍具有较大不确定性<sup>[27]</sup>,不同研究结果存在一定差异,主要受吸收系数及黑碳质量浓度测量方法的不确定性影响. Bond 等<sup>[28]</sup>总结了不同研究中的 MAC 值,范围在  $4 \sim 15 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (550 nm)之间. 图 4 展示了观测期间 MAC 的变化情况,可以看出,三波长下的 MAC 变化趋势一致,在前期相对平稳,后期波动较大,呈明显上升的趋势. 三波长下的 MAC 平均值分别为 $(15.65 \pm 5.66)$ 、 $(10.42 \pm 3.70)$ 、 $(6.04 \pm 2.14) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,与污染程度较高的济南冬季<sup>[25]</sup> [ $(9.0 \pm 2.3) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 678 nm] 相接近,高于受新鲜排放影响的深圳地区<sup>[26]</sup> [ $(6.5 \pm 0.5) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , 532 nm]. 气溶胶中主要的化学组分(OC、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$ )及  $\text{PM}_{2.5}$  中非 EC 物质 ( $\text{NR-PM} = [\text{OC}] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NH}_4^+] + [\text{NO}_3^-] + [\text{K}^+] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{Cl}^-]$ ) 与 EC 的比值在一定程度上可以反映黑碳表面覆盖物的组成及相对厚度情况<sup>[24]</sup>,其变化趋势如图 4 所示,总体上呈现前期低,后期高的特征,与 MAC 的变化情况较为一致. 这种一致性表明了黑碳光吸收截面的增加可能与黑碳表面覆盖物增多有关<sup>[25]</sup>.

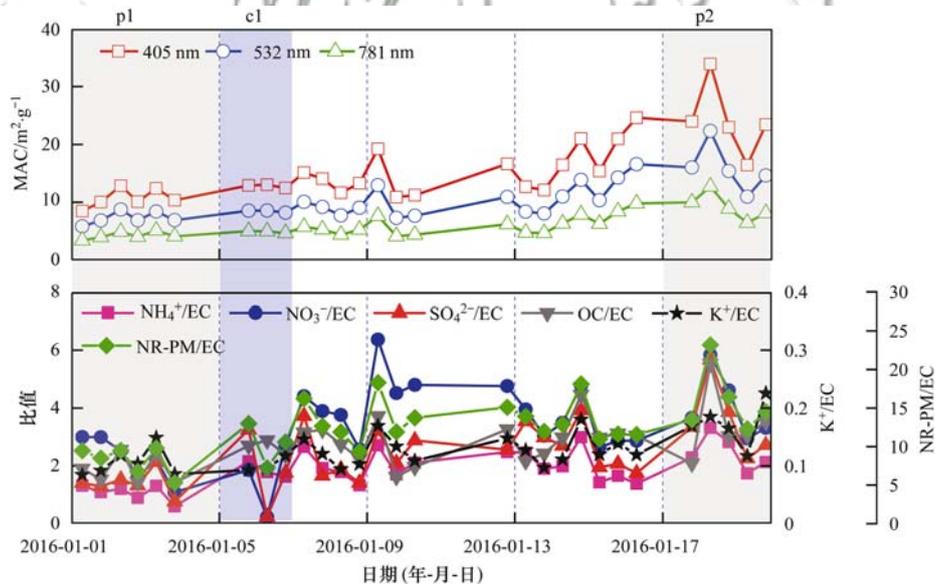


图 4 三波长下黑碳的光吸收截面 (MAC) 及化学组分与 EC 比值的时间序列

Fig. 4 Time series of MAC at 405, 532, and 781 nm and the ratios of OC/EC,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{EC}$ ,  $\text{NH}_4^+/\text{EC}$ ,  $\text{NO}_3^-/\text{EC}$ ,  $\text{K}^+/\text{EC}$ , and NR-PM/EC

表 3 汇总了不同时段 MAC、NR-PM 与 EC 的质量浓度及非 EC 组分相对 EC 比值的情况. 其中,污染较重的 p1 阶段中颗粒物的质量浓度最高,但

MAC 值却明显偏低( $7.25 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ),低于总体平均 ( $10.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) 及清洁时段 ( $8.42 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ),各组分与 EC 的比值中,除  $\text{NO}_3^-/\text{EC}$  外,均低于其他时

段. 污染阶段 p2 的情况与之相反, 其 NR-PM 与 EC 的质量浓度仅为 p1 阶段的 60%、30%, 但 MAC 值最高 ( $15.86 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ), 约为 p1 阶段的 2 倍、总体平均的 1.5 倍, 各组分与 EC 的比值均高于其他时段. 清洁时段 c1 中, 化学组分的质量浓度最低, 约为 p1 阶段的 33%, 但 MAC 及各组分与 EC 的比值均略高于 p1 阶段. 据此可以发现 MAC 值的变化与组分的绝对浓度相关性不大, 而是同各组分与 EC 的相对比值相关性更高. 不同阶段各组分与 EC 比值的不同可能反映出污染过程的差异. p1 阶段中颗粒物的质量浓度高, 但各组分相对 EC 比值低的情况表明此次污染过程可能受

新鲜排放的影响较大, 较多的黑碳气溶胶还未充分老化, 可能为外混或部分内混的状态, 覆盖物厚度相对较薄. p2 阶段中  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、OC 与 EC 比值较高, 表明气溶胶的老化程度较高, 二次物质占比较大, 覆盖物厚度偏大. 24 h 后向轨迹分析结果(图 2)表明 p2 阶段的气团主要来源于偏北方向的长距离传输, 沿途已经老化的气溶胶或新鲜排放的污染物可能在传输过程中发生反应, 到达本地时已经基本老化<sup>[47]</sup>. 综上表明, 黑碳气溶胶 MAC 的变化受污染条件的影响, 不同污染过程中二次物质的相对比例及覆盖物厚度是影响 MAC 的主要因素.

表 3 不同阶段及总体平均的三波长下 MAC 值、NR-PM、EC 的质量浓度及各组分与 EC 的比值汇总

Table 3 Summary of averaged MAC at 405, 532, and 781 nm and mass concentration of NR-PM, EC and the ratio of  $\text{K}^+/\text{EC}$ ,  $\text{NH}_4^+/\text{EC}$ ,  $\text{NO}_3^-/\text{EC}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{EC}$ ,  $\text{OC}/\text{EC}$  and  $\text{NR-PM}/\text{EC}$  for select episodes and for the entire study period

项目	MAC,405 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	MAC,532 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	MAC,781 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	NR-PM / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	EC / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{K}^+/\text{EC}$	$\text{NH}_4^+/\text{EC}$	$\text{NO}_3^-/\text{EC}$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{EC}$	OC/EC	NR-PM/EC
p1	10.69	7.25	4.24	105.36	13.67	0.11	1.07	2.24	1.41	1.88	8.22
p2	24.13	15.86	9.22	66.44	4.47	0.17	2.46	4.07	3.57	3.45	15.98
c1	12.79	8.42	4.85	36.05	3.59	0.10	1.85	1.59	1.75	2.66	10.26
总体平均	15.80	10.52	6.11	77.94	7.34	0.13	1.89	3.35	2.41	2.75	12.42

本研究中, 三波长下的  $E_{\text{MAC}}$  是由观测得到的 MAC 与已有研究中新鲜排放的黑碳 MAC 之比计算得到的, 因此,  $E_{\text{MAC}}$  与 MAC 具有同样的变化趋势, 均在观测前期变化平缓, 后期上升. 值得注意的是, 已有报道的新鲜黑碳 MAC 值存在一定的不确定性, 这会增加  $E_{\text{MAC}}$  计算值的不确定性, 但  $E_{\text{MAC}}$  的相对大小与趋势变化仍具有较大的参考意义, Liu 等<sup>[21]</sup> 和 Flower 等<sup>[27]</sup> 均采用此方法对  $E_{\text{MAC}}$  的大小进行估算. 观测中 405、532、781 nm 下的  $E_{\text{MAC}}$  的平均值为  $1.53 \pm 0.56$ 、 $1.34 \pm 0.47$ 、 $1.14 \pm 0.40$ , 随着波长增加而降低, 相对高的  $E_{\text{MAC},405}$  表明可能存在 BrC 的贡献<sup>[21]</sup>. 由于 BrC 仅在短波段具有强吸收, 在长波段吸收较弱, 假定 781 nm 下的吸收不受 BrC 的影响, 则其光吸收仅由 EC 和覆盖物的透镜效应贡献得到, 依据波长指数为 1, 可分别计算得到 405 nm 和 532 nm 下 EC 与覆盖物的光吸收贡献率, 进而可以得到 BrC 的吸收贡献率. 经计算, 在 405 nm 和 532 nm 下 BrC 的光吸收贡献率分别为 25% 和 15%.

为进一步了解各组分与吸光增强的关系, 对  $E_{\text{MAC},532}$  与各组分相对 EC 比值的相关性进行分析, 结果如图 5 所示, 相关性从高到低依次为 OC/EC、 $\text{K}^+/\text{EC}$ 、NR-PM/EC、 $\text{SO}_4^{2-}/\text{EC}$ 、 $\text{NH}_4^+/\text{EC}$ 、 $\text{NO}_3^-/\text{EC}$

EC. 其中, NR-PM/EC 与  $E_{\text{MAC}}$  明显正相关, 说明覆盖物的增加对  $E_{\text{MAC}}$  有增强作用. 这与其他研究<sup>[21, 24, 48]</sup> 发现的规律相一致,  $E_{\text{MAC}}$  通常随着覆盖物厚度的增加而增大. 覆盖物厚度的增加往往是气溶胶老化或污染来源改变造成的<sup>[21]</sup>. 这间接表明了老化过程对  $E_{\text{MAC}}$  的贡献. 在各组分中, OC/EC 与  $E_{\text{MAC}}$  相关性最高, 相关系数达 0.61 (405 nm)、0.59 (532 nm)、0.54 (781 nm), 随着 OC/EC 增加 (约等于 6),  $E_{\text{MAC},532}$  最高达约等于 3. 这种高相关性反映出有机物的积累, 尤其是 SOC 的生成, 对光吸收增强有主要贡献. Cheng 等<sup>[31]</sup> 在北京的观测结果也发现黑碳的 MAC 与 OC/EC 具有明显相关性, 认为有机物, 尤其是二次有机物的增加可能对光吸收有增强作用. 而山东禹城<sup>[24]</sup> 和济南<sup>[24]</sup> 地区的研究发现  $\text{SO}_4^{2-}/\text{EC}$  与  $E_{\text{MAC}}$  的相关性最高, 认为光化学反应产生的硫酸盐是影响  $E_{\text{MAC}}$  的主要因素. 不同研究的差异可能与区域污染条件有关, 本研究中的 OC 与 EC 具有相似来源, 更易发生内混, 包覆在黑碳表面, 起到透镜作用, 从而对光吸收有明显的增强作用. 蒋磊等<sup>[49]</sup> 发现南京地区有机物与黑碳气溶胶内混的比例最高, 是黑碳表面覆盖物中的主要组分. 同时  $E_{\text{MAC}}$  与  $\text{K}^+/\text{EC}$  的高相关性 (0.54, 532 nm) 表明了本次观测中生物质燃烧对光吸收增强也有一定影响.

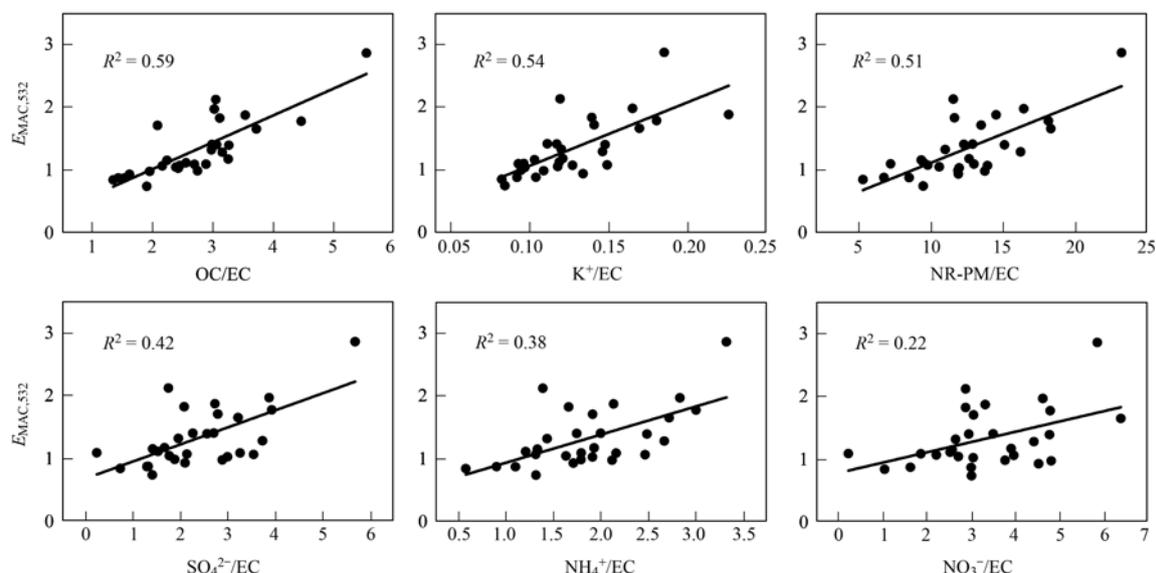


图5  $E_{MAC,532}$ 与  $OC/EC$ 、 $K^+/EC$ 、 $NR-PM/EC$ 、 $SO_4^{2-}/EC$ 、 $NH_4^+/EC$ 、 $NO_3^-/EC$  的相关性

Fig. 5 Correlation of  $E_{MAC,532}$  with  $OC/EC$ ,  $K^+/EC$ ,  $NR-PM/EC$ ,  $SO_4^{2-}/EC$ ,  $NH_4^+/EC$ , and  $NO_3^-/EC$

### 3 结论

(1) 2016年1月南京北郊地区气溶胶在532 nm下的光吸收系数、散射系数、单散射反照率的平均值为  $(64.19 \pm 35.28) Mm^{-1}$ 、 $(454.68 \pm 238.71) Mm^{-1}$ 、 $0.87 \pm 0.03$ 。污染阶段吸收、散射系数连续高值的出现与不利的扩散条件有关。光学参数具有明显的日变化特征,主要受到边界层高度及颗粒物浓度的影响。

(2) 黑碳的光吸收截面在观测期间的变化趋势为前期低,后期高,同各组分与EC的相对比值变化趋势一致,受不同污染条件下二次物质的占比及覆盖物厚度变化的影响。

(3) 405、532、781 nm下的  $E_{MAC}$  平均值为  $1.53 \pm 0.56$ 、 $1.34 \pm 0.47$ 、 $1.14 \pm 0.40$ ,随着波长增加而降低,说明存在BrC的贡献。通过相关性分析发现各组分与EC的比值均与  $E_{MAC}$  有一定相关性,其中  $OC/EC$  与  $E_{MAC}$  相关性最高,说明有机物的积累对光吸收增强有主要贡献, $K^+/EC$  与  $E_{MAC}$  的高相关性表明了生物质燃烧过程对光吸收增强也有一定影响。

#### 参考文献:

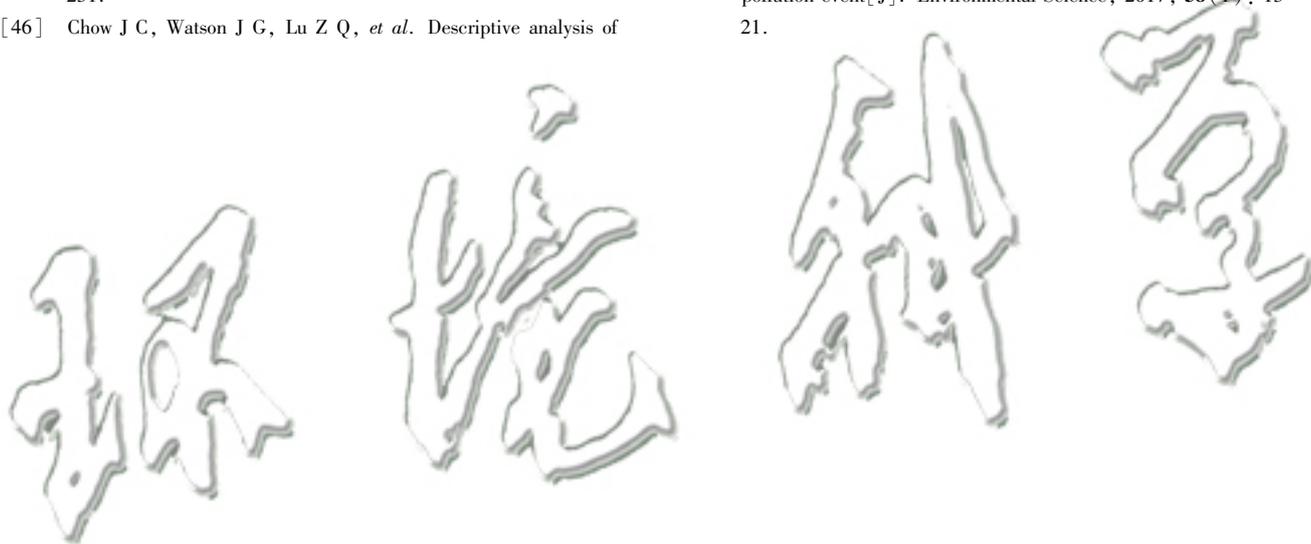
[1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change [M]. Climate change 2007: mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2014. 533-535.  
[2] Han T T, Xu W Q, Li J, *et al.* Aerosol optical properties

measurements by a CAPS single scattering albedo monitor: comparisons between summer and winter in Beijing, China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, **122**(4): 2513-2526.

- [3] Wang Y H, Liu Z R, Zhang J K, *et al.* Aerosol physicochemical properties and implications for visibility during an intense haze episode during winter in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(6): 3205-3215.  
[4] Han T T, Xu W Q, Chen C, *et al.* Chemical apportionment of aerosol optical properties during the Asia-Pacific Economic Cooperation summit in Beijing, China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(23): 12281-12295.  
[5] 王利朋, 马嫣, 郑军, 等. 2013年1月南京北郊霾天气溶胶的光学特性 [J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 816-824.  
Wang L P, Ma Y, Zheng J, *et al.* Aerosol optical properties in the northern suburb of Nanjing during haze days in January 2013 [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 816-824.  
[6] Xu J W, Tao J, Zhang R J, *et al.* Measurements of surface aerosol optical properties in winter of Shanghai [J]. Atmospheric Research, 2012, **109-110**: 25-35.  
[7] Tao J, Cao J J, Zhang R J, *et al.* Reconstructed light extinction coefficients using chemical compositions of  $PM_{2.5}$  in winter in urban Guangzhou, China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, **29**(2): 359-368.  
[8] Tan H B, Liu L, Fan S J, *et al.* Aerosol optical properties and mixing state of black carbon in the Pearl River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2016, **131**: 196-208.  
[9] Ma N, Zhao C S, Nowak A, *et al.* Aerosol optical properties in the North China Plain during HaChi campaign; an *in-situ* optical closure study [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(12): 5959-5973.  
[10] Tao J, Zhang L M, Ho K, *et al.* Impact of  $PM_{2.5}$  chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou-the largest megacity in South China [J]. Atmospheric Research, 2014, **135**-

- 136: 48-58.
- [11] Tao J, Zhang L M, Gao J, *et al.* Aerosol chemical composition and light scattering during a winter season in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **110**: 36-44.
- [12] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* Characterization and source apportionment of aerosol light extinction in Chengdu, southwest China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **95**: 552-562.
- [13] Wang H B, Shi G M, Tian M, *et al.* Aerosol optical properties and chemical composition apportionment in Sichuan Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **577**: 245-257.
- [14] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. *Nature*, 2001, **409** (6821): 695-697.
- [15] Fuller K A, Malm W C, Kreidenweis S M. Effects of mixing on extinction by carbonaceous particles[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D13): 15941-15954.
- [16] Shamjad P M, Tripathi S N, Aggarwal S G, *et al.* Comparison of experimental and modeled absorption enhancement by black carbon (BC) cored polydisperse aerosols under hygroscopic conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (15): 8082-8089.
- [17] Schnaiter M, Linke C, Möhler O, *et al.* Absorption amplification of black carbon internally mixed with secondary organic aerosol [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110** (D19): D19204.
- [18] Zhang R Y, Khalizov A F, Pagels J, *et al.* Variability in morphology, hygroscopicity, and optical properties of soot aerosols during atmospheric processing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(30): 10291-10296.
- [19] Nakayama T, Ikeda Y, Sawada Y, *et al.* Properties of light-absorbing aerosols in the Nagoya urban area, Japan, in August 2011 and January 2012: contributions of brown carbon and lensing effect [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(22): 12721-12739.
- [20] Healy R M, Wang J M, Jeong C H, *et al.* Light-absorbing properties of ambient black carbon and brown carbon from fossil fuel and biomass burning sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(13): 6619-6633.
- [21] Liu S, Aiken A C, Gorkowski K, *et al.* Enhanced light absorption by mixed source black and brown carbon particles in UK winter[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 8435.
- [22] Ueda S, Nakayama T, Taketani F, *et al.* Light absorption and morphological properties of soot-containing aerosols observed at an East Asian outflow site, Noto Peninsula, Japan[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(4): 2525-2541.
- [23] Cappa C D, Onasch T B, Massoli P, *et al.* Radiative absorption enhancements due to the mixing state of atmospheric black carbon [J]. *Science*, 2012, **337**(6098): 1078-1081.
- [24] Cui X J, Wang X F, Yang L X, *et al.* Radiative absorption enhancement from coatings on black carbon aerosols[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 51-56.
- [25] Chen B, Bai Z, Cui X J, *et al.* Light absorption enhancement of black carbon from urban haze in northern China winter [J]. *Environment Pollution*, 2017, **221**: 418-426.
- [26] Lan Z J, Huang X F, Yu K Y, *et al.* Light absorption of black carbon aerosol and its enhancement by mixing state in an urban atmosphere in South China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **69**: 118-123.
- [27] Flowers B A, Dubey M K, Mazzoleni C, *et al.* Optical-chemical-microphysical relationships and closure studies for mixed carbonaceous aerosols observed at Jeju Island; 3-laser photoacoustic spectrometer, particle sizing, and filter analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (21): 10387-10398.
- [28] Bond T C, Bergstrom R W. Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006, **40**(1): 27-67.
- [29] Andreae M O, Gelencsér A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(10): 3131-3148.
- [30] Knox A, Evans G J, Brook J R, *et al.* Mass absorption cross-section of ambient black carbon aerosol in relation to chemical age [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2009, **43**(6): 522-532.
- [31] Cheng Y, He K B, Zheng M, *et al.* Mass absorption efficiency of elemental carbon and water-soluble organic carbon in Beijing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(22): 11497-11510.
- [32] Babich P, Davey M, Allen G, *et al.* Method comparisons for particulate nitrate, elemental carbon, and PM<sub>2.5</sub> mass in seven U. S. cities [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(7): 1095-1105.
- [33] Jing J S, Wu Y F, Tao J, *et al.* Observation and analysis of near-surface atmospheric aerosol optical properties in urban Beijing[J]. *Particuology*, 2015, **18**: 144-154.
- [34] Gong W, Zhang M, Han G, *et al.* An investigation of aerosol scattering and absorption properties in Wuhan, Central China [J]. *Atmosphere*, 2015, **6**(4): 503-520.
- [35] Wang J P, Virkkula A, Gao Y, *et al.* Observations of aerosol optical properties at a coastal site in Hong Kong, South China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(4): 2653-2671.
- [36] Yu X N, Ma J, Raghavendra Kumar K, *et al.* Measurement and analysis of surface aerosol optical properties over urban Nanjing in the Chinese Yangtze River Delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 277-291.
- [37] Ma Y, Li S Z, Zheng J, *et al.* Size-resolved measurements of mixing state and cloud-nucleating ability of aerosols in Nanjing, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(17): 9430-9450.
- [38] Costabile F, Barnaba F, Angelini F, *et al.* Identification of key aerosol populations through their size and composition resolved spectral scattering and absorption [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(5): 2455-2470.
- [39] Gyawali M, Arnott W P, Lewis K, *et al.* *In situ* aerosol optics in Reno, NV, USA during and after the summer 2008 California wildfires and the influence of absorbing and non-absorbing organic coatings on spectral light absorption [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(20): 8007-8015.
- [40] Lack D A, Cappa C D. Impact of brown and clear carbon on light absorption enhancement, single scatter albedo and absorption wavelength dependence of black carbon [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4207-4220.
- [41] Tian P, Wang G F, Zhang R J, *et al.* Impacts of aerosol

- chemical compositions on optical properties in urban Beijing, China[J]. *Particology*, 2015, **18**: 155-164.
- [42] Schladitz A, Müller T, Kaaden N, *et al.* In situ measurements of optical properties at Tinfou (Morocco) during the Saharan mineral dust experiment SAMUM 2006 [J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2009, **61**(1): 64-78.
- [43] Yang M, Howell S G, Zhuang J, *et al.* Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China—interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(3): 2035-2050.
- [44] Zhang Y L, Schnelle-Kreis J, Abbaszade G, *et al.* Source apportionment of elemental carbon in Beijing, China: insights from radiocarbon and organic marker measurements [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(14): 8408-8415.
- [45] Li B, Zhang J, Zhao Y, *et al.* Seasonal variation of urban carbonaceous aerosols in a typical city Nanjing in Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 223-231.
- [46] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [47] 范美益, 曹芳, 张园园, 等. 徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4478-4485.
- Fan M Y, Cao F, Zhang Y Y, *et al.* Characteristics and sources of water soluble inorganic ions in fine particulate matter during winter in Xuzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4478-4485.
- [48] Peng J F, Hu M, Guo S, *et al.* Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(16): 4226-4271.
- [49] 蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 等. 南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 13-21.
- Jiang L, Tang L L, Pan L B, *et al.* Size distribution and mixing state of black carbon aerosol in Nanjing during a heavy winter pollution event[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 13-21.



## CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM <sub>2.5</sub> in Typical Regions of China in Recent 20 Years .....	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM <sub>2.5</sub> Particulate in Xi'an City .....	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province .....	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM <sub>2.5</sub> During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing .....	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an .....	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Panjin City .....	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing .....	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer .....	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China .....	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in Hangzhou .....	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources .....	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City .....	..... HU Xu-ru, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production .....	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles .....	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing .....	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China .....	SHI Dong-qí, LU Xin-wei (3126)
pCO <sub>2</sub> in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors .....	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River .....	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems .....	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai .....	..... YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake .....	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface .....	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland .....	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone .....	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate .....	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets .....	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter .....	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing .....	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell .....	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations .....	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor .....	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor .....	..... FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration .....	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion .....	..... SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....	..... ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge .....	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97 .....	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil .....	..... ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site .....	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam .....	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi .....	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City .....	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain .....	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin .....	..... ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin .....	..... AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil .....	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings .....	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland .....	..... HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China .....	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors .....	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces .....	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues .....	QIANG Hong, LI Yu-yu, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application .....	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure .....	..... PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)