

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

广州地区大气棕色碳气溶胶光吸收特性

李铸杰^{1,2}, 谭浩波^{2*}, 郑军¹

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 广东省生态气象中心, 广州 510080)

摘要: 2014年冬季在广州番禺站利用校正后的7波段黑碳仪数据, 计算棕色碳(BrC)在不同波长的光吸收特性, 并结合气溶胶及气体成分在线监测仪(MARGA)和在线OCEC分析仪同步观测数据, 分析了BrC的来源。结果表明: BrC在370、470、520、590和660 nm处对光吸收的贡献随波长增大而变小, 不同波段的贡献分别为25.9%、19.7%、14.1%、11.6%和7.7%; BrC光吸收系数、水溶性钾离子(K^+)和有机碳(OC)浓度大致呈现日间低, 夜间高的趋势, 说明生物质燃烧产物对BrC的光吸收系数贡献很大, 傍晚附近农村地区逐渐活跃的秸秆燃烧活动和夜间稳定的边界层也有利于污染物累积; BrC光吸收系数与OC的比值在午后出现低值, 说明二次有机气溶胶和老化的气溶胶的吸光能力较弱。相关性分析表明, BrC光吸收系数与 K^+ 离子和OC浓度的相关性最高, BrC光吸收系数与硝酸根(NO_3^-)和铵根(NH_4^+)离子也具有较高的相关性。

关键词: 棕色碳; 黑碳; 光吸收 Ångström 指数; 水溶性离子; 广州

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4364-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903190

Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou

LI Zhu-jie^{1,2}, TAN Hao-bo^{2*}, ZHENG Jun¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Guangdong Ecological and Meteorological Center, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In this work, we conducted measurements using a seven-wavelength aethalometer, an online OCEC analyzer, and a MARGA to investigate brown carbon (BrC) absorption properties and source origins during the winter of 2014 at Panyu station, Guangzhou. The results showed that the average absorption contributions of BrC decreased with an increase in wavelength, measured as 25.9%, 19.7%, 14.1%, 11.6%, and 7.7% at 370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, and 660 nm, respectively. Diurnal variations in BrC absorption and the concentrations of potassium cations (K^+) and organic carbon (OC) was high at night and low during the day, which was attributed to biomass burning. This indicated that BrC was emitted from straw burning in rural areas and accumulated in the steady planetary boundary layer at night. Diurnal variations in the ratio of BrC absorption to OC concentrations showed a distinct dip during the afternoon, indicating that aged aerosol and secondary organic aerosol (SOA) had a weaker BrC absorption capacity. There was a good overall correlation between BrC absorption and K^+ concentrations. BrC absorption was also moderately related to the concentrations of ammonium cations (NH_4^+) and nitrate anions (NO_3^-).

Key words: brown carbon; black carbon; absorption Ångström exponent; water-soluble ions; Guangzhou

有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(element carbon, EC)或黑碳(black carbon, BC)作为重要的碳质气溶胶成分, 对于环境有着不可忽视的影响, 并引起了相关研究者的注意。碳质气溶胶不仅能像其他种类的气溶胶那样影响人类身体健康, 而且能够通过光吸收作用影响地球的辐射平衡。其中BC和EC都是指颗粒物中以单质形态存在的碳, 主要根据其光学和热学性质进行表征^[1]。在以往的研究中, BC被认为是主要的光吸收物种^[1], 而OC则仅仅考虑其散射能力导致的辐射冷却作用^[2]。然而, 部分的OC也能在近紫外-可见光波段进行光吸收, 这一类有机碳气溶胶被称之为棕色碳(brown carbon, BrC)^[3,4]。不同来源的BrC由于有着不同的化学成分和物理结构, 因而也有着不同的光学性质。BrC不仅来源于生物质和化石燃料的不完全燃烧^[5,6], 还与二次有机气溶胶生成过程, 比如云水中的液相反应^[7]或者挥发性有机物的氧化过程^[8]

有着紧密的联系。此外, BrC还与BC、无机盐以及非吸收性有机气溶胶等物质相混杂在一起, 使得探究棕色碳的光学性质变得更加复杂。

BC的光吸收作用通常是假设为不随波长变化的^[9]。然而, BrC的光吸收却有强烈的波长依赖性, 即随波长减小而光吸收增强。波长依赖性可以利用吸收Ångström指数(absorption Ångström exponent, AAE), 也就是光吸收系数的幂指数来表示。BC的吸收Ångström指数(AAE_{BC})的阈值可以达到1.6^[10]; 而BrC的AAE值的范围则更大, 通常在2~7之间^[11,12]。基于BC和BrC在不同波长上光吸收特性的差异, 不少研究利用多波段光学测量仪

收稿日期: 2019-03-28; 修订日期: 2019-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201901, 2016YFC0203305, 2017YFC0209501); 国家自然科学基金项目(41575122, 41730106)

作者简介: 李铸杰(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为气溶胶光学, E-mail: lizhujiel9@163.com

* 通信作者, E-mail: hbtan@gd121.cn

器, 比如说三波段光声光谱仪^[9,13]和多波段黑碳仪^[14]等仪器, 通过 AAE 方法来区分 BC 和 BrC 引起的光吸收. 以往文献根据此方法估计的 BrC 在较短的波长(370 nm 和 405 nm) 占总光吸收系数的贡献在 6% ~ 41% 之间^[15,16].

在过去的 40 年里面, 快速的工业化和城市化引起了珠三角地区严重的大气污染问题^[17]. 随着珠三角周边地区不断增加的机动车和工厂, 研究者们已经观测到高浓度的二次有机气溶胶(SOA)^[18]. 生物质燃烧排放的污染物对于冬季广州地区大气污染也有着重要的贡献^[19]. Qin 等^[20]利用高分辨率飞行时间气溶胶质谱仪测量了有机气溶胶的化学成分, 发现生物质燃烧有机气溶胶(BBOA)与棕色碳光吸收的相关性最高, BBOA 有着很强的光吸收能力且有着明显的 BrC 光吸收贡献. 这些研究表明了广州地区棕色碳的光吸收贡献难以忽略. 为了进一步了解广州地区 BrC 的光吸收效应, 本文利用 7 波段黑碳仪数据, 计算了广州番禺站 BrC 在不同波长的光吸收系数和光吸收贡献, 并结合气溶胶及气体成分在线监测仪(MARGA)观测数据, 分析了 BrC 的来源.

1 材料与方法

1.1 观测地点

本研究中的采样点位于中国气象局广州番禺大气成分站(23°00'N, 113°21'E), 海拔高度约为 150 m, 地处广州郊区, 周边有大量的植被覆盖, 离最近的居民区大约 500 m, 距离交通干道番禺大道大约 1.3 km, 附近并没有明显工业源排放. 番禺站位于珠江三角洲的中心地带, 能够很好地代表珠三角地区大气气溶胶均匀混合的平均特征.

1.2 仪器设备

本文中气溶胶消光系数由光腔衰荡气溶胶消光仪(CRDS XG-1000, 禾信)采集获得. CRDS 通过分别测量脉冲激光器发射的脉冲激光在不锈钢腔体内两个反射镜之间来回反射过程中的气溶胶和背景空气的光腔衰荡时间来得出气溶胶 532 nm 的消光系数(σ_{ext}). 气溶胶散射系数(σ_{sp})由三波段浊度计(3563, TSI)采集. 观测开始前, 事先利用 CO₂ 气体对浊度计进行校准. 在测量期间, 浊度计设置为每 120 min 通入一次过滤的无颗粒物零空气, 持续时间 5 min, 以校正空气分子散射的影响和背景散射信号的变化, 最终得出气溶胶的散射系数. 气溶胶光吸收系数由黑碳仪(AE-33, Magee)采集. 黑碳仪通过测量单位时间内在滤膜上的颗粒物光衰减量的变化来得出气溶胶 7 个波

段的光吸收系数. 钾离子(K⁺)、钙离子(Ca²⁺)、镁离子(Mg²⁺)、氯离子(Cl⁻)、硫酸根离子(SO₄²⁻)、硝酸根离子(NO₃⁻)和铵根离子(NH₄⁺)等水溶性组分的质量浓度数据来源于气溶胶及气体成分在线监测仪(MARGA, 瑞士万通). PM_{2.5} 质量浓度数据是由 GRIMM 公司生产的 EDM180 型环境颗粒物分析仪进行采集. 在线 OCEC 碳分析仪(RT-4, Sunst Laboratory)利用热光法测量了有机碳(OC)的质量浓度, 其升温程序采用的是 Quartz 法.

所有的观测仪器均放置于二楼实验室内, 室内温度恒定在 25℃ 左右. 采样气流通过放置在屋顶离地 2 m 的 PM_{2.5} 切割头和 Nafion 干燥管(Permapure MD700)后进入仪器, 以确保采样气流的相对湿度控制在 30% 以下. 观测时间段为 2014 年 11 月 29 日至 2015 年 1 月 5 日.

1.3 计算方法

1.3.1 气溶胶吸收系数的测量及校正

7 波段黑碳仪是通过测量滤膜上颗粒物单位时间内的光衰减系数(σ_{ATN})来测量气溶胶的光吸收系数(σ_{abs})的. 为了将该光衰减系数转化为分散在空气中的气溶胶光吸收系数, 需要引入实时的参数 k 来补偿负载效应, 以及固定参数 C_{ref} 来校正气溶胶在滤膜上的多重散射效应. 它们之间的关系可利用以下公式表达^[21,22]:

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\sigma_{\text{ATN}}}{(1 - k \cdot \text{ATN}) \cdot C_{\text{ref}}} \quad (1)$$

黑碳仪通过同时测量两个不同流量采样孔的 ATN 来推算出实时的 k 值, k 值的范围约为 0.002 99 ~ 0.012 39 (880 nm). ATN 为滤膜上的光信号衰减量, 其表达式可参考文献[23]. 而 C_{ref} 值则认为主要是与滤膜材质有关, 玛基公司推荐石英滤膜的 C_{ref} 为 2.14, 特氟龙石英基质滤膜的 C_{ref} 为 1.57^[21,23], 本研究使用的是特氟龙石英基质滤膜. 然而不同地方的观测实验表明 C_{ref} 值具有明显的地域性^[22]. 为了得到更准确的 C_{ref} 值, 利用 CRDS 得到的消光系数减去浊度计得到的散射系数, 由于 CRDS 和浊度计在测量时均扣除了空气分子的影响, 那么将得出 532 nm 气溶胶的吸收系数:

$$\sigma_{\text{abs}} = \sigma_{\text{ext}} - \sigma_{\text{scat}} \quad (2)$$

式中, σ_{abs} 、 σ_{ext} 和 σ_{scat} 分别是吸收系数, 消光系数和散射系数. 由于 7 波段黑碳仪的工作波段是 370、470、520、590、660、880 和 950 nm, 为了转化为 532 nm 处的 $\sigma_{\text{ATN}}/(1 - k \cdot \text{ATN})$, 需利用幂次函数关系式进行转换:

$$AAE = - \frac{\ln[\sigma_{ATN,520\text{ nm}}/(1 - k_{520\text{ nm}} \cdot ATN_{520\text{ nm}})] - \ln[\sigma_{ATN,590\text{ nm}}/(1 - k_{590\text{ nm}} \cdot ATN_{590\text{ nm}})]}{\ln(520) - \ln(590)} \quad (3)$$

$$[\sigma_{ATN}/(1 - k \cdot ATN)]_{532\text{ nm}} = \sigma_{ATN,520\text{ nm}}/(1 - k_{520\text{ nm}} \cdot ATN_{520\text{ nm}}) \cdot \left(\frac{532}{520}\right)^{-AAE} \quad (4)$$

由黑碳仪得到的 $\sigma_{ATN}/(1 - k \cdot ATN)$ 和消光仪结合浊度计得到的 σ_{abs} 进行回归分析得到 532 nm 的 $C_{ref} = 3.291$ (如图 1). 本研究得出的 C_{ref} 值与吴兑于 2004 年在番禺站利用黑碳仪和光声光谱仪 (PAS) 联用得出 532 nm 的 C_{ref} (3.48) [24,25] 十分接近, 说明 C_{ref} 取为 3.291 是比较合理的. C_{ref} 值没有明显的波长依赖性, 在同样的实验条件下各个波长的 C_{ref} 都十分接近 [21,26]. 因此, 本文将 $C_{ref} = 3.291$ 应用到 7 个波长的数据计算中.

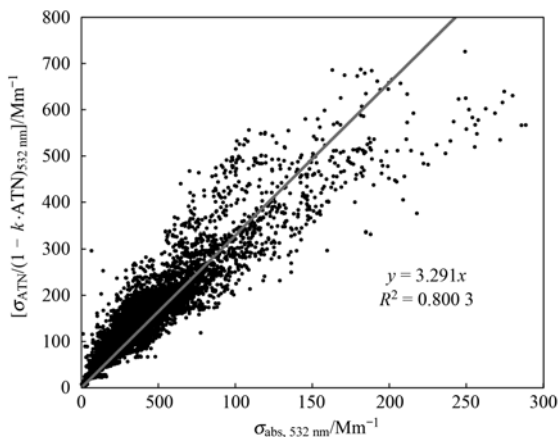


图 1 $\sigma_{abs,532\text{ nm}}$ 与 $[\sigma_{ATN}/(1 - k \cdot ATN)]_{532\text{ nm}}$ 的对比

Fig. 1 Correlation between $\sigma_{abs,532\text{ nm}}$ and $[\sigma_{ATN}/(1 - k \cdot ATN)]_{532\text{ nm}}$

1.3.2 棕色碳 (BrC) 气溶胶的光学吸收

根据朗伯-比尔定律, BC 光吸收系数与波长存在幂次函数关系. 不同波长的 BC 光吸收系数可以由 880 nm 的 BC 光吸收系数和 BC 的吸收 Ångström 指数 (AAE_{BC}) 推断得出:

$$\sigma_{abs,BrC,\lambda} = \sigma_{abs,BC,880\text{ nm}} \times (880/\lambda)^{AAE_{BC}} \quad (5)$$

由于 880 nm 处主要是 BC 气溶胶引起的气溶胶光吸收, 因此将黑碳仪测量的 880 nm 的吸收系

数视为 BC 的吸收系数. 纯 BC 或者有吸收物质附着的 BC 的 AAE_{BC} 接近于 1.0 [27], 许多研究也常常在紫外到近红外波段区间使用 $AAE_{BC} = 1.0$ 来表征 BC 的光吸收波长依赖性 [9,14]. 因此, 本文假设 370 ~ 880 nm 的 AAE_{BC} 为 1.0. 然后, 由总吸收系数减去 BC 的吸收系数得出 BrC 的吸收系数:

$$\sigma_{abs,BrC,\lambda_i} = \sigma_{abs,\lambda_i} - \sigma_{abs,BC,\lambda_i} \quad (6)$$

式中, λ_i 表示波长. 值得注意的是, 在近紫外-可见光波段, 沙尘气溶胶具有光吸收能力, 在一定程度上会引起 BrC 光吸收的估计误差. 但是由于广州地区冬季沙尘来源的气溶胶占总 $PM_{2.5}$ 的比例低于 5% [18], 且沙尘气溶胶的吸光能力要远远低于 BC 和 BrC [28], 故可以忽略广州地区沙尘气溶胶的吸光效应.

2 结果与讨论

2.1 BrC 气溶胶的光吸收性质

如图 2 所示, 370、470、520、590 和 660 nm 的平均棕色碳光吸收系数 ($\sigma_{abs,BrC}$) 分别为 (18.0 ± 14.1) 、 (10.0 ± 8.5) 、 (6.0 ± 5.5) 、 (4.2 ± 3.7) 和 $(2.3 \pm 2.2) \text{ Mm}^{-1}$, 说明 BrC 气溶胶的光吸收具有明显的波长依赖性, 在近紫外波段有着更强的光吸收. 相应地平均棕色碳光吸收贡献为: $(25.9 \pm 9.0)\%$ 、 $(19.7 \pm 7.9)\%$ 、 $(14.1 \pm 6.9)\%$ 、 $(11.6 \pm 5.6)\%$ 和 $(7.7 \pm 4.4)\%$. 虽然气溶胶的光吸收以 BC 为主, 但 BrC 的光吸收贡献也是不可忽视的, 特别是在近紫外段.

2.2 BrC 气溶胶来源分析

图 3 展示了 2014 年 11 月 29 日 ~ 2015 年 1 月 5 日, OC 浓度、 K^+ 浓度和 370 nm BrC 逐小时平均

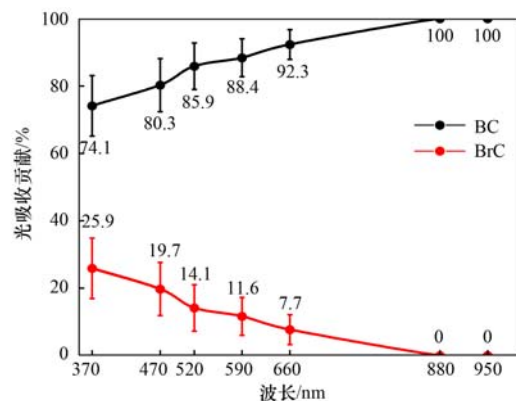
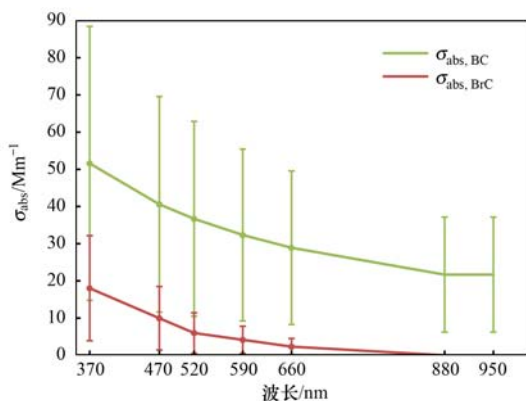


图 2 BC 和 BrC 在 7 波段的平均吸收系数和平均吸收贡献

Fig. 2 BC and BrC particle average light absorption coefficients and average light absorption contributions at seven wavelengths

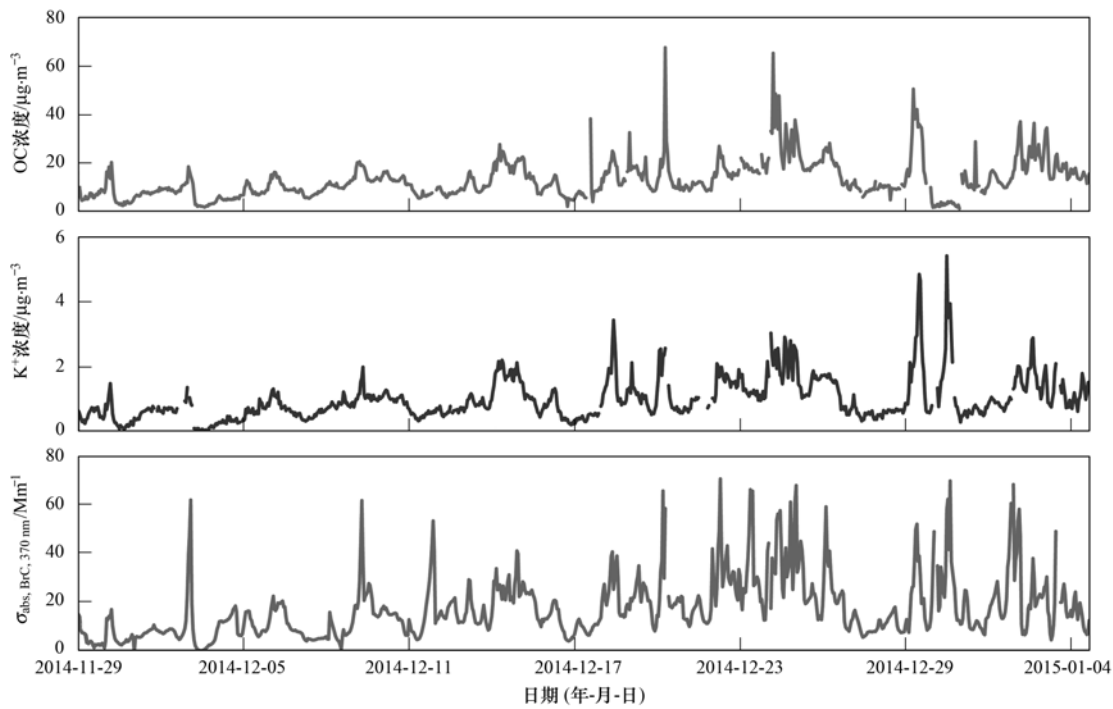


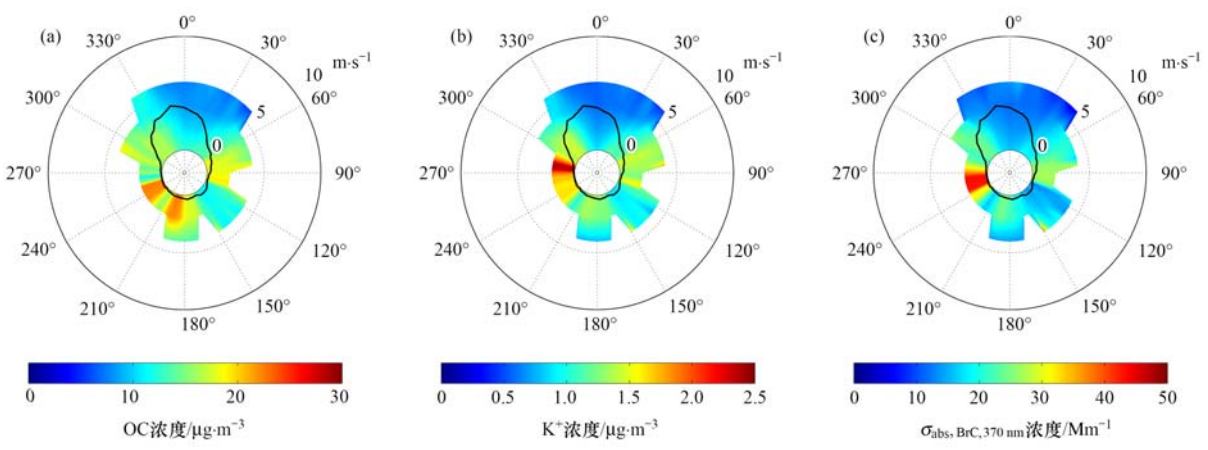
图3 OC 浓度、 K^+ 浓度和 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 时间序列变化

Fig. 3 Time series of OC aerosol mass concentrations, water-soluble K^+ concentrations, and $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$

光吸收系数 ($\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$) 的时间变化. OC 浓度由在线 OCEC 分析仪得出, 其范围为 $1.5 \sim 67.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $(12.1 \pm 7.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; K^+ 逐小时浓度由 MARGA 得出, 其范围为 $0 \sim 5.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $(1.0 \pm 0.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 范围为 $0.2 \sim 70.8 \text{ Mm}^{-1}$, 观测期间的平均值为 $(17.6 \pm 12.4) \text{ Mm}^{-1}$. 由图 3 可知, 观测期间 OC、 K^+ 浓度和 BrC 光吸收系数的变化趋势十分相似, 说明三者有着密切的关系. BrC 属于 OC 中能进行光吸收的物种, 因此 BrC 光吸收与 OC 浓度的变化趋势应该是一致的. 而 BrC 的光吸收与 K^+ 浓度变化趋势相似, 可能是因为 BrC 与生物质燃烧产物有着密切的联系^[8]. 生物质燃烧过程产生

的颗粒物中往往含有大量的钾盐成分, 且钾盐的成分十分稳定, K^+ 也视为是生物质燃烧的示踪物^[29].

为了研究 OC 浓度、 K^+ 浓度和 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 的来源, 本研究制作了三者与风速风向的关系图 (图 4). 观测期间番禺站的盛行风向为珠三角地区冬季常见的西北风, 且吹偏北风时风速较大, 吹偏南风时风速较小. 整个观测期间, OC 浓度、 K^+ 浓度和 BrC 光吸收系数出现高值的情况往往与风速较低的西南风 (平均风速约为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 相联系在一起. 在图 4(a) 和 4(b), 尽管吹偏东风和偏西风时, 风速都较低, 但 OC 浓度和 K^+ 浓度在吹偏西风的时候要高于吹偏东风的时候, 且 K^+ 浓度这一趋势更加明显. 这可能是因为番禺站的西边是珠三角的



阴影轮廓的颜色代表三者在不同风速 (径向) 和风向 (横向) 的均值, 实线为风向频率

图4 OC 浓度、 K^+ 浓度和 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 风向玫瑰图

Fig. 4 Wind rose plots of OC concentrations, K^+ concentrations, and $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$

农村地区,存在着季节性秸秆焚烧现象,使得 K^+ 浓度和 OC 浓度均较高. 而东边则是珠三角城市化程度相对较高的东莞和深圳等城市,一方面,该处生物质燃烧活动相对较少,使得输送到番禺站含 K^+ 的颗粒物较少;另一方面,工业排放和二次过程也会产生 OC,使得吹偏东风期间的 OC 浓度相对于吹偏西风时期下降并不明显. 图 4(c) 为 BrC 光吸收系数 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 的风玫瑰图,可以看到 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 与 OC 浓度和 K^+ 浓度的风玫瑰图相似,即吹西风时风速较低, $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 数值较高;吹南风 and 北风风速较大, $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 数值较低. 这说明三者可能更多地来源于本地排放,且在低风速天气里累积后出现较高的浓度. 然而,三者的风玫瑰图中,最大平均浓度值出现的风向并不是十分的一致,一种可能的解释是尽管生物质燃烧是 OC, K^+ 和 BrC 的重要来源,但是它们的排放比例可能是动态变化的,或者说在不同的生物质燃料,燃烧条件,甚至是不同的燃烧阶段,所产生的 OC, K^+ 和 BrC 可能是有所不同的. Satish 等认为^[30],虽然生物质燃烧产物中包含着大量的吸收性 BrC 气溶胶,但是 BrC 在大气中的老化过程会大大削弱其光吸收能力. 此外,除了一次的排放之外,大气中的二次反应过程也能产生 BrC,比如说液相反应产生的类腐殖质类物质也是一种重要的 BrC 气溶胶成分^[1].

为了进一步研究 BrC 光吸收的潜在源,图 5 展

示了 OC 浓度、 K^+ 浓度、 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 和 BrC 单位质量吸收比 ($\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}/\text{OC}$) 的日变化. 番禺站的 OC 日变化为白天低,晚上高,表明 OC 浓度变化与行星边界层的高度变化有关,一次排放的 OC 在晚上累积,在早上就随着边界层升高,在大气垂直混合作用下迅速稀释. 午后,逐渐活跃的二次反应过程产生 OC, OC 浓度开始轻微地上升. 与 OC 的日变化不同, K^+ 浓度在 06:00 左右出现了一个明显的极大值,这可能与该时段农村地区使用生物燃料做早饭有关. 值得注意的是,尽管珠三角地区经济十分发达,但是其较偏远的农村地区仍有相当多的居民使用秸秆、木柴等生物燃料来做饭. $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 日变化 [图 5(c)] 更像是 OC 浓度和 K^+ 浓度的结合,说明了一次和二次的排放都能影响 BrC 的光吸收强度. 傍晚时分 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 有明显的上升趋势,由于当地通常会在傍晚焚烧秸秆,排放的 BrC 随后在晚间浅薄的边界层里不断累积,使得 BrC 的光吸收系数快速提高. 图 5(d) 是 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}/\text{OC}$ 的日变化,其变化趋势比较平缓,但是在午后则出现了一个突然地下降,然后在傍晚回升. 午后突然地下降,可能是由于老化过程和光化学反应产物会削弱 BrC 的光吸收能力^[20].

图 6 是 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 与 OC、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的相关性分析. 其中, $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 与 K^+ 和 OC 的相关性最好(相应的决定系数 R^2 分别为 0.488 9 和 0.487 2),其次是 NO_3^-

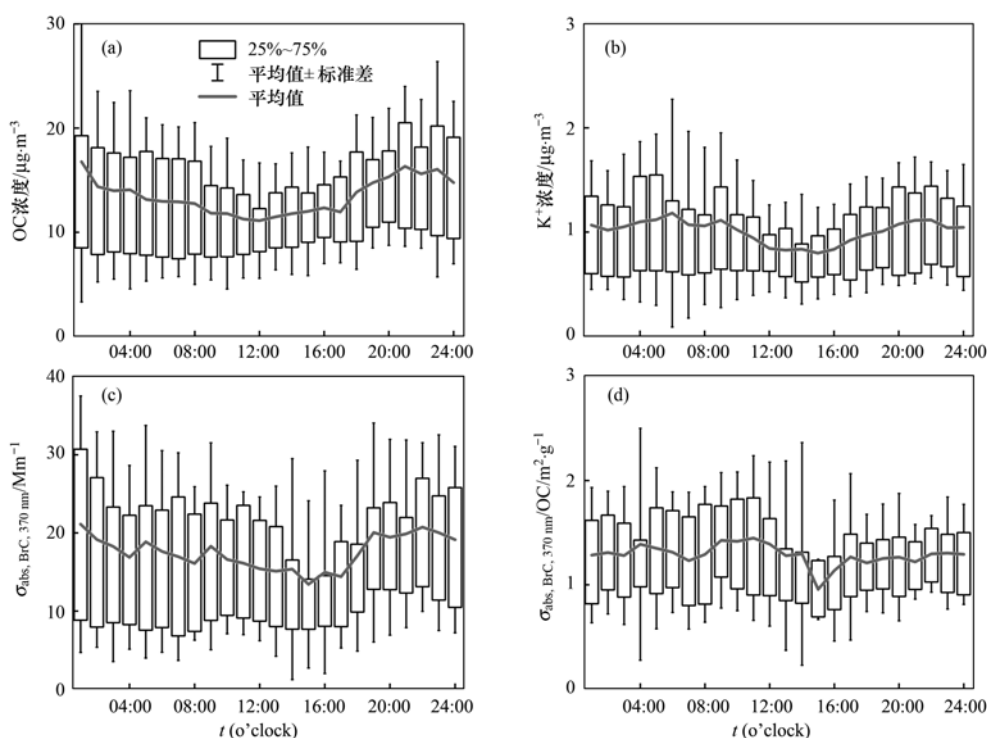


图 5 OC 浓度、 K^+ 浓度、 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$ 和 $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}/\text{OC}$ 的日变化

Fig. 5 Diurnal trends in OC concentrations, K^+ concentrations, $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}$, and $\sigma_{\text{abs,BrC},370\text{ nm}}/\text{OC}$

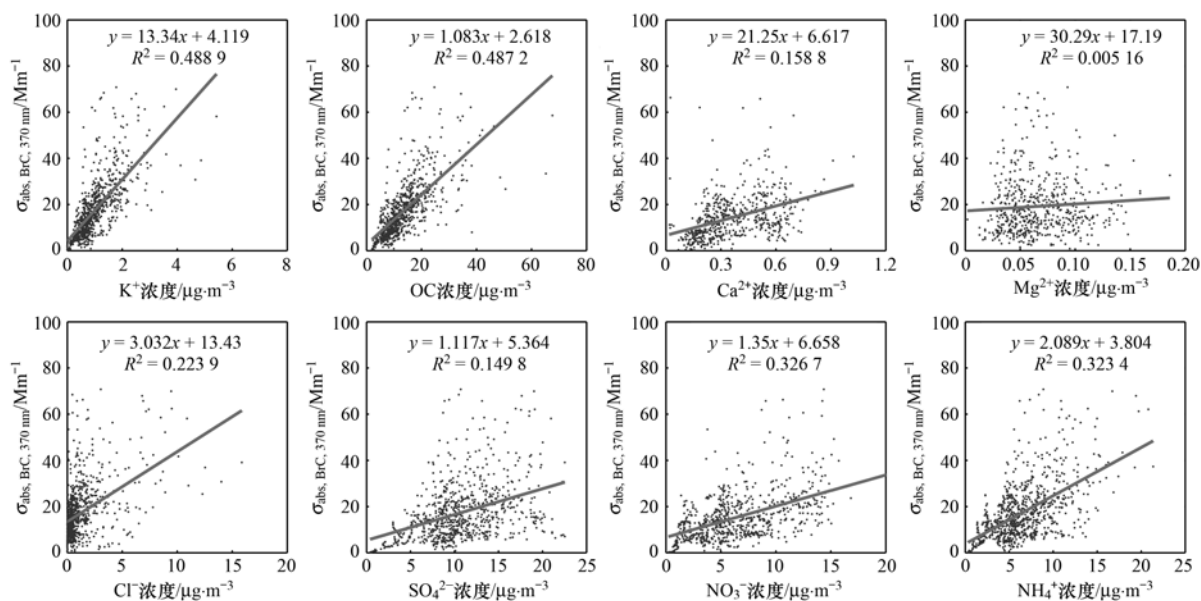


图6 $\sigma_{\text{abs, BrC, 370 nm}}$ 与OC、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的对比

Fig. 6 Correlations between $\sigma_{\text{abs, BrC, 370 nm}}$ and OC, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+ concentration

($R^2 = 0.3267$) 和 NH_4^+ ($R^2 = 0.3234$). K^+ 作为生物质燃烧的示踪物, 与 $\sigma_{\text{abs, BrC, 370 nm}}$ 的良好相关性表明了生物质燃烧是 BrC 的重要来源, 这也跟气溶胶质谱仪源解析结果得出的生物质燃烧有机气溶胶 (BBOA) 与 BrC 的光吸收具有良好相关性的结论相吻合^[20]. 虽然 K^+ 离子也存在于海盐气溶胶中^[31], 但是番禺站离海岸线大约有 100 多公里, 而且由图 3 可得知该地冬季的盛行风向为偏北风, 不利于南

方海洋气团对海盐气溶胶的输送, 以往的研究也表明海盐对广州地区大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献比较小^[32]. 虽然 $\sigma_{\text{abs, BrC, 370 nm}}$ 和 K^+ 的相关性是最好的, 但相应的 R^2 仍然较低. 一方面, 由于本文使用的是逐小时平均的 $\sigma_{\text{abs, BrC, 370 nm}}$ 和小时分辨率的 K^+ 离子浓度数据. 当使用逐日平均数据时, $\sigma_{\text{abs, BrC, 370 nm}}$ 和 K^+ 的 R^2 将提升至 0.73. Wang 等^[33] 在南京的研究指出, 逐日平均的 BrC 吸收系数和 K^+ 离子浓度的 R^2 为

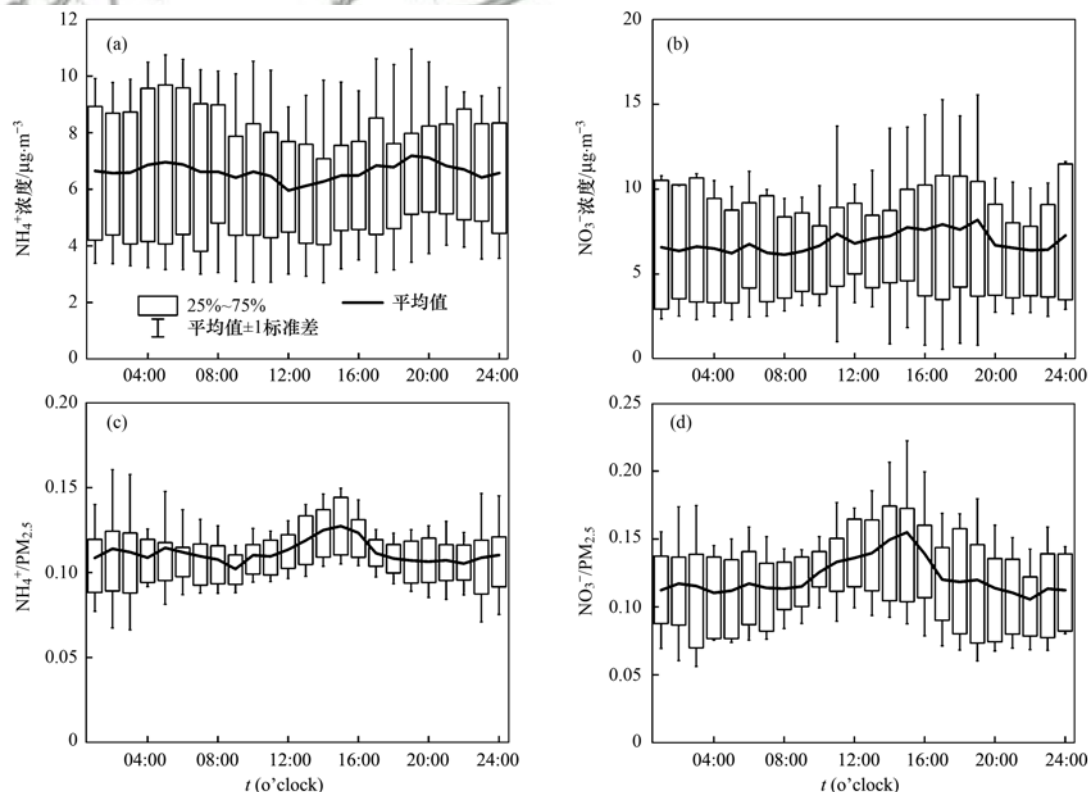


图7 NH_4^+ 浓度、 NO_3^- 浓度、 $\text{NH}_4^+ / \text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{NO}_3^- / \text{PM}_{2.5}$ 的日变化

Fig. 7 Diurnal trends in NH_4^+ , NO_3^- concentrations, $\text{NH}_4^+ / \text{PM}_{2.5}$, and $\text{NO}_3^- / \text{PM}_{2.5}$

0.92(夏季)和0.45(冬季). Shen 等^[34]在西安的研究表明,逐日的 BrC 吸收系数和 K^+ 离子浓度的 R^2 为 0.76; 另一方面,冬季民用燃煤燃烧产生的 BrC 会导致 BrC 吸收系数和 K^+ 离子相关性较差^[33],但是广州地区冬季采暖需求较低,且由图 4 可得 BrC 吸收系数主要来源于本地排放,是否适用于广州地区还需进一步地讨论.

沙尘气溶胶常常会含有较高浓度的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} . $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 呈弱相关,且 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度较低,说明沙尘气溶胶对于气溶胶整体贡献较低,并且沙尘气溶胶导致 AAE 方法得出的 BrC 光吸收误差较小. SO_4^{2-} 可来源于二次反应,煤炭燃烧和生物质燃烧等等, Cl^- 可来源于海盐和煤炭燃烧, SO_4^{2-} 和 Cl^- 复杂的来源导致了其与 $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 相关性较差.

对于 NO_3^- 和 NH_4^+ , 一方面生物质燃烧产生的烟羽中含有大量的氮氧化物(NO_x)和氨气(NH_3),而这些 NO_x 和 NH_3 能够转化为硝酸盐和铵盐^[35]; 另一方面, $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 在傍晚出现峰值,对应着傍晚的生物质燃烧排放以及 BrC 的夜间累积. 结合图 7, NH_4^+ 和 NO_3^- 也在傍晚出现峰值. $NO_3^-/PM_{2.5}$ 呈现白天高、夜间低的趋势. 这是因为午后活跃的二次反应形成了 NO_3^- , 但是此时相对高的温度会引起 NO_3^- 的挥发,而且边界层高度较高导致污染物不容易累积,使得 NO_3^- 浓度缓慢爬升. 到了傍晚,随着边界层和温度的降低, NO_3^- 会逐渐累积直至晚上光化学反应停止,并达到峰值. $NH_4^+/PM_{2.5}$ 的日变化与 $NO_3^-/PM_{2.5}$ 相似,主要是受到 NH_4^+ 与 NO_3^- 中和反应的控制. 硝酸铵的形成和累积过程与生物质燃烧排放的高峰时间上的重合也可能导致 NO_3^- 和 NH_4^+ 与 $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 有一定的相关性.

3 结论

(1) BrC 平均吸收系数由 660 nm 的 $(2.3 \pm 2.2) \text{ Mm}^{-1}$ 升至 370 nm 的 $(18.0 \pm 14.1) \text{ Mm}^{-1}$, 说明光吸收具有明显的波长依赖性. BrC 平均光吸收贡献由 660 nm 的 $(7.7 \pm 4.4)\%$ 升高到 370 nm 的 $(25.9 \pm 9.0)\%$, 表明可见光-近紫外波段 BrC 的光吸收贡献是不可忽视的,且波长越短, BrC 的光吸收贡献越明显.

(2) K^+ 浓度以及 OC 浓度与 $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 时序变化具有良好的一致性,说明了 BrC 与生物质燃烧排放物有着密切的联系. 此外,三者容易在低风速出现高值,说明主要与本地来源的污染物有关. OC 浓度、 K^+ 浓度和 $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 日变化受到边界层高

度和污染物排放的影响,大致呈日间低,夜间高的趋势. $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 与 OC 比值的日变化在午后出现下降,表明光化学反应导致的气溶胶老化过程或二次反应产物会削弱 BrC 的光吸收能力.

(3) 相关性分析结果显示, BrC 光吸收与 K^+ 浓度的相关性最好,表明了生物质燃烧是 BrC 的重要来源. 另外, $\sigma_{abs, BrC, 370\text{ nm}}$ 与 NH_4^+ 浓度和 NO_3^- 浓度有着较好的相关性,一方面可能与生物质燃烧产生的烟羽中 NO_x 和 NH_3 转化有关; 另一方面,可能因为硝酸铵的形成和累积与生物质燃烧活动高峰时间重合.

参考文献:

- [1] Andreae M O, Gelencser A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(10): 3131-3148.
- [2] Koch D, Bond T C, Streets D, *et al.* Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** (D2): D02205.
- [3] 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*, 2004, **109** (D21): D21208.
- [4] 闫才青, 郑玫, 张远航. 大气棕色碳的研究进展与方向[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4404-4414.
Yan C Q, Zheng M, Zhang Y H. Research progress and direction of atmospheric brown carbon [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4404-4414.
- [5] 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.
- [6] Bond T C, Bussemer M, Wehner B, *et al.* Light Absorption by primary particle emissions from a lignite burning plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33** (21): 3887-3891.
- [7] 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.
- [8] Laskin A, Laskin J, Nizkorodov S A. Chemistry of atmospheric brown carbon [J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 4335-4382.
- [9] Lack D A, Langridge J M. On the attribution of black and brown carbon light absorption using the Ångström exponent [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (20): 10535-10543.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Hoffer A, Gelencser 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.
- [13] 黄聪聪, 马嫣, 郑军. 南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3057-3066.
Huang C C, Ma Y, Zheng J. Aerosol optical properties and light absorption enhancement of EC during wintertime in Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3057-3066.
- [14] Olson M R, Garcia M V, Robinson M A, *et al.* Investigation of black and brown carbon multiple-wavelength-dependent light absorption from biomass and fossil fuel combustion source emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(13): 6682-6697.
- [15] Washenfelder R A, Attwood A R, Brock C A, *et al.* Biomass burning dominates brown carbon absorption in the rural southeastern United States[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(2): 653-664.
- [16] Yuan J F, Huang X F, Cao L M, *et al.* Light absorption of brown carbon aerosol in the PRD region of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1433-1443.
- [17] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [18] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [19] Wu C, Wu D, Yu J Z. Quantifying black carbon light absorption enhancement with a novel statistical approach[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 289-309.
- [20] Qin Y M, Tan H B, Li Y J, *et al.* Chemical characteristics of brown carbon in atmospheric particles at a suburban site near Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(22): 16409-16418.
- [21] Weingartner E, Saathoff H, Schnaiter M, *et al.* Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, **34**(10): 1445-1463.
- [22] Coen M C, Weingartner E, Apituley A, *et al.* Minimizing light absorption measurement artifacts of the Aethalometer: evaluation of five correction algorithms [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, **3**(2): 457-474.
- [23] Drinovec L, Močnik G, Zotter P, *et al.* The “dual-spot” Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(5): 1965-1979.
- [24] Wu D, Wu C, Liao B, *et al.* Black carbon over the South China Sea and in various continental locations in South China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(24): 12257-12270.
- [25] Wu D, Mao J T, Deng X J, *et al.* Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(8): 1152-1163.
- [26] Segura S, Estellés V, Titos G, *et al.* Determination and analysis of in situ spectral aerosol optical properties by a multi-instrumental approach [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**(8): 2373-2387.
- [27] Bodhaine B A. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the south pole [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D5): 8967-8975.
- [28] 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 Discussions*, 2009, **8**(3): 10913-10954.
- [29] 王鑫彤, 鞠法帅, 韩德文, 等. 大气颗粒物中生物质燃烧示踪化合物的研究进展[J]. *环境化学*, 2015, **34**(10): 1885-1894.
Wang X T, Ju F S, Han D W, *et al.* Research progress on the organic tracers of biomass burning in atmospheric aerosols [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(10): 1885-1894.
- [30] Satish R, Shamjad P, Thamman N, *et al.* Temporal characteristics of brown carbon over the central Indo-Gangetic Plain [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 6765-6772.
- [31] Pio C A, Legrand M, Alves C A, *et al.* Chemical composition of atmospheric aerosols during the 2003 summer intense forest fire period[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(32): 7530-7543.
- [32] 吕文英, 徐海娟, 王新明. 广州城区秋季大气 PM_{2.5} 中主要水溶性无机离子分析[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(1): 98-101.
Lv W Y, Xu H J, Wang X M. Major inorganic water-soluble ions in fine particles collected in autumn in urban Guangzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(1): 98-101.
- [33] Wang J P, Nie W, Cheng Y F, *et al.* Light absorption of brown carbon in eastern China based on 3-year multi-wavelength aerosol optical property observations and an improved absorption Ångström exponent segregation method [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(12): 9061-9074.
- [34] Shen Z X, Zhang Q, Cao J J, *et al.* Optical properties and possible sources of brown carbon in PM_{2.5} over Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **150**: 322-330.
- [35] Elliott E M, Kendall C, Boyer E W, *et al.* Dual nitrate isotopes in dry deposition: utility for partitioning NO_x source contributions to landscape nitrogen deposition [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, **114**(G4): G04020.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)