

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

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

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094) 《环境科学》征订启事 (4126) 信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

大气棕色碳的研究进展与方向

闫才青, 郑玫*, 张远航

(北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871)

摘要: 有机气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分。近年来, 部分有机气溶胶被证实在紫外-近可见光波段能进行有效光吸收。吸光有机气溶胶(即棕色碳)已成为当前国际大气环境领域的研究热点之一, 其吸光贡献对辐射强迫、区域空气质量、全球气候变化的影响备受关注。中国城市群区域大气复合污染严重, 2013 年 1 月以来, 大尺度区域能见度降低、灰霾现象频繁发生。研究表明, 中国大气棕色碳的负荷高, 其重要贡献源类如生物质与化石燃料燃烧等排放量大, 棕色碳在中国大气细颗粒物总消光中的贡献及其辐射强迫亟需评估。然而, 棕色碳的基础研究还较为薄弱, 特别是对它的组成及来源的认识仍十分有限。本文旨在指出在中国开展大气棕色碳研究的紧迫性和必要性, 并从棕色碳的来源、组成、测量方法、浓度分布、光学特性、辐射强迫贡献等角度介绍目前国际研究进展, 提出现有问题与不足, 以及对未来研究方向的建议, 以促进对棕色碳的认识与了解, 为中国在该领域的研究提供参考和依据。

关键词: 棕色碳; 吸光有机碳; 组成; 来源; 吸收效率; 辐射强迫; 研究方法; 进展

中图分类号: X131.1; X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2014)11-4404-11 **DOI:** 10.13227/j.hjks.2014.11.050

Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon

YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Organic aerosol is one of the most important components of atmospheric aerosols. In recent years, organic aerosol has been found and proved to be light absorbing in UV-Visible region. Light absorbing organic carbon (also named as brown carbon) has been one of the forefronts in the field of atmospheric research. Its light absorption contributions to radiative forcing, regional air quality, and global climate change have drawn much attention. Regional air pollution is complex in China. Frequent visibility decline and severe regional haze episodes occurred since January 2013. Previous studies showed high amount of estimated columnar light-absorbing organic carbon in China, and according to current research findings, major sources of fine particulate matter in China (e. g. biomass burning and fossil fuel combustion) were also recognized as the main sources for brown carbon. Considering the high abundance of brown carbon in atmosphere, there is a great need to reconsider and reevaluate contributions of organic aerosol to light absorption, especially its role in haze formation and radiative forcing. However, up to now, basic researches on light absorbing organic carbon are still limited in China. This study aimed to elucidate the need for basic research on brown carbon, summarize previous studies and research progress from different aspects such as sources, composition, measurement, mass concentration distribution, optical property, radiative forcing of brown carbon, point out the existing problems and deficiencies, and put forward suggestions for future study.

Key words: brown carbon; light absorbing organic carbon; composition; sources; mass absorbing efficiency; radiation forcing; research methodology; progress

近年来, 中国的城市群, 尤其是京津冀、长三角、珠三角等地区灰霾发生频率高, 持续时间长, 成为国际大气环境领域的关注焦点与研究热点。研究表明, 尽管气象条件发挥着重要作用, 但细颗粒物污染是灰霾形成的主因^[1]; 细颗粒物中多种化学组分与人体健康密切相关^[2], 不同组分对太阳辐射的吸收和散射作用更直接导致了能见度的降低, 成为影响辐射强迫、扰动区域气候变化的重要驱动因子。

硫酸盐、硝酸盐、铵盐、有机碳(organic carbon, OC)、元素碳(element carbon, EC)或黑碳(black carbon, BC)是大气气溶胶的重要组成。其中, EC 和 BC 分别是根据热学和光学性质来测量与表征的, 文献中二者经常互换使用。BC 与 OC(以及

少量的碳酸盐)共同构成了大气中极为重要的含碳气溶胶, 是当前国内外大气环境领域的研究热点之一, 主要侧重于其化学组成、粒径分布、光学特性、混合状态、浓度的时空变化、来源, 以及典型污染源的排放特征等方面的研究。近年来, 二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)的形成机制^[3]与来源估算^[4]等成为重要的研究方向。随着气候变化的影响加剧, 气溶胶的光学效应及辐射强迫的评估成为目前大气领域的另一研究热点与重点。

收稿日期: 2014-04-17; 修订日期: 2014-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375125, 21190050)

作者简介: 闫才青(1985~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: ycq0325@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: mzheng@pku.edu.cn

长期以来,研究认为无机盐与 OC 以散射为主^[5,6],而 BC 则被视为大气颗粒物中进行光吸收的主要物种^[7],在辐射模式中被认为是唯一能在可见光波段进行有效光吸收的含碳气溶胶^[8]。直到上世纪末,国外学者研究发现,部分 OC 在紫外-近可见光区域也能进行有效光吸收^[9,10],且光吸收强度随着波长增加而减弱;21 世纪以来,实验室研究与外场观测均证实了这一发现。这种能够在紫外-近可见光波段进行光吸收、且吸光特性具有波长依赖性的有机碳被命名为“棕色碳”(brown carbon, BrC)^[7,8]。目前,棕色碳已成为国际大气环境领域的研究热点之一^[7~16]。

本文通过介绍棕色碳这一前沿性研究的进展,从棕色碳的来源、组成、测量方法、浓度分布、光学特性、辐射强迫等方面加以阐述,以期为我国今后在此领域的研究提供借鉴,并对未来的研究方向提出建议。

1 棕色碳的现有认识

由于 BC 在全球排放量大、吸光能力强,易与其他物质以复杂的内混或外混形式存在,它对辐射强迫、气候变化及人体健康的影响一直是研究的热点。研究表明,BC 在可见光光谱范围内均具有很强的光吸收能力,其光吸收特性不随波长变化或变化不明显^[11]。与 BC 不同,棕色碳是一类能够在蓝色可见光区和近紫外光区(200~550 nm 之间)对太阳辐射产生较强吸收的有机物。这类吸光有机物在紫外波段的光吸收随着波长变短而吸收增强^[7,8,12,13]。传统热光学法区分与测量 OC 与 EC 是建立在假设 OC 不吸光、OC 碳化后形成的热解碳(pyrolytic carbon, PC)光衰减系数与原 EC 相同,EC 与 OC 的分割取决于光反射信号或光透射信号变化的基础之上,有机碳能够吸光这一认识对传统热-光分析方法提出了挑战^[17]。

大气棕色碳的来源复杂,已有研究表明棕色碳可来自于一次不完全燃烧排放^[14,15]、大气二次转化形成的二次有机气溶胶^[7,16],以及新鲜排放或二次转化形成颗粒物的老化^[18]。其中一次源主要包括煤燃烧^[9]、生物质燃烧^[8]和机动车等排放^[19];二次源主要包括高 NO_x 浓度下生成的芳香类二次有机气溶胶^[20,21],生物源或人为源 SOA 与 NH_3 、 NH_4^+ 等含氮物质的反应产物^[16,18,22],以及羰基化合物等在云、雾、水中的液相反应产物^[16,23,24]等。目前棕色碳的来源多是通过部分一次排放源的源样品或二

次反应产物的光谱测量、环境样品光吸收参数与一次源指示物的相关性分析、或与文献参考值比较等方式确定,但仍缺乏从源头上对各种源排放特征的全面了解与掌握。

不同来源棕色碳的吸光特性主要受化学组成或物质结构的影响。一般认为,棕色碳是由大分子物质组成^[25],且大多是含有高度共轭的芳环(如多环芳烃类物质),并与含氧、含氮等极性官能团直接相连的高分子量物质,或是腐殖酸类物质(HULIS)^[26~28]。相比于小分子有机物,多芳环结构及高聚合度使棕色碳在短波段范围的光吸收明显增加^[29];相较于大分子腐殖酸类物质,棕色碳还包括一些小分子有机物^[30]。目前对棕色碳组成的认识还局限于对其物质结构的假设与推测,棕色碳的化学组成仍不十分清楚。仅 Desyaterik 等^[31]利用液相色谱连接紫外可见光谱检测器,与飞行时间质谱、电喷雾电离同步,首次分离并检测了云水样品中 16 种棕色碳组分,表明 300~400 nm 波段吸光的主要物质是硝基酚衍生物和芳香羰基化合物,未来对棕色碳组成的认识尚需从分子水平上提高。

2 研究方法

国际上大气棕色碳的研究方法各异,仍缺乏标准化的统一测量方法。

2.1 浓度测量

由于对棕色碳分子水平的认识有限,直接测量棕色碳环境浓度的研究较少,目前主要是针对全球或区域棕色碳大气负荷(柱浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)的评估,包括基于地基遥感或卫星遥感数据的反演^[32,33],利用全球化学传输模式的模拟^[34],或通过假定黑碳与棕色碳一定质量比来估算^[35]等;此外,个别研究中尝试用 HULIS 等作为校准物质,利用光谱测量定量棕色碳浓度^[36],或利用腐殖酸钠作为棕色碳的替代物质通过积分球法进行棕色碳的质量校准与定量^[37]。鉴于对棕色碳组成、来源与测量方法认识的局限性,目前棕色碳的定量极少以大气浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)形式表征,通过实验室直接测量分子水平棕色碳的浓度和组成仍为该领域的研究难点;棕色碳的排放清单仍无从建立,棕色碳浓度亟待进一步地准确评估。

2.2 光学测量

目前棕色碳的研究较多集中在光学特性的研究,多以光学参数直接或间接地定量表征其吸光特性,如吸光度、Angstrom 指数(absorption angstrom

exponent, AAE)、吸收系数(absorption coefficient)、单位质量吸收效率(mass absorption efficiency, MAE)、复折射指数(refractive index)等,其中最为常用的是 MAE 和 Angstrom 指数,分别用于表征单位质量棕色碳的吸光能力和吸光特性随波长变化的程度。

棕色碳光学特性的研究主要包括实验室模拟、外场观测、模式模拟和遥感等手段。其中,实验室模拟主要指实验室中对有机标准物质的光谱测量,以及烟雾箱或燃烧源模拟实验及其产物的光谱测量^[9,38];外场观测是指在野外采用在线光学仪器直接测量,或利用离线滤膜采样器采集颗粒物样品,然后在实验室中测量其中可溶性组分的光吸收^[8,14,21];模式模拟研究则主要是利用辐射强迫模型及全球大尺度化学传输模型(如 GEOS-CHEM)来评估棕色碳潜在的辐射强迫及吸光贡献^[34,39]。随着地基与卫星遥感技术的发展,尤其是多角度、多波段、高分辨率的拉曼雷达系统与太阳-天空辐射计的地基观测,以及卫星遥感在紫外与可见光波段多角度的测量,为气溶胶消光系数、后向散射系数、吸收光学厚度(AAOD)、单次散射反照率及其对波长的依赖性等光学参数的获取提供了可能,为棕色碳的研究开辟了新思路。

外场观测是研究棕色碳的重要渠道,与其他气溶胶的光学测量类似,可通过采集颗粒物到滤膜等介质上测量,或就自然悬浮状态的气溶胶直接测量。测量方法从原理上可分为光学法^[14,19,25,27,36,40]、热学法^[8,41]、光声光谱法^[42]和电镜扫描法^[39,43],详见表1。光学法是当前应用最为广泛的方法,其中利用离线滤膜-溶剂提取-连续光谱分析方法测量的吸收光谱范围较在线测量宽,能减少单一波长的局限性,提供更代表棕色碳吸光特性的波段(小于400 nm)而被较多采用^[14,19,21,27,36,45,49~51]。该方法简单易行,基本原理如下:利用水^[14,19,49,51]或甲醇^[27,45,50]等溶剂提取颗粒物中可溶性组分,借助宽波段(如UV-Vis)光谱仪测量光通过提取液后的光衰减(attenuation, ATN),遵循朗伯比尔定律,见公式(1);同时,利用700nm处的光吸收作为吸收基线进行扣除,通过公式(2)计算吸收系数,并换算至大气条件下的吸收系数 Bap_{λ} ;进而再除以可溶性有机组分的质量浓度,获得单位质量可溶性组分在波长 λ 处的吸光效率 MAE,见公式(3)。

$$ATN_{\lambda} = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right) = l \times \sum_i (c_i) \times \varepsilon_{i,\lambda} \quad (1)$$

式中, ATN_{λ} 由光谱仪直接测量; c 表示吸光物质的浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; ε 为比例常数; l 为吸收光路长度, cm。

$$Bap_{\lambda} = (ATN_{\lambda} - ATN_{700}) \times \frac{V_1}{V_a \cdot l} \times \ln(10) \quad (2)$$

式中, V_1 为提取液的体积, mL; V_a 为颗粒物样品的采样体积, L; l 为吸收光路长度, m。

$$MAE_{\lambda} = \frac{Bap_{\lambda}}{M} \quad (3)$$

式中, MAE_{λ} 是指波长 λ 处可溶性组分 M 的单位质量吸光效率,其中 M 在该方法中可为水溶性 OC 即 WSOC,或者甲醇提取的 OC 等。

$$\alpha_{ab} = K \cdot \lambda^{-AAE} \quad (4)$$

此外, Angstrom 指数被引入表征棕色碳的吸光特性随波长的变化,如公式(4)所示。式中, α_{ab} 为吸光度、单位质量吸光效率 MAE,或吸收系数 Bap ; K 是与颗粒物的质量浓度相关的常数。AAE 与气溶胶的粒径和组分密切相关。

值得注意的是,基于该方法的棕色碳研究中,为排除其他吸光物质(如硝酸盐)的干扰,较多选择 $\lambda = 365 \text{ nm}$ 处的光吸收作为棕色碳的表征。

近年来,利用遥感技术测量气溶胶光吸收在全球或区域气溶胶光学特性及辐射强迫研究中迅速开展。由美国宇航局(NASA)建立的全球地基遥感气溶胶自动监测网络(AEROSOL ROBOTIC NETWORK, AERONET)提供了长期、连续、公开化的气溶胶光学、微观形貌和辐射特性数据库,目前已被应用于棕色碳质量(柱)浓度的时空分布、季节分布^[33],以及辐射强迫的模拟研究^[52],为棕色碳的后续研究提供了基础。

3 棕色碳的研究进展

3.1 棕色碳的浓度分布

就全球而言, OC 约占 $PM_{2.5}$ 的 20% ~ 50%^[53~55],而中国大气 OC 浓度约为美国的 10 倍甚至更高^[55,56]。由 2.1 节可知,作为有机气溶胶的一部分,目前棕色碳的浓度研究相对较少,表2总结了现有评估大气棕色碳浓度的几项研究。结果发现,棕色碳的浓度负荷高于 BC(>3 倍),且呈现明显的时空差异。基于 AERONET 监测网络的数据反演与全球化学传输模式的模拟结果均表明,以生物质燃烧或生物燃料使用为主的地区(如南美和南非),棕色碳柱浓度负荷较高,棕色碳在总有机碳中

的比例高; 以化石燃料燃烧排放主导的地区(如北美和西欧), 棕色碳柱浓度相对较低, 棕色碳在总有机碳中的比例低于前者. 由于生物质燃烧、机动车尾气污染、工业排放、居民燃烧排放等共同影响, 中国北京地区在各个季节均呈现大气棕色碳柱浓度的全球高值区(除秋季生物质燃烧明显时期略低于印度地区外), 冬季出现最高值; 印度地区秋季生物

质燃烧显著, 使其成为该季节全球棕色碳分布的高值区. 由表 2 可知, 采用不同方法研究所得的棕色碳柱浓度季节分布趋势一致, 但绝对浓度存在差异, 原因主要在于不同研究中选择的数据集、颗粒的模态、复折射指数以及棕色碳的密度等存在差异^[33], 棕色碳占总 OC 的比例及其在大气中的浓度亟待准确评估.

表 1 目前棕色碳吸光特性的主要外场观测方法

Table 1 Current field observation based methods for light absorbing property study of brown carbon

项目	方法	方法原理	商业化仪器	优势与不足	文献
在线测量	非滤膜法	光声光谱法原理	光声光谱仪 (Photo-Acoustic Spectroscopy, PAS) 光声消光仪 (PAX)	优势: 保持颗粒物的原始状态; 可测量痕量物质; 不足: 半挥发性组分吸热后, 除发生热转移, 还因组分变化而发生质量改变, 增加测量的不确定性; 易受水汽影响, 只适用于相对湿度较低的环境, 仅能观测干气溶胶的吸收系数, 无法用于研究颗粒物吸湿增长导致的吸收系数变化	[42, 44]
		基于颗粒物的粒径、吸收测量, 利用 Mie 散射模型估算获取有机物的复折射指数, 其虚部即为有机物的吸收系数	扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪 (SMPS); 多角度吸收光度计 (MAAP)	优势: 考虑粒径对光学参数的影响; 不足: 假设颗粒物为球形且均质, OC 与 EC 处于外混状态, 颗粒物的密度多采用经验常数	[45]
		颗粒物总消光扣除散射消光	光腔衰荡气溶胶光谱仪 (CRD-AS) 结合光学浊度计 (Nephelometer)	优势: 提供环境气溶胶光吸收和单次散射反照率的高灵敏度测量; 不足: 使用独立的消光与光散射仪器, 会因测量样品温度、相对湿度及颗粒大小等不同而导致误差; 散射的观测误差跟吸收系数常常处在一个数量级, 且受颗粒物的折射系数、颗粒大小和微观形态影响 ^[46] , 截断效应误差尚不能较好校正, 从而影响吸收系数的测量	[47]
	滤膜法	光通过水溶液后, 特定波长下的衰减表征棕色碳的光吸收	大气细颗粒物在线水萃取采样装置 (PILS) 与总碳仪 (TOC)、光谱仪联用系统	优势: 快速、简便易行; 不足: 仅适用于水溶性组分	[14]
实验室测量	滤膜法	对收集在滤膜上的颗粒物进行光学测量	烟尘颗粒物吸收光度计 (PSAP); 七波段黑碳仪 (Aethalometer); 多角度吸收光度计 (MAAP)	优势: 操作简单; 连续、时间分辨率高; 对气体吸收不敏感; 不足: 测量波段有限; 滤膜基质和附着颗粒物的光散射造成系统误差; 颗粒物的附着与累积破坏了颗粒物的自然形态, 相对湿度会影响光吸收; 需进行仪器校正	[12, 48]
	光谱分析法	利用 UV-Vis 光谱仪测量光经过颗粒物有机物提取液后的光衰减, 获得提取液的吸收光谱	紫外可见光谱仪; 日本岛津 UV-2450 (dual-beam spectrometer)	优势: 光谱范围宽; 可避免 BC 干扰; 可用于棕色碳的化学组分研究; 不足: 时间与空间分辨率一般较低, 取决于滤膜采样设计; 仅针对可溶性组分; 提取和超声可能会导致在长波段下吸光的大分子物质发生降解	[14, 36, 40]
	透射电镜法	透射电镜 (TEM) 中电子束通过超薄样品获得样品的图像, 并根据电子能量损失谱 (EELS) 或能量弥散 X 射线谱 (EDS) 进行元素成分分析	透射电镜 (Transmission Electron Microscopy)	优势: 提供纳米级的结构、形貌、粒径、组成等信息; 可检测个体、外混状态的亚微米级球体的光学特性; 不足: 分析样品量少, 工作量大, 样品制作要求高; 时空分辨率低	[39, 43]

3.2 棕色碳的光学特性

如 2.2 节所述, 目前棕色碳的研究较多集中在对其光学特性的研究, 包括与源相关的棕色碳的光学特性(如由源直接排放或形成、或者是受某种源

表 2 目前全球棕色碳浓度分布的研究结果

Table 2 Current result for worldwide brown carbon concentration distributions

研究地区	季节	棕色碳柱浓度 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	棕色碳占 OC 比例/%	研究方法	文献
美国和欧洲	夏秋季	约 2~6		基于全球气溶胶自动监测网络 AERONET 数据反演	[32]
南美和南非	夏秋季	10~15			
中国北京	冬季	高达 35			
中国北京	夏季	<10		利用 AERONET 监测网络中太阳-天空辐射计遥感观测数据反演	[33]
	秋冬季	40~92			
全球		0.65			
南非地区		15~20	70~80		
生物质燃烧和生物燃料燃烧为主的地区	全年	>2	40~50	全球化学传输模型 IMPACT	[34]
北美东部、西欧、东亚等以化石燃料为主的地区,以及南美和东南亚等以天然有机源为主的地区			20~40		
欧洲	全年	0.1~2.79 ¹⁾	26~39 ²⁾	气溶胶提取液的光谱测量和 HULIS 质量校准	

1) 表示质量浓度,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2) 表示棕色碳占总碳中的比例

影响明显的环境大气中棕色碳的光学参数)、光学特性随颗粒物老化的改变,以及棕色碳的吸光贡献等方面的研究.

研究表明,棕色碳的光吸收特性与其来源密切相关. 首先,不同来源棕色碳的光学参数(如 MAE、Bap 等)随光波长的变化(用 AAE 表征)不同,例如,纯烟炱(soot)的光吸收最强,且对波长没有依赖性,AAE 值为 1;生物质燃烧产生棕色碳的光吸收对波长依赖性较弱($\text{AAE}\approx 1\sim 2$)^[41],而二次转化形成棕色碳的光吸收则呈现较强的波长依赖性(AAE 约为 4.7~7)^[18]. 有研究^[27,57]指出,光吸收对波长的依赖性(AAE 值)越大,则颗粒物的光吸收越弱. 其次,单位质量棕色碳的吸光能力(用 MAE 表征)据其来源而异. Cheng 等^[19]与 Du 等^[51]的研究均表明,柴油车源排放棕色碳的 MAE 强于生物质秸秆、木柴燃烧排放物(可达 2 倍). Zhang 等^[21]研究则表明,以机动车源贡献为主的地区环境大气棕色碳的 MAE 比天然源排放主导的地区高. 由此推测,人为源棕色碳的吸光能力可能强于天然源棕色碳,化石燃料源棕色碳的吸光能力则可能强于生物质燃烧源棕色碳.

目前,生物质燃烧排放产物的光学特性及其吸光贡献引起了国内外学者的关注^[42,51,58,59],除对生物质燃烧影响显著的大气有机气溶胶光学参数进行评估外^[51],部分研究还开展了棕色碳与 BC 混合状态、以及光化学老化过程等^[42,59]对生物质燃烧排放颗粒物光学特性的影响研究,发现棕色碳与 BC 以内混形式共存会使 BC 的吸光能力增强,吸光贡献增加^[42];而伴随着生物质燃烧烟羽在大气中的老

化,老化后棕色碳的光吸收相较于新鲜排放的棕色碳呈现一定程度的减弱^[59]. 到目前为止,针对化石燃料源棕色碳的研究仍较为少见.

棕色碳的吸光贡献是其吸光特性研究中的另一主要方面. 外场观测表明,在一定波长范围下,棕色碳的吸收效率可与 BC 相当,甚至超过 BC. 表 3 总结了不同地区外场观测和实验室研究中获得的有机物相关光学参数. 在 300~400 nm 处棕色碳吸收效率高,其 MAE 与 BC 处于同一数量级^[41],对气溶胶总吸光贡献高达 30%~50%^[12,25,28,45];即使在可见光波段,棕色碳的光吸收仍可达 BC 的 10%~40%^[12,42,47,60]. 棕色碳的存在使城市或区域大气吸光增强 15%~40%^[35,61];尤其在生物质燃烧明显的地区,棕色碳在 300 nm 处对总吸光贡献高达 50%,在整个波长范围内其吸光贡献也能达到 7%^[28]. 运用相同或相似研究方法针对水溶性有机碳的测量结果表明,我国北京地区水溶性棕色碳的吸光能力强于美国亚特兰大、韩国高山郡以及印度洋上空大气,与美国洛杉矶地区相当^[19,45,49,51,60];冬季强于夏季,这与冬季取暖燃煤及生物质燃烧排放的贡献密切相关. 此外,水溶性棕色碳的吸光能力弱于甲醇提取的棕色碳^[45,50],这可能与不同溶剂提取有机物的化学组成或结构有关,同时,也暗示现有研究对我国北京地区有机物的吸光能力可能存在一定低估.

近年来,我国中东部地区灰霾天气形势严峻,灰霾期间颗粒物中有机物的浓度明显升高,即使仅考虑有机物的散射,其消光贡献可达总消光的 39%~46%^[67],成为颗粒物浓度升高、能见度降低的主要

表 3 不同研究中获得的吸光有机物的光学参数¹⁾

Table 3 Optical parameters of light absorbing organic carbon obtained in different researches

波长 /nm	MAE /m ² ·g ⁻¹	BaP /Mm ⁻¹	BrC 吸光贡献 /%	AAE	研究地点	季节	物种	仪器与方法	文献
300			35 ~ 50	6.4 ~ 6.8 (300 ~ 700 nm)	巴西隆多尼亚	秋季	HULIS ^b	PAS + Nephelometer + Mie 散射计算 紫外-可见分光光度计(日本 Shimadzu UV-160)	[28]
350	0.16 ~ 0.19	0.40 ~ 0.46	5 ~ 10		美国亚特兰大	夏秋季	WSOC	紫外-可见分光光度计(Ocean Optics) + Mie 散射计算	[45]
	0.29 ~ 0.39	0.99 ~ 1.33	20 ~ 40			夏秋季	甲醇提取的 OC		
365	0.31 ± 0.07			6.2 ~ 8.3 (330 ~ 500 nm)	美国城市站点	夏季	WSOC	紫外-可见分光光度计(Ocean Optics)	[14]
	0.29 ± 0.02				美国乡村站点	夏季			
	0.70 ± 0.07				美国城市站点	冬季			
	0.62 ± 0.04				美国乡村站点	冬季			
365	0.69 ~ 0.77	0.88 ± 0.71		3.2 ± 1.2 (300 ~ 550 nm)	美国洛杉矶	夏季	WSOC	紫外-可见分光光度计(Ocean Optics)	[21]
	0.11 ~ 0.19	0.61 ± 0.38		3.4 ± 0.7 (300 ~ 550 nm)	美国亚特兰大	夏季			
365	0.71			3.2 ± 1.2 (300 ~ 600 nm)	美国洛杉矶	夏季	WSOC	紫外-可见分光光度计(Ocean Optics)	[50]
365	0.71 ± 0.20			7.22	中国北京	夏季	WSOC	紫外-可见分光光度计(Ocean Optics)	[19]
	1.79 ± 0.24			7.49		冬季			
365		4.6 ± 4.2		5.8 ~ 11.7 (月均 7.5)	中国北京	春季	WSOC	紫外-可见分光光度计(Ocean Optics)	[51]
	0.51	3.7 ± 3.8				夏季			
		8.0 ± 6.8				秋季			
	1.26	10.1 ± 8.6				冬季			
365	0.17 ~ 0.72 (0.45 ± 0.14)		4~45 ^a	3 ~ 19 (9 ± 3)	印度洋	冬季	WSOC	紫外-可见分光光度计(Ocean Optics)	[60]
365	0.3 ~ 1.1 (0.7 ± 0.2)		2 ~ 10 ^a	5.6 ~ 7.7 (6.4 ± 0.6)	韩国高山郡	春季	WSOC	紫外可见分光光度计(Hitachi U2010)	[49]
370	2.2		~ 30	3.5 (470 ~ 660 nm)	中国河北 (香河)	春季	BrC	PSAP + Aethalometer + Nephelometer	[12]
400			~ 40 ^a		墨西哥城	春季	OC	多光谱旋转遮蔽影带辐射计(MFRSR) + 光谱辐射计光化通量测量	[61]
404	0.82 ± 0.43		27 ± 15		美国科罗拉多		BrC	PAS	[42]
405	0.55 ± 0.31	2.30 ± 1.08	7.6		中国深圳	夏季	WSOM ^c	超声雾化器 + 光声光谱仪 + 扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪联用系统	[62]
405	0.12 ~ 0.14		~ 10		美国加州	夏季	BrC	PAS-CRD 系统	[63]
405			50		韩国济州岛	秋季	BrC	PASS-3	[64]
440			40 ^a ; 28		美国加利福尼亚	夏季	OC	AERONET 数据集	[65]
675			< 10 ^a						
500	0.001 ~ 0.1				实验室		NH ₃ 环境下 老化的 SOA	烟雾箱	[22]
500	0.1 ~ 0.5				实验室		甲醇提取的 木材燃烧产物	紫外-可见分光光度计(Shimadzu, UV-2401)	[27]
550	0.5		~ 10		中国河北(香河)	春季	BrC	PSAP + Aethalometer + Nephelometer	[12]
530	0.09				北美	春季	OC	三波段 PSAP	[41]
532			6 ^a		美国加州	夏季	BC 混合物	PAS-CRD 系统	[63]
532	0.07 ~ 0.1				以色列	夏季	HULIS ^b	光腔衰荡气溶胶光谱仪(CRD-AS)	[66]
532	0.54 ± 0.31	2.25 ± 1.26	10.6		中国深圳	夏季	WSOM ^c	超声雾化器 + 光声光谱仪 + 扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪联用系统	[62]
781	0.21 ± 0.13	0.86 ± 0.45	5.8						

1) 表中数据为文献中原始数据; a 表示棕色碳光吸收占相同光波段下黑碳光吸收的比例,其他均为占总吸收的比例; b 表示腐殖酸类物质; c 表示水溶性有机物,为 WSOC × 1.6

因素之一. 美国保护能见度联合监测网络 IMPROVE 通过对气溶胶组分与能见度的长期观测研究,建立了能见度与消光组分关系的经典公式. 然而,在最初的颗粒物总消光重构过程中,就有机物而言,仅考虑了散射消光;在更新的公式中,只增加了粒径与相对湿度对消光系数的影响^[68],并未全面考虑 OC 的光吸收. 若考虑了棕色碳的吸光,将对气溶胶光学效应有更全面的认识,改善颗粒物的消光闭合,提高含碳气溶胶吸光贡献估算的准确性^[41]. 在中国人为源对大气颗粒物贡献显著、化石燃料与生物质燃料排放量大的背景之下,棕色碳的吸光贡献亟需定量评估.

3.3 棕色碳的辐射强迫

除影响颗粒物的消光闭合与能见度外,棕色碳对太阳辐射的吸收与散射使其具有直接辐射强迫效应;此外,棕色碳在紫外和可见光波段的光吸收可降低大气光化学反应速率^[61];若云中存在棕色碳,会改变云的光吸收特性^[23],影响全球云对紫外-可见光波段辐射的吸收,从而间接影响区域的辐射强迫^[14,36].

IPCC 报告指出由于生物质和化石燃料燃烧排放有机颗粒物的存在,颗粒物的直接辐射强迫估算存在很大不确定性^[69]. 目前大多数全球气候模型、气溶胶的辐射强迫估算模型及光学遥感反演模型中大多使用传统的方法^[15],即将有机物简化为光散射物质^[65,70],而忽略有机物在可见光范围内吸收的能力^[34],将 BC 作为唯一的光吸收物质^[8]. 值得注意的是,这种简化处理在以新鲜烟炱 (soot, EC 为主要组分) 排放为主的地区是较为合理的假设;但实际上,不论何种来源的老化 BC 在化学组成上都同时含有 OC,除新鲜排放的烟炱外,实际大气中大部分源排放的 OC 在短波段下产生的光吸收与 BC 相当而不容忽视^[65]. 在棕色碳存在的情况下,简化处理会导致气溶胶光吸收模拟值与观测值偏离,甚至导致气溶胶辐射强迫低估近 20% ~ 30%^[35,71].

Alexander 等^[39]在 Science 上发表的对东亚大气含碳球体的丰度和光学特性研究,对传统含碳气溶胶辐射强迫估算时,认为 BC 吸光最强、OC 吸光可忽略的假设提出挑战,指出准确模拟气溶胶的辐射强迫,需同时考虑 OC 的光吸收与光散射. 有研究小组针对棕色碳的吸光特性与辐射强迫展开了前沿研究,尝试评估棕色碳对辐射强迫的贡献^[34,70]. 例如,Chung 等^[70]认为 550 nm 处含碳气溶胶对太阳辐射的吸收贡献中 20% 来自棕色碳;考虑有机物的

光吸收后,有机气溶胶的净辐射强迫接近于 0,全球含碳气溶胶的直接辐射强迫 ($0.75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 约等于 BC 的辐射强迫,含碳气溶胶在对流层顶表现出致暖效应,尤其是在生物质燃烧明显的地区. Feng 等^[34]利用全球化学传输模型和蒙特卡罗辐射传输模式,估算棕色碳的辐射强迫约为 $0.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,约占全球人为源气溶胶光吸收贡献的 19%,并指出将棕色碳纳入辐射模拟后,有些地区有机气溶胶在对流层顶的辐射效应甚至由致冷 ($-0.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 转变为致暖 ($0.025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

即使在辐射模式中考虑了棕色碳吸光的研究,由于对棕色碳基础研究的局限,目前仍建立在一定假设与简化的基础上,例如:①棕色碳与 BC、或棕色碳与非吸光有机物的质量比是基于假设而非实测;②假设光学参数 (如 MAE 与 AAE 等) 为不受波长、化学组成、颗粒大小、相对湿度等因素影响的常数,这些假设都增加了辐射强迫评估结果的不确定性.

4 我国目前的研究现状

我国对棕色碳的研究略有触及. Cheng 等^[19]和 Du 等^[51]测量了北京冬夏两季大气环境样品中水溶性有机物的吸收光谱,发现其吸收效率随波长增加而明显减少,计算了 365 nm 处的 MAE₃₆₅,指出北京冬季气溶胶中水溶性有机物的 MAE 高于夏季,且均明显高于美国东南部^[21],猜测可能与生物质燃烧排放及 SOA 密切相关;但研究中未对该部分棕色碳的来源进一步确认. 吴一凡等^[62]计算了深圳市水溶性有机物的 MAE,初步估算了水溶性有机物在不同波段对 PM_{2.5} 整体吸光的贡献,指出水溶性有机物虽不是吸光能力很强的物质,但其环境浓度高,其对 PM_{2.5} 整体吸光仍具有显著贡献. Wang 等^[33]利用 AERONET 监测网络中太阳-天空辐射计遥感观测获得的复折射指数与单次散射反照率等光学参数,建立了反演研究黑碳、棕色碳、沙尘等光吸收性物质的方法,并将其应用到北京地区棕色碳的研究中,结果表明棕色碳在气溶胶总体积中占 25%,其质量浓度具有明显的季节变化,秋冬季最高 ($40 \sim 92.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$),夏季最低 ($< 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$). 综上所述,国内现有的研究多数集中在北京地区,主要针对水溶性有机物展开,仅限于对其吸收光谱的测量与吸光参数的计算;尚未针对棕色碳吸光贡献及辐射强迫评估,缺乏对棕色碳来源的确定及其吸光特性影响因素的深入探讨.

5 棕色碳的未来研究方向

到目前为止,棕色碳的组成与来源仍未被很好地解释,缺乏统一和规范的测量手段,其形成机制与浓度的时空变化规律等研究仍需加强^[11,33]。实验室测量多侧重于对可溶性有机物的光谱测量,及有限的源排放测试与模拟;基于外场观测的研究局限于有限观测点位与观测时段,缺乏时间的连续性和空间的覆盖率;由于基础数据的缺乏,模式模拟研究仍建立在一定的假设之上。未来棕色碳的研究可从以下多个方面展开。

(1)从光学性质的角度 对测量颗粒物吸收系数、消光系数与散射系数的相关光学测量仪器进行比较,充分考虑并量化各种光学测量方法存在的不确定性,提高光学测量与表征的准确性。

(2)从化学组成的角度 寻找并建立棕色碳与不吸光有机碳的实验分离技术,以及棕色碳物质组成的测量方法,进一步确定棕色碳的分子组成与结构。

(3)从化学活性的角度 关注棕色碳的光化学反应、气相及水相化学等反应活性,了解其在大气中各种化学过程及其大气寿命,以及不同状态(如新鲜产生、老化后)棕色碳的光学特性。

(4)从影响因素的角度 深入研究棕色碳的粒径分布、吸湿性、微观形貌以及与 BC 等其他物质的混合状态等对棕色碳的吸光特性与吸光能力的影响。

(5)从辐射强迫的角度 拓展基于外场观测的棕色碳时空分布研究,将实测的棕色碳浓度、吸收效率等光学参数、含碳气溶胶混合状态等纳入大气辐射模式,评估含碳气溶胶的直接辐射强迫;同时考虑棕色碳物质的吸湿性及云水反应过程等导致的间接辐射效应。

(6)从源谱的角度 建立并健全不同源排放棕色碳的光学特征谱库,对以往仅针对颗粒物化学成分的源成分谱库进行补充与完善。

6 结论

棕色碳的吸光特性是目前国际研究的前沿和热点,而中国的相关研究还比较缺乏。我国含碳气溶胶浓度水平高,同时细颗粒物的主要排放源与棕色碳的主要贡献源高度吻合。已有研究表明,我国棕色碳的大气柱浓度高,吸光能力强,因此,在我国复合污染日趋严重、灰霾频繁发生的背景下,开展棕

色碳的吸光特性、化学组成、来源解析、影响因素的系统探讨,获得不同地区、不同来源棕色碳的光学参数,将是准确评估我国含碳气溶胶的辐射强迫效应、及其对区域灰霾贡献和对全球气候影响的基础和关键。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郭新彪,魏红英.大气PM_{2.5}对健康影响的研究进展[J].科学通报,2013,58(13):1171-1177.
- [3] 白志鹏,李伟芳.二次有机气溶胶的特征和形成机制[J].过程工程学报,2008,8(1):202-208.
- [4] 郑玫,闫才青,李小滢,等.二次有机气溶胶估算方法研究进展[J].中国环境科学,2014,34(3):555-564.
- [5] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006. 691-719.
- [6] National Academies Press. Haze in the grand canyon: An evaluation of the winter haze intensive tracer experiment[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 1990. 1-98.
- [7] 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.
- [8] Kirchstetter T W, Novakov T, Hobbs P V. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2004, 109(D21): doi: 10.1029/2004JD004999.
- [9] Bond T C, Bussemer M, Wehner B, et al. Light absorption by primary particle emissions from a lignite burning plant[J]. Environmental Science & Engineering, 1999, 33(21): 3887-3891.
- [10] Jacobson M Z. Isolating nitrated and aromatic aerosols and nitrated aromatic gases as sources of ultraviolet light absorption[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 1999, 104(D3): 3527-3542.
- [11] Bergstrom R W, Pilewskie P, Russell P B, et al. Spectral absorption properties of atmospheric aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7: 5937-5943.
- [12] 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(6): 2035-2050.
- [13] Formenti P, Elbert W, Maenhaut W, et al. Inorganic and carbonaceous aerosols during the Southern African Regional Science Initiative (SAFARI 2000) experiment: Chemical characteristics, physical properties, and emission data for smoke from African biomass burning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 2003, 108(D13): doi: 10.1029/2002JD002408.

- [14] Hecobian A, Zhang X, Zheng M, *et al.* Water-soluble organic aerosol material and the light-absorption characteristics of aqueous extracts measured over the Southeastern United States [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (13): 5965-5977.
- [15] Chakrabarty R K, Moosmüller H, Chen L W A, *et al.* Brown carbon in tar balls from smoldering biomass combustion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (13): 6363-6370.
- [16] Shapiro E L, Szprengiel J, Sareen N, *et al.* Light-absorbing secondary organic material formed by glyoxal in aqueous aerosol mimics[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9** (7): 2289-2300.
- [17] Subramanian R, Roden C A, Boparai P, *et al.* Yellow beads and missing particles: Trouble ahead for filter-based absorption measurements[J]. *Aerosol Science Technology*, 2007, **41** (6): 630-637.
- [18] Bones D L, Henricksen D K, Mang S A, *et al.* Appearance of strong absorbers and fluorophores in limonene-O₃ secondary organic aerosol due to NH₄⁺-mediated chemical aging over long time scales[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2010, **115** (D5): D052303.
- [19] 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.
- [20] Jaoui M, Corse E, Kleindienst T E, *et al.* Analysis of secondary organic aerosol compounds from the photooxidation of *d*-limonene in the presence of NO_x and their detection in ambient PM_{2.5}[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40** (12): 3819-3828.
- [21] Zhang X L, Lin Y H, Surratt J D, *et al.* Light-absorbing soluble organic aerosol in Los Angeles and Atlanta: A contrast in secondary organic aerosol [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38** (21): L21810.
- [22] Updyke K M, Nguyen T B, Nizkorodov S A. Formation of brown carbon via reactions of ammonia with secondary organic aerosols from biogenic and anthropogenic precursors [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **63**: 22-31.
- [23] Gelencsér A, Hoffer A, Kiss G, *et al.* In-situ formation of light-absorbing organic matter in cloud water [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2003, **45** (1): 25-33.
- [24] Sareen N, Schwieter A N, Shapiro E L, *et al.* Secondary organic material formed by methylglyoxal in aqueous aerosol mimics[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (3): 997-1016.
- [25] Sun H L, Biedermann L, Bond T C. Color of brown carbon: A model for ultraviolet and visible light absorption by organic carbon aerosol[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34** (17): L17813.
- [26] Pöschl U. Aerosol particle analysis: challenges and progress[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, **375** (1): 30-32.
- [27] Chen Y, Bond T C. Light absorption by organic carbon from wood combustion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (4): 1773-1787.
- [28] Hoffer A, Gelencsér A, Guyon P, *et al.* Optical properties of humic-like substances (HULIS) in biomass-burning aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6** (11): 3563-3570.
- [29] Apicella B, Alfè M, Barbella R, *et al.* Aromatic structures of carbonaceous materials and soot inferred by spectroscopic analysis [J]. *Carbon*, 2004, **42** (8-9): 1583-1589.
- [30] Reisinger P, Wonschütz A, Hitznerberger R, *et al.* Intercomparison of measurement techniques for black or elemental carbon under urban background conditions in wintertime: Influence of biomass combustion [J]. *Environment Science Technology*, 2008, **42** (3): 884-889.
- [31] Desyaterik Y, Sun Y L, Shen X H, *et al.* Speciation of "brown" carbon in cloud water impacted by agricultural biomass burning in eastern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118** (13): 7389-7399.
- [32] Arola A, Schuster G, Myhre G, *et al.* Inferring absorbing organic carbon content from AERONET data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (1): 215-225.
- [33] Wang L, Li Z Q, Tian Q J, *et al.* Estimate of aerosol absorbing components of black carbon, brown carbon, and dust from ground-based remote sensing data of sun-sky radiometers [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118** (12): 6534-6543.
- [34] Feng Y, Ramanathan V, Kotamarthi V R. Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (17): 8607-8621.
- [35] Park R J, Kim M J, Jeong J I, *et al.* A contribution of brown carbon aerosol to the aerosol light absorption and its radiative forcing in East Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44** (11): 1414-1421.
- [36] Lukács H, Gelencsér A, Hammer S, *et al.* Seasonal trends and possible sources of brown carbon based on 2-year aerosol measurements at six sites in Europe[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2007, **112** (D23): doi: 10.1029/2006JD008151.
- [37] Wonschütz A, Hitznerberger R, Bauer H, *et al.* Application of the integrating sphere method to separate the contributions of brown and black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Environment Science Technology*, 2009, **43** (4): 1141-1146.
- [38] Patterson E M, McMahon C K. Absorption characteristics of forest fire particulate matter [J]. *Atmospheric Environment*, 1984, **18** (11): 2541-2551.
- [39] Alexander D T L, Crozier P A, Anderson J R. Brown carbon spheres in East Asian outflow and their optical properties[J]. *Science*, 2008, **321** (5890): 833-836.
- [40] Zhang X L, Liu J M, Parker E T, *et al.* On the gas-particle partitioning of soluble organic aerosol in two urban atmospheres with contrasting emissions; 1. Bulk water-soluble organic carbon

- [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2012, **117**(D21): doi: 10.1029/2012JD017908.
- [41] Clarke A, McNaughton C, Kapustin V, *et al.* Biomass burning and pollution aerosol over North America: Organic components and their influence on spectral optical properties and humidification response[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2007, **112**(D12): doi: 10.1029/2006JD007777.
- [42] Lack D A, Langridge J M, Bahreini R, *et al.* Brown carbon and internal mixing in biomass burning particles[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, **109**(37): 14802-14807.
- [43] Zhu J, Crozier P A, Anderson J R. Characterization of light-absorbing carbon particles at three altitudes in East Asian outflow by transmission electron microscopy[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(13): 6359-6371.
- [44] Lewis K, Arnott W P, Moosmüller H, *et al.* Strong spectral variation of biomass smoke light absorption and single scattering albedo observed with a novel dual-wavelength photoacoustic instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2008, **113**(D16): doi: 10.1029/2007JD009699.
- [45] Liu J, Bergin M, Guo H, *et al.* Size-resolved measurements of brown carbon in water and methanol extracts and estimates of their contribution to ambient fine-particle light absorption[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(24): 12389-12404.
- [46] Qian F, Ma L, Thompson J E. Modeling and measurements of angular truncation for an aerosol albedometer[J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publication*, 2012, **7**: 12021-1 - 12021-8.
- [47] Moosmüller H, Chakrabarty R K, Arnott W P. Aerosol light absorption and its measurement: a review [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, **110**(11): 844-878.
- [48] Mohr C, Lopez-Hilfiker F D, Zotter P, *et al.* Contribution of nitrated phenols to wood burning brown carbon light absorption in Delting, United Kingdom during winter time[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, **47**(12): 6316-6324.
- [49] Kirillova E N, Andersson A, Han J, *et al.* Sources and light absorption of water-soluble organic carbon aerosols in the outflow from northern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(3): 1413-1422.
- [50] Zhang X L, Lin Y H, Surratt J D, *et al.* Sources, composition and absorption angstrom exponent of light-absorbing organic components in Aerosol extracts from the Los Angeles Basin[J]. *Environmental Sciences & Technology*, 2013, **47**(8): 3685-3693.
- [51] Du Z Y, He K B, Cheng Y, *et al.* A yearlong study of water-soluble organic carbon in Beijing II: Light absorption properties [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 235-241.
- [52] Mallet M, Dubovik O, Nabat P, *et al.* Absorption properties of Mediterranean aerosols obtained from multi-year ground-based remote sensing observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(18): 9195-9210.
- [53] Ram K, Sarin M M, Tripathi S N. Temporal trends in atmospheric PM_{2.5}, PM₁₀, elemental carbon, organic carbon, water-soluble organic carbon, and optical properties: impact of biomass burning emissions in the Indo-Gangetic Plain [J]. *Environment Science & Technology*, 2012, **46**(2): 686-695.
- [54] Yang F, Tan J, Zhao Q, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(11): 5207-5219.
- [55] Cao J J, Lee S C, Chow J C, *et al.* Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2007, **112**(D22): doi: 10.1029/2006JD008205.
- [56] Zheng M, Ke L, Edgerton E S, *et al.* Spatial distribution of carbonaceous aerosol in the southeastern United States using molecular markers and carbon isotope data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2006, **111**(D10): doi: 10.1029/2005JD006777.
- [57] Roden C A, Bond T C, Conway S, *et al.* Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves [J]. *Environment Science & Technology*, 2006, **40**(21): 6750-6757.
- [58] Kirchstetter T W, Thatcher T L. Contribution of organic carbon to wood smoke particulate matter absorption of solar radiation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(14): 6067-6072.
- [59] Zhong M, Jang M. Dynamic light absorption of biomass-burning organic carbon photochemically aged under natural sunlight [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(3): 1517-1525.
- [60] Srinivas B, Sarin M M. Light absorbing organic aerosols (brown carbon) over the tropical Indian Ocean: impact of biomass burning emissions[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, **8**: 044042.
- [61] Barnard J C, Volkamer R, Kassianov E I. Estimation of the mass absorption cross section of the organic carbon component of aerosols in the Mexico city Metropolitan Area[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(22): 6665-6679.
- [62] 吴一凡, 黄晓锋, 兰紫娟, 等. PM_{2.5}中水溶性有机物吸光特性的模拟研究[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(10): 1736-1740.
- [63] 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.
- [64] 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**: 10387-10398.

- [65] Bahadur R, Praveen P S, Xu Y Y, *et al.* Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, **109**(43): 17366-17371.
- [66] Dinar E, Riziq A A, Spindler C, *et al.* The complex refractive index of atmospheric and model humic-like substances (HULIS) retrieved by a cavity ring down aerosol spectrometer (CRD-AS) [J]. Faraday Discussion, 2008, **137**: 279-295.
- [67] Zhang F W, Xu L L, Chen J S, *et al.* Chemical compositions and extinction coefficients of PM_{2.5} in peri-urban of Xiamen, China, during June 2009-May 2010[J]. Atmospheric Research, 2012, **106**: 150-158.
- [68] Malm W C, Hand J L. An examination of the physical and optical properties of aerosols collected in the IMPROVE program [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(16): 3407-3427.
- [69] Forster P V, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [A]. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 131-234.
- [70] Chung C E, Ramanathan V, Decremer D. Observationally constrained estimates of carbonaceous aerosol radiative forcing [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, **109**(29): 11624-111629.
- [71] Sato M, Hansen J, Koch D, *et al.* Global atmospheric black carbon inferred from AERONET[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, **100**(11): 6319-6324.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryIAc Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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