

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军 (2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波 (2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红 (2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab (2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤 (2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡现秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成 (2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍 (2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)
《环境科学》征订启事(2480)	
《环境科学》征稿简则(2538)	
信息(2766, 2798, 2927)	

青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源

王红磊¹, 刘思晗¹, 赵天良¹, 卢文¹, 夏俊荣², 施双双¹

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 无锡学院大气与遥感学院, 无锡 214105)

摘要: 黑碳(BC)作为最重要的吸收性气溶胶,可影响青藏高原地区的辐射、云和地表积雪等,进而影响全球季风环流及降水。本研究于2017年7月5日至9月5日在青藏高原东缘理塘县使用黑碳仪 AE-33 测量了 BC 浓度数据,结合黑碳仪模型、PSCF 和 CWT 潜在来源模型,分析了 BC 的污染特征、潜在来源及其影响区域。结果表明,理塘 $\rho(\text{BC})$ 为 $0.4 \sim 4\,699.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $816.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 5.96%。理塘 $\rho(\text{BC}_{\text{液态燃料}})$ 和 $\rho(\text{BC}_{\text{固态燃料}})$ 的平均值分别为 $486.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $398.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{BC}_{\text{液态燃料}}$ 的贡献率 C 为 0.51。 $\rho(\text{BC})$ 主要分布在 $0 \sim 2\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 可占总观测期间的 92.5%。BC、 $\text{BC}_{\text{液态燃料}}$ 和 $\text{BC}_{\text{固态燃料}}$ 的日变化为双峰型分布,峰值分别出现在 08:00 和 20:00,早高峰主要与交通源和含碳物质不完全燃烧有关,而在晚高峰期间则主要受到含碳物质不完全燃烧影响。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的潜在来源和影响范围不同。境外输入对理塘 $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的浓度影响较大,其影响范围主要集中在我国境内,向其东北部传输,高值中心主要集中在理塘周边地区。

关键词: 青藏高原; 黑碳(BC); 日变化; 潜在来源; 影响区域

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2450-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206036

Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau

WANG Hong-lei¹, LIU Si-han¹, ZHAO Tian-liang¹, LU Wen¹, XIA Jun-rong², SHI Shuang-shuang¹

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Atmosphere and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: As the most important absorbing aerosol, black carbon (BC) can affect radiation, clouds, and surface snow cover over the Tibetan Plateau. In this study, the BC mass concentrations were measured using a seven-channel aethalometer (AE-33) in Litang County over the eastern Tibetan Plateau from July 5 to September 5, 2017. The aethalometer model, potential source contribution function (PSCF), and concentration-weighted trajectory (CWT) models were used to analyze the variation characteristics, potential sources, and affecting areas of BC. The results showed that the mass concentration of $\rho(\text{BC})$ in Litang ranged from 0.4 to 4 699.8 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, with an average value of 816.4 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, accounting for 5.96% of $\text{PM}_{2.5}$. The average mass concentrations of $\rho(\text{BC}_{\text{liquid}})$ and $\rho(\text{BC}_{\text{solid}})$ in Litang were 486.1 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ and 398.5 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, with a C of 0.51. The $\rho(\text{BC})$ mass concentration was mainly distributed from 0-2000 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, which accounted for 92.5% of the total observation period. The diurnal variation in BC, $\text{BC}_{\text{liquid}}$, and BC_{solid} showed a bimodal distribution, with the peaks appearing at 08:00 and 20:00, respectively. The first peak was mainly related to traffic sources and incomplete combustion of carbonaceous materials, whereas the second peak was mainly related to incomplete combustion of carbonaceous materials. The potential sources and affecting areas of $\text{PM}_{2.5}$ and BC were different. Imports from abroad had a greater impact on the concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and BC in Litang, and the affecting areas were mainly transmitted to the northeast in China. The high-value centers were mainly concentrated in the surrounding areas of Litang.

Key words: Tibetan Plateau; black carbon(BC); diurnal variation; potential source apportionment; potential affecting area

黑碳(black carbon, BC)作为大气中最重要的吸收性气溶胶,主要来自化石燃料和生物质等含碳物质的不完全燃烧过程^[1~3]。BC 浓度在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比较小,一般为百分之几到百分之十几,但是其对太阳辐射的强吸收作用,使其对大气的加热能力仅次于 CO_2 这样的温室气体^[4~6]。BC 的理化特性比较稳定,在大气中很难与其他物质发生化学过程,但是其疏松多孔的结构,非常有利于吸附其他污染物并为其提供大气化学反应的场所和催化条件^[7,8]。在城市地区,BC 可以改变边界层结构,进而影响大气污染过程^[9,10]。BC 还可以吸附有毒有害的物质,进而影响人体健康^[11,12]。

BC 的源排放特征具有明显的时空差异^[13~16]。在城市群地区,人为源密集,BC 的浓度较高,这也是

目前全球 BC 研究所重点关注的区域^[17~20]。近几年来,国内外众多研究者对城市地区 BC 的时空分布特征、传输机制、源汇关系和健康效应等方面开展了研究^[18~26]。我国在京津冀地区、长三角地区、珠三角地区、两湖盆地和四川盆地等城市群密集区域针对 BC 污染特征开展了大量的深入研究^[27~35]。曹阳等^[29]针对 2019 年北京市一次污染过程研究表明,城区站点 BC 以区域传输为主要来源,路边站点局地排放 BC 积累过程较明显,易发生颗粒物二次生成过程。Wang 等^[30]发现华北平原冬季液态燃料

收稿日期: 2022-06-04; 修订日期: 2022-07-02

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0105); 国家自然科学基金项目(91744209, 91644223, 91544109 和 41805096)

作者简介: 王红磊(1987~),男,博士,副教授,主要研究方向为黑碳气溶胶污染特征及其来源, E-mail: hongleiwang@nuist.edu.cn

(交通源)和固态燃料(生物质燃烧和燃煤)在 BC 中的占比分别为 69% 和 31%. Zheng 等^[31]通过对武汉 5.5a 的观测数据分析发现, $\rho(\text{BC})$ 的变化范围为 $0.03 \sim 12.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 在 1 月最高 $[(1.98 \pm 1.70) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, 在 7 月最低 $[(0.87 \pm 0.61) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$. 杨晓旻等^[32]在南京市观测研究表明 BC 不同季节的周末效应不同, 风速对 BC 周末效应的影响较小, 逆温层结差异是造成 BC 周末效应的主要原因. 王璐等^[33]发现成都地区受交通早晚高峰的影响, 液体燃料对 BC 的贡献在各季节均呈现早晚峰值, 夜间固体燃料排放贡献有所增加. 孙嘉胤等^[35]对广州市城区的 BC 及其光学特征进行分析, 发现 $\rho(\text{EC})$ 在干季的平均值 $[(1.93 \pm 1.38) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 高于湿季 $[(1.46 \pm 0.75) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$.

青藏高原被称为世界第三极, 海拔较高, 拥有丰富的冰川和积雪资源, 被称为“亚洲水塔”, 对东亚及全球大气环流具有重要影响. 青藏高原是地球上最为洁净的地区之一, 该地区人为源排放较少, 但是其周边的南亚和东亚是目前全球碳大气污染物排放快速增长的地区, 含碳气溶胶浓度较高^[36~39]. 受不同尺度大气环流的影响, BC 可通过远距离输送抵达青藏高原, 进而对该地区的大气辐射平衡和气候造成影响^[38~40]. BC 沉积在冰雪表面, 也会加速该地区冰川的融化^[41]. 位于青藏高原东北坡的瓦里关作为全球大气本底站, 是我国最早开展 BC 观测研究的站点之一, 针对该地区 BC 的时间演变特征、传输机制和影响因素等方面已取得大量的研究成果^[42~44]. 受到观测条件限制, 针对青藏高原地区 BC 的研究相对较少^[45~48], 尤其是衔接南亚和东亚地区的青藏高原东缘地区 BC 的观测更加少见. 基于此, 本研究于 2017 年 7 月 5 日至 9 月 5 日在青藏高原东缘理塘县使用黑碳仪 AE-33 测量了 BC 浓度数据, 结合黑碳仪模型、PSCF 和 CWT 潜在来源模型, 分析了 BC 的污染特征、潜在来源及其影响区域, 通过加深高原地区 BC 浓度水平及其来源的理解, 以期对认识青藏高原现代环境变化提供参考, 并为揭示大气污染物对青藏高原气候变化的影响机制提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 观测点和实验

观测点位于青藏高原东缘理塘县国家基本气象观测站 (30.00°N , 100.27°E , 海拔高度 3 948.9 m). 理塘县隶属四川省甘孜藏族自治州, 位于四川省西部, 青藏高原东缘, 以丘状高原和山原地貌为主, 为典型的高原气候区. 气象数据包括: 温

度、风速、风向、RH、降水量、大气压强和能见度, 时间分辨率为 1h. $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 O_3 、 SO_2 和 NO_2 数据由中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台提供. BC 浓度使用 AE-33 进行观测, 时间分辨率为 5 min. 观测时间为 2017 年 7 月 5 日至 9 月 5 日.

1.2 黑碳仪介绍

BC 浓度使用 Aethalometer 仪 (美国 Magee Scientific 的 AE-33 型) 观测, 该仪器有 370、470、525、590、660、880 和 940 nm 共 7 个测量通道, 本研究使用波长 880 nm 处测得的 BC 浓度数据. AE-33 的工作原理是基于光的 Lambert-Beer 定律, 运用光学衰减测量方法, 通过测定石英滤膜上 BC 对光的衰减量来计算 BC 浓度. 该仪器的采样流量为 $5.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 配备 $\text{PM}_{2.5}$ 的进样切割头, 观测精度为 $1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 针对仪器的具体介绍参见文献^[32,33].

1.3 黑碳仪模型

黑碳仪模型是基于 Sandradewi 等^[49]的研究工作, 主要用于分析化石燃料和生物质燃烧两种主要排放源对 BC 的贡献大小以及相应 BC 的变化特征. 气溶胶对光的吸收特性与波长之间联系的幂律关系式可以表示为:

$$b_{\text{吸收系数}}(\lambda) = K\lambda^{-\text{AAE}} \quad (1)$$

式中, $b_{\text{吸收系数}}$ 为吸收系数; K 为常数; AAE 为吸收系数的 Ångström 指数, 它反映了气溶胶颗粒物的形状大小, 化学成分以及混合状态.

可由以下公式来计算液体燃料源和固体燃料来源的 BC:

$$b_{\text{吸收系数}} = b_{\text{吸收系数}}(\text{BC}_{\text{液体燃料}}) + b_{\text{吸收系数}}(\text{BC}_{\text{固体燃料}}) \quad (2)$$

$$\frac{b_{\text{吸收系数}}(370 \text{ nm})_{\text{液体燃料}}}{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{液体燃料}}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-\text{AAE}_{\text{液体燃料}}} \quad (3)$$

$$\frac{b_{\text{吸收系数}}(370 \text{ nm})_{\text{固体燃料}}}{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{固体燃料}}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-\text{AAE}_{\text{固体燃料}}} \quad (4)$$

$$\text{BC}_{\text{源}} = \frac{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{源}}}{\text{MAC}(880 \text{ nm})} \quad (5)$$

$$C = \frac{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})_{\text{液体燃料}}}{b_{\text{吸收系数}}(880 \text{ nm})} = \frac{\text{BC}_{\text{液体燃料}}}{\text{BC}} \quad (6)$$

式中, $\text{AAE}_{\text{液体燃料}}$ 和 $\text{AAE}_{\text{固体燃料}}$ 分别为液体燃料和固体燃料产生的 BC 的光学吸收 Ångström 指数; 这里 $\text{BC}_{\text{源}}$ 为不同源的 BC, 包括液体燃料源和固体燃料源; C 为液体燃料源对 BC 贡献率.

为了确定理塘液体和固体燃料不同的 AAE 值, 本文讨论了 AAE 和 C 的线性拟合关系. 由图 1 可知全年 C 和 AAE 的小时值显示了明显的负相关关系, 相关系数 R 为 -0.99 . 经计算可得 $\text{AAE} = 1.99(C =$

0) 和 $AAE = 1.07$ ($C = 1.0$). 因此, 本研究使用 $AAE_{\text{液态燃料}} = 1.07$ 和 $AAE_{\text{固态燃料}} = 1.99$ 展开研究.

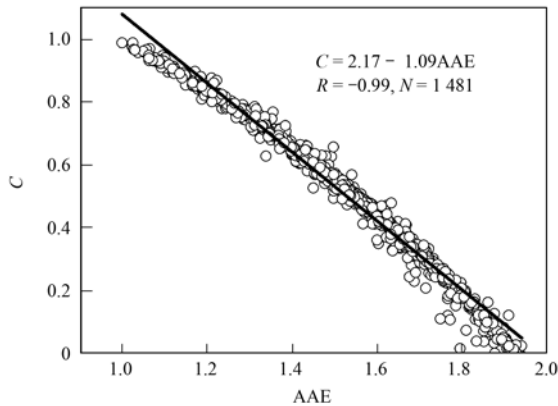


图1 观测期间 AAE 和 C 相关性

Fig. 1 Relationship between C and AAE values during the observation period

1.4 HYSPLIT 后向轨迹模式

本文所采用的后向轨迹模式是由美国国家海洋及大气管理局 (NOAA) 开发的轨迹计算模式 HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). 该模式目前已在大气污染物输送研究中得到了广泛的应用^[50]. 利用 HYSPLIT 模式计算了观测期间逐小时距地 500 m 高度的 48 h 的后向和前向轨迹, 用来计算潜在来源和影响范围. 模式采用的气象场为美国国家环境预报中心 (NECP) 的再分析资料, 水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$.

1.5 潜在源区 (PSCF) 分析法

Ashbaugh 等^[51] 在 1985 年发展了潜在源区贡献函数 (PSCF), 目前已经在多个领域得到广泛应用^[33,34,52~54]. PSCF 函数是基于空间网格进行计算, 定义为: 通过研究区内某一网格 ij 的污染气流轨迹 (当要素值超过设定的污染阈值时的轨迹) 端点数 m_{ij} , 经过该网格的所有气流轨迹端点数 n_{ij} 的比值:

$$PSCF_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (7)$$

因为 PSCF 是一种条件概率函数, 当各网格内气流滞留时间较短时 (n_{ij} 值较小), PSCF 值的不确定性就会较大. 因此, 需要引入经验权重函数 $[W(n_{ij})]$ 对其进行区间化赋权和降误差处理^[53,54], 权重函数 $W(n_{ij})$ 定义为:

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.0, & 120 < n_{ij} \\ 0.8, & 40 < n_{ij} \leq 120 \\ 0.4, & 20 < n_{ij} \leq 40 \\ 0.2, & n_{ij} \leq 20 \end{cases} \quad (8)$$

进而, 可以对 PSCF 进行加权计算:

$$WPSCF_{ij} = (m_{ij}/n_{ij}) \times W(n_{ij}) \quad (9)$$

1.6 浓度权重轨迹 (CWT) 分析法

PSCF 只能反映当前网格中污染轨迹数所占的比例, 无法体现出污染轨迹对目标网格的污染浓度贡献. CWT 是一种网格化识别源区的方法^[55] (其网格粒度取与 PSCF 相同), 通过计算源区格网 ij 的平均权重浓度 c_{ij} 来分析其对目标网格的污染贡献:

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^M c_k \tau_{ijk}}{\sum_{k=1}^M \tau_{ijk}} \quad (10)$$

式中, c_{ij} 为网格 ij 上的平均权重浓度, k 为气团轨迹, M 为气团轨迹总数, c_k 为轨迹 k 经过网格 ij 时对应的要素值, τ_{ijk} 为轨迹 k 在网格 ij 停留的时间. 在 PSCF 分析法中所用的权重函数 W_{ij} 也适用于 CWT 分析法, 以减少 m_{ij} 值较小时所引起的不确定性:

$$WCWT_{ij} = c_{ij} \times W(n_{ij}) \quad (11)$$

1.7 AOD 和 MERRA-2 数据介绍

气溶胶光学厚度 (AOD) 数据由 NASA 的中分辨率成像分光光度计 (MODIS) 仪器观测获得, 本研究使用的是 NASA 提供的 3 级产品, 数据详细介绍参见文献^[56]. MERRA-2 产品包括从地表到 80 km 左右的 72 个垂直层, 涉及到多种预测和诊断领域数据集, 包括云、辐射、水文循环和臭氧, 这些数据集有助于对陆地和海洋的综合分析研究. MERRA-2 提供了 1980 年以来大气 BC 浓度的空间分布, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, 时间分辨率包含 1 h、3 h 和月份这 3 个尺度, 所有产品均可通过美国宇航局地球科学数据网站 (<https://earthdata.nasa.gov/>) 访问下载, 具体介绍参见文献^[57]. 本研究使用 MERRA-2 提供的地面 BC 浓度、BC 人为源数据和生物质燃烧源数据.

2 结果与讨论

2.1 观测整体概述

由表 1 可知观测期间理塘 ρ (BC) 为 $0.4 \sim 4699.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $816.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 5.96%, 可知 BC 浓度远远低于北京^[29]、南京^[32]、成都^[33] 和重庆^[58] 等城市. 由图 2 可知理塘由于地处青藏高原东南部边缘, 海拔较高, 因此卫星观测到的 AOD 和 BC 浓度均较低. 这也表明, 理塘气溶胶受到四川盆地和中东部地区的影响较小, 可以反映出青藏高原本地的污染特征.

值得注意的是, 理塘 ρ (BC_{液态燃料}) 和 ρ (BC_{固态燃料}) 的平均值分别为 $486.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $398.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, BC_{液态燃料} 的贡献率 (C) 仅为 0.51. 这与高原地区的能源结构有关. 由图 2 可知, BC 的人为源主要分布在理塘的东部, 最近的人为源高值中心为四

川盆地. 由于地形的影响,四川盆地的人为源污染物很难输送至高原地区,因此青藏高原 BC 主要来自局地排放. 生物质燃烧源的分布与人为源的分布类似,高原地区本身植被覆盖较少,因此生物质燃烧源较少.

表 1 观测期间大气污染物和气象要素汇总

Table 1 Summary of the atmospheric pollutants and meteorological elements during the observation period				
要素	最大值	最小值	平均值	标准偏差
$\rho(\text{BC})/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	4 699.8	0.4	816.4	733.5
$\rho(\text{BC}_{\text{液态燃料}})/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	3 376.3	3.5	486.1	409.0
$\rho(\text{BC}_{\text{固态燃料}})/\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	3 237.5	0.8	398.5	454.7
AAE	2.8	0.1	1.5	0.3
C	0.99	0.04	0.51	0.23
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	55	1	13.7	7.4
$\rho(\text{PM}_{10})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	132	1	28.6	17.5
$\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	156	39	92.5	24.5
$\rho(\text{NO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	53	1	15.5	8.9
$\rho(\text{SO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	67	1	15.9	3.7
$\rho(\text{CO})/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.85	0.1	0.4	0.1
$T/^\circ\text{C}$	21.7	1.7	11.7	3.7
RH/%	94	28	69.1	15.3
能见度/km	35	0.4	31.8	7.2
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	7.5	0.1	1.7	0.9

由表 1 可知理塘的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 较低, 平均值分别为 $13.7\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $28.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 为 47.9%, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的最大值为 $55\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 但是 $\rho(\text{PM}_{10})$ 的最大值可达到 $132\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该地区气溶胶粗粒子较多. 较低的 PM 表明该地区气溶胶消光作用较弱, 因此能见度较高, 平均为 31.8 km.

观测期间平均温度为 11.7°C , 最高温度仅为 21.7°C , $\rho(\text{O}_3)$ 较低, 为 $39\sim156\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为

$92.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 较低, 平均值分别为 $15.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.4\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 但是 $\rho(\text{SO}_2)$ 较高, 平均值为 $15.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于 NO_2 , 这也与中东部地区存在显著区别.

2.2 BC 浓度频率分布

由图 3(a) 可知, 理塘 $\rho(\text{BC})$ 主要分布在 $0\sim2\,000\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 可占总观测期间的 92.5%, 其中 $0\sim500\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内的频率最高, 为 43.4%. 在 BC 不同频率区间风速的差异较小, 多在 $1.7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右. $\rho(\text{BC})$ 在 $2\,000\sim2\,500\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间风速最大, 为 $2.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 $4\,500\sim5\,000\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间风速最小, 为 $1.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 由图 3(a) 可知整体来看, BC 浓度较大时, 风速较小, 水平扩散较弱. AAE 随着 $\rho(\text{BC})$ 的增加逐渐增大, 在 $3\,000\sim4\,000\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间达到最大值 1.77. 有研究表明, AAE 值约等于 1 时, 表明 BC 是由交通源 (液体燃料) 为主导; AAE 约等于 2 时, 表明 BC 主要来源于生物质燃烧^[59]. 这说明随着 $\rho(\text{BC})$ 的增加, 生物质燃烧过程对 BC 的贡献增加. 由图 3(b) 可知, 随着 BC 浓度的增加, C 逐渐降低, 表明 BC_{液态燃料} 的占比逐渐减少, 即交通源的贡献减小. 但是 $\rho(\text{BC})$ 较低时 ($0\sim1\,000\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$), BC_{液态燃料} 的占比较高, 在 C 均超过 0.50. 此外, AAE 的值越小, 则代表气溶胶粒子粒径越大^[29,60]. 这表明理塘地区 BC 浓度较高时气溶胶粒子粒径反而较小.

由图 3(c) 可发现在不同 BC 浓度区间 PM 浓度差异较小, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多在 $14\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{10})$ 多在 $26\sim31\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 随着 BC 浓度的增加, CO 浓度也呈现出增加趋势. CO 主要来自不完全燃烧过程^[29], 与

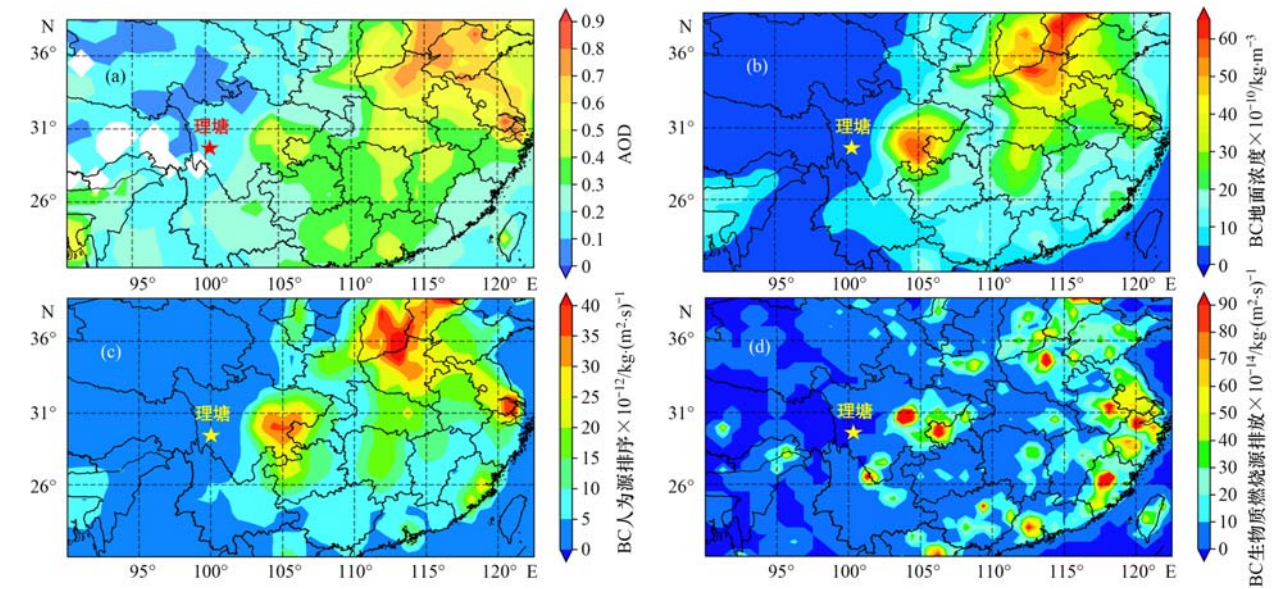


图 2 观测期间 AOD、地面 BC 和 BC 主要源的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of AOD, surface BC mass concentration, and main emission sources of BC during the observation period

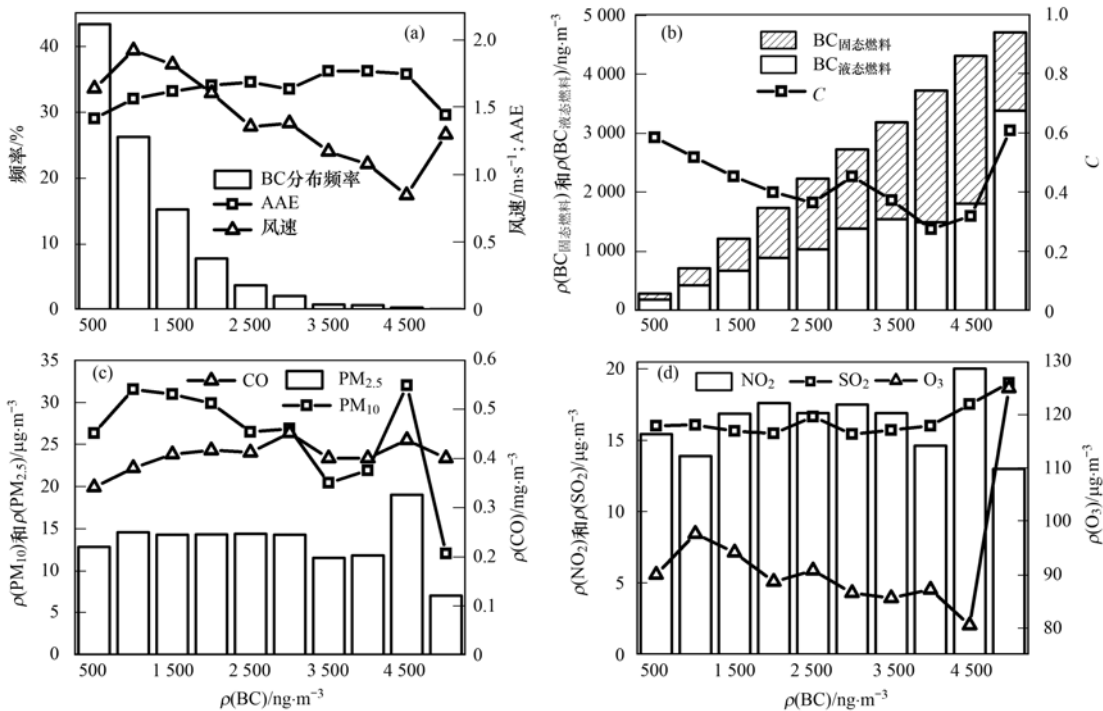


图 3 不同 BC 浓度下的频率分布及其污染物分布

Fig. 3 Percentage occurrences of BC and the corresponding variations in AAE, P, wind speed, and atmospheric pollutants

BC 具有较好的同源性,因此 BC 浓度增加时,CO 浓度也呈现增加趋势. 由图 3(d)可发现在不同 BC 浓度区间 NO_2 和 SO_2 浓度的变化较小,与 PM 类似. NO_2 主要来自交通源排放^[32], SO_2 多来自工业燃煤源等排放^[34]. 这反映了理塘地区不同 BC 浓度区间下交通源和燃煤源的贡献相对比较稳定. O_3 浓度随着 BC 浓度增加呈现下降趋势, O_3 多来自光化学过程生成, O_3 高值多出现在午后,理塘观测期间 BC 浓

度较高时多为清晨或者夜晚,因此 O_3 反而随 BC 浓度增加而降低.

2.3 黑碳气溶胶日变化特征

由图 4 可知 BC 的日变化为典型的双峰型分布,峰值分别出现在 08:00 和 20:00. NO_2 日变化呈现明显的单峰型分布,06:00 开始快速增加,09:00 达到峰值,与 BC 早高峰的时间基本一致. NO_2 在 14:00 达到最小值后浓度开始逐渐增加,但是观测

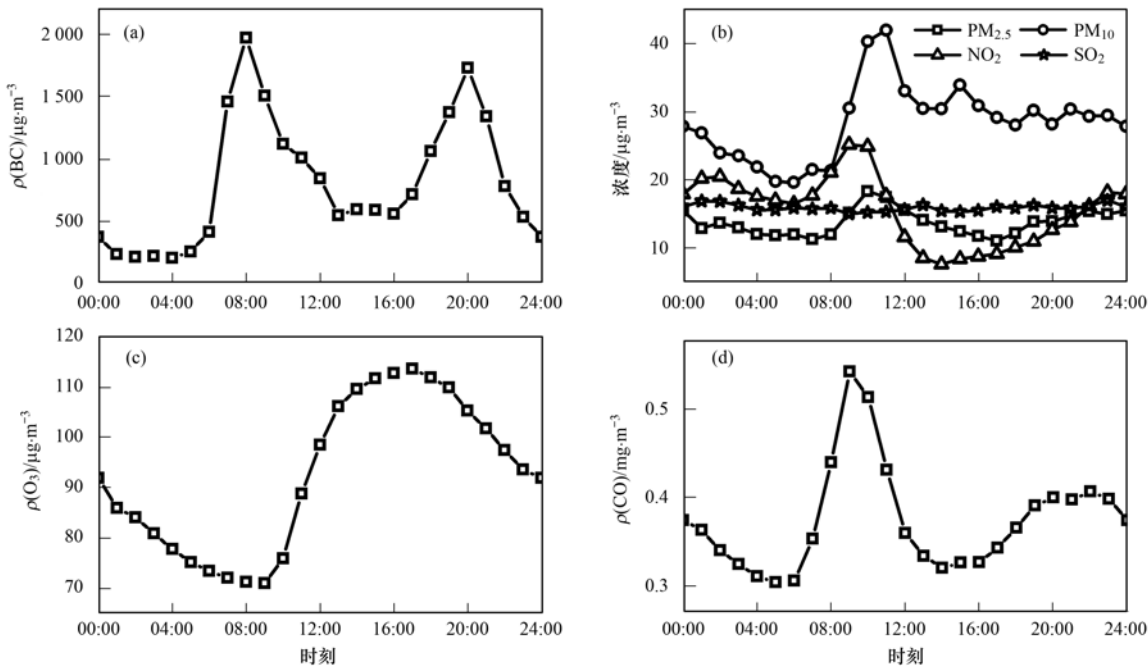


图 4 BC 和环保六要素日变化

Fig. 4 Diurnal variations in BC and atmospheric pollutants

不到晚高峰。SO₂ 则观测不到明显的日变化特征,这说明工业源对 BC 的贡献较小。CO 日变化也为双峰型分布,峰值位于 09:00 和 20:00~22:00,主要来自含碳物质的不完全燃烧过程,在观测期间主要来自烹饪源。这说明 BC 日变化的两个浓度峰值的原因不同,早高峰主要与交通源和含碳物质不完全燃烧有关,而在晚高峰期间则主要受到含碳物质不完全燃烧影响。

此外,由图 4 可发现 BC 的日变化与 PM 的日变化也不一致,PM_{2.5} 为单峰型分布,峰值出现在 10:00; PM₁₀ 为多峰型分布,早高峰出现在 11:00,在午后还出现几个比较弱的峰值。O₃ 日变化为单峰型分布,峰值位于 16:00,与温度的日变化类似。由图 5 可知理塘地区温度为单峰型分布,07:00 日出后温

度迅速增加,在 14:00~17:00 达到最大值,此后迅速降低。在午后,温度较高,光化学过程强烈,生成的 O₃ 达到峰值。RH 日变化与 *T* 相反,日出后,迅速降低,在 14:00~17:00 达到最小值,此后迅速增加。风速的日变化与温度类似,为明显的单峰型分布,在 16:00 达到峰值。由此可知,在早高峰时,温度较低,风速较弱,RH 较高,此时边界层高度较低,不利于地面污染物的扩散,因此 BC、PM、NO₂ 和 CO 均观测到非常明显的浓度峰值。而在晚高峰期间,风速较大,RH 开始逐渐增加,扩散条件开始转弱,但相比早晨仍然较强,因此 PM_{2.5} 和 NO₂ 浓度逐渐增减,但是并没有观测到明显的峰值。而由于烹饪等人为活动的影响,CO 和 BC 则观测到了比较明显的晚高峰。

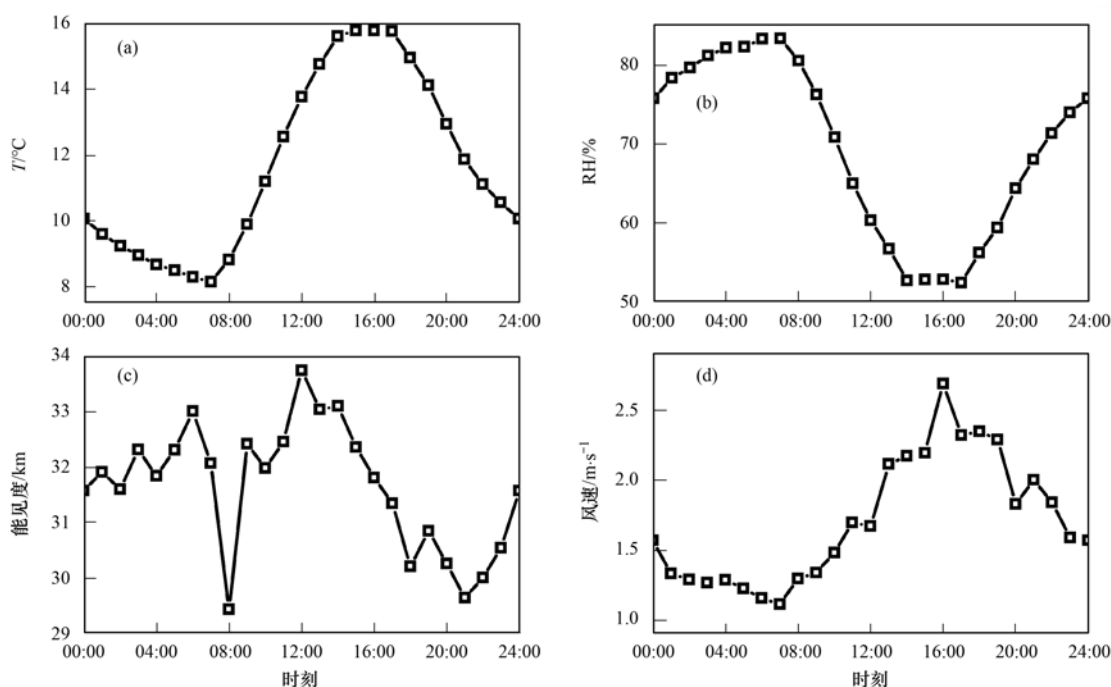


图 5 气象要素日变化

Fig. 5 Diurnal variations in the meteorological elements

由图 6(a)可发现 AAE 也呈现明显的双峰型日变化,峰值分别位于 07:00 和 20:00。AAE 的日变化较大,在夜间较低,在 01:00 达到最低值 1.25,而在白天较高,在 07:00 达到最大值 1.80。在夜间 RH 较高,风速较低,排放到大气中的 BC 颗粒物在大气中的停留时间较长,并且容易老化,因此粒径相对较大,AAE 的值较低。而在白天,一方面人为活动较多,直接排放的 BC 颗粒物较多,BC 颗粒物粒径较小。另一方面,白天温度较高,RH 较低,不利于 BC 颗粒物的老化,因此 BC 颗粒物多为新鲜状态,粒径较小。*C* 值的日变化幅度也非常大,在 00:00 时 *C* 值可达到 0.68,而在 07:00 则仅为 0.28。*C* 值在 BC 的早晚高峰期出现谷值,在中午和夜间达到峰值。这也

反映出理塘地区 BC 来源的复杂性。BC_{液体燃料} 和 BC_{固体燃料} 的日变化均为双峰型分布,与 BC 的日变化一致。

2.4 潜在源区及其影响范围

2.4.1 PM_{2.5} 和 BC 的潜在来源

由图 7(a)可知,理塘 PM_{2.5} 的 PSCF 潜在来源高值区主要分布在东北部的康定-雅安-西昌一带,主要是理塘的周边地区,PSCF 值的贡献超过 0.8。成都-南充-巴中一带人口密集区对理塘 PM_{2.5} 的 PSCF 贡献反而较低,多在 0.5 以下。此外,理塘西南部的缅甸克钦邦一带的 PSCF 贡献也较大,可达 0.4~0.7。BC 的 PSCF 潜在来源高值区分布与 PM_{2.5} 的分布存在较大差异[图 7(b)],BC 的潜在来源高值区

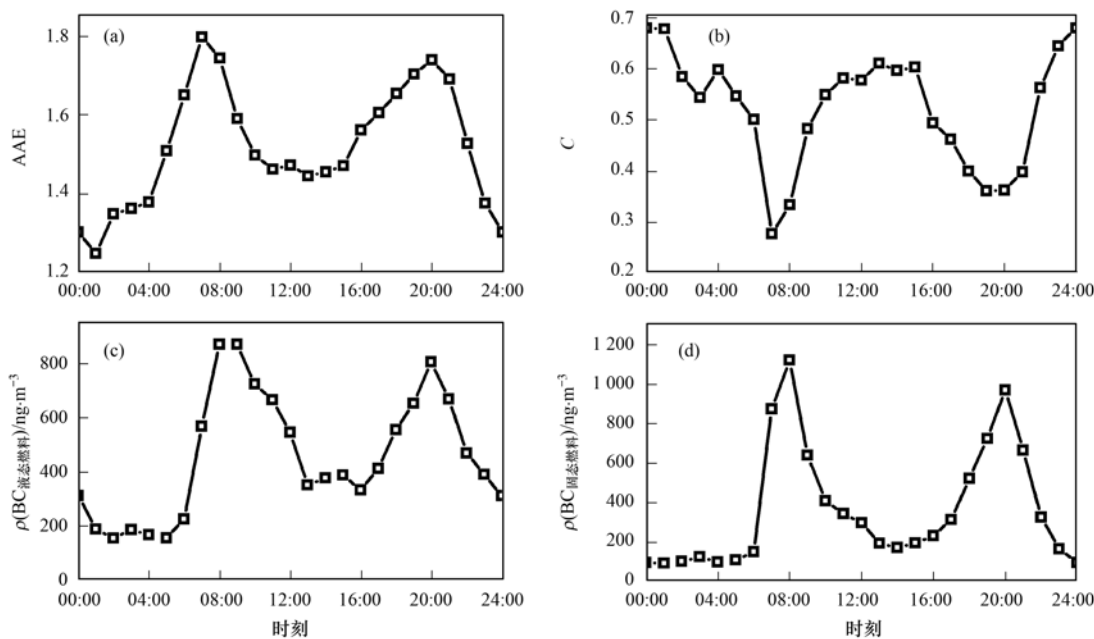


图 6 AAE、C、BC_{液体燃料}和 BC_{固态燃料} 日变化
Fig. 6 Diurnal variations in AAE, C, BC_{liquid}, and BC_{solid}

主要集中在西南部. 缅甸克钦邦东北部的 PSCF 值超过 0.9, 理塘周边地区德钦县-得荣县-乡城县-稻城县-雅江县-九龙县一带的 PSCF 值也超过 0.9. 此外, 成都-绵阳-南充一带的 PSCF 值也较高, 超过 0.7. 与 PM_{2.5} 的潜在源区相比, 理塘 BC 的潜在源区

高值区范围更广, 传输的距离更远.

由图 7(c) 可发现 PM_{2.5} 的 CWT 分布与 PSCF 的分布类似, 高值区主要分布在东部的康定-雅安-马尔康市一带, 权重浓度超过 18 μg·m⁻³. 西部的巴塘县-芒康县-察隅县一带的 CWT 贡献也较高, 多在 12

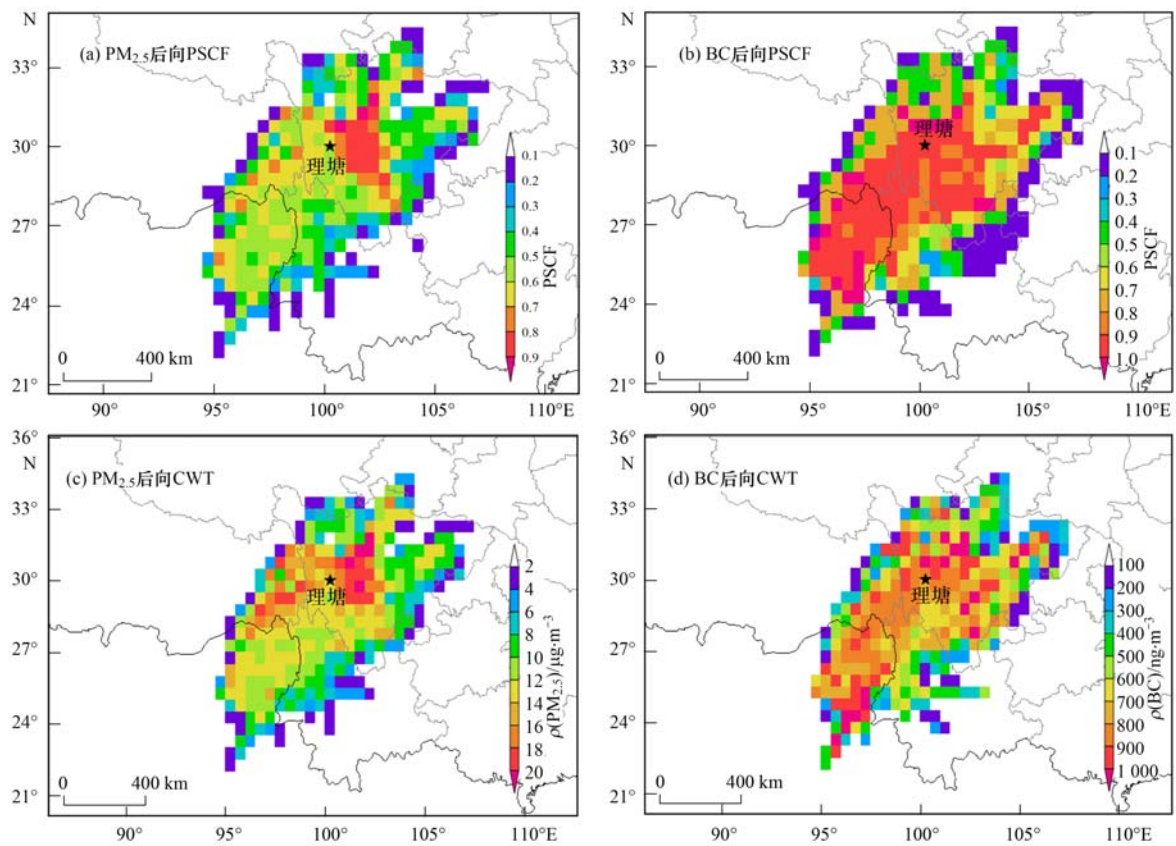


图 7 PM_{2.5}和 BC 后向 48h PSCF 和 CWT

Fig. 7 Potential source region of PM_{2.5} and BC identified by PSCF and CWT

$\sim 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 缅甸克钦邦东北一带的 CWT 权重浓度多在 $10 \sim 14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

由图 7(d) 可发现, BC 的 CWT 分布的高值区在其西北部的马尔康市-金川县-道孚县-丹巴县一带较高, 权重浓度超过 $900 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 在缅甸克钦邦的东北部的密支那-八莫-杰沙一带也存在 CWT 的高值中心, 权重浓度超过 $900 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 此外, 在理塘周边的迪庆藏族自治州-甘孜藏族自治州-雅安-成都-绵阳-巴中一带 CWT 的值也较高, 权重浓度多超过 $600 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.4.2 $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的影响区域

由图 8(a) 可知理塘 $\text{PM}_{2.5}$ 的前向 PSCF 高值区主要集中在西南部的芒康县-德钦县-得荣县-乡城县-稻城县一带, PSCF 的值均超过 0.7. 在其东南部

的成都-雅安-凉山彝族自治州一带 PSCF 的值也较高, 多为 0.6 ~ 0.8. 而在其北部可传输到兰州-西宁一带, PSCF 的值多在 0.6 以下. 此外, 可发现理塘 $\text{PM}_{2.5}$ 可经过远距离输送影响到山东半岛, 但是这一路径的 PSCF 值较低, 多低于 0.2. 由图 8(b) 可发现理塘 BC 的前向 PSCF 高值范围较大, 以理塘为中心向周边辐射, 主要集中在芒康县-德钦县-迪庆藏族自治州-梁山彝族自治州-雅安-乐山-成都-阿坝藏族自治州-甘南藏族自治州一带, PSCF 值多超过 0.9. BC 的影响范围较大, 往北可影响到西宁和兰州, PSCF 值超过 0.6; 往南可影响到六盘水一带, PSCF 的值超过 0.5. BC 也存在远距离输送, 影响范围更大, 沿途经过西安-郑州一带抵达山东半岛, 但是 PSCF 值较低, 多低于 0.2.

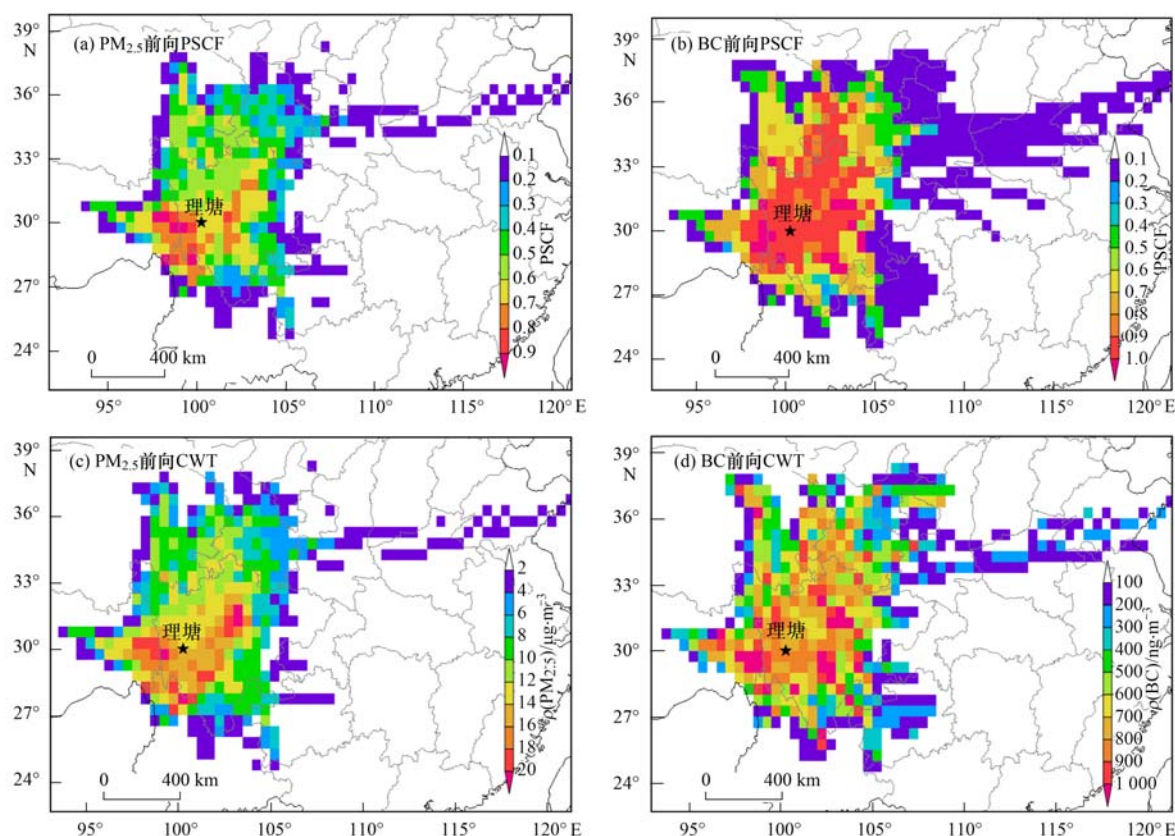


图 8 $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 前向 48 h PSCF 和 CWT

Fig. 8 Potential affecting areas of $\text{PM}_{2.5}$ and BC identified by PSCF and CWT

由图 8(c) 可知 $\text{PM}_{2.5}$ 的前向 CWT 分布与 PSCF 分布类似, 高值区位于芒康县-德钦县-得荣县-乡城县-稻城县-成都-雅安-凉山彝族自治州一带, 权重浓度超过 $14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其北部可输送至阿坝藏族羌族自治州, 权重浓度为 $8 \sim 12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 再往北可输送到西宁-兰州-天水一带, 权重浓度多低于 $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 远距离输送至山东半岛的传输路径的权重浓度均低于 $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 由图 8(d) 可发现 BC 的前向 CWT 高值区范围与 PSCF 类似, 也是以理塘

为中心向四周发散, 主要分布在芒康县-德钦县-迪庆藏族自治州-梁山彝族自治州-雅安-乐山-成都-阿坝藏族自治州-甘南藏族自治州一带, 权重浓度超过 $600 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 但是理塘周边存在不连续的 CWT 中心区域, 如在康芒县、西昌-喜德县和成都一带权重浓度可超过 $1000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 由图 8 可发现理塘地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的影响范围主要集中在我国境内, 向东北部传输, 但是高值中心主要集中在理塘周边地区.

3 结论

(1) 理塘 $\rho(\text{BC})$ 为 $0.4 \sim 4\,699.8 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $816.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分数为 5.96%。理塘 $\rho(\text{BC}_{\text{液态燃料}})$ 和 $\rho(\text{BC}_{\text{固态燃料}})$ 的平均浓度分别为 $486.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $398.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{BC}_{\text{液态燃料}})$ 的贡献率 C 为 0.51。 $\rho(\text{BC})$ 主要分布在 $0 \sim 2000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 可占总观测期间的 92.5%, 其中 $0 \sim 500 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内的频率最高, 为 43.4%。

(2) BC 、 $\text{BC}_{\text{液态燃料}}$ 和 $\text{BC}_{\text{固态燃料}}$ 的日变化为双峰型分布, 峰值分别出现在 08:00 和 20:00, 早高峰主要与交通源和含碳物质不完全燃烧有关, 而在晚高峰期间则主要受到含碳物质不完全燃烧影响。 NO_2 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 日变化为单峰型, CO 日变化也为双峰型分布, PM_{10} 为多峰型分布, SO_2 则观测不到明显的日变化特征。

(3) $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的潜在来源不同。 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 高值区主要分布在东北部的康定-雅安-西昌一带, CWT 权重浓度超过 $18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; BC 的 PSCF 高值区主要集中在理塘的西南部, CWT 权重浓度超过 $900 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。境外输入对理塘 $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的浓度影响较大。

(4) $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的影响范围不同。 $\text{PM}_{2.5}$ 的前向 PSCF 高值区主要集中在西南部的芒康县-德钦县-得荣县-乡城县-稻城县一带, CWT 权重浓度超过 $14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 BC 的前向 PSCF 高值范围较大, 以理塘为中心向周边辐射, 主要集中在芒康县-德钦县-迪庆藏族自治州-梁山彝族自治州-雅安-乐山-成都-阿坝藏族自治州-甘南藏族自治州一带, CWT 权重浓度超过 $600 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 BC 的影响范围主要集中在我国境内, 向东北部传输, 但是高值中心主要集中在理塘周边地区。

参考文献:

- [1] Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6516-6527.
- [2] 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶的来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 9-17.
Xiao S H, Yu X N, Zhu B, *et al.* Source apportionment of black carbon aerosol in the north suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 9-17.
- [3] Cooke W F, Wilson J J N. A global black carbon aerosol model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D14): 19395-19409.
- [4] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. *Nature*, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [5] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [6] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D19), doi: 10.1029/2001JD001376.
- [7] Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: a comprehensive review [J]. *Sustainability*, 2010, **2**(1): 294-320.
- [8] Latha K M, Badarinath K V S. Correlation between black carbon aerosols, carbon monoxide and tropospheric ozone over a tropical urban site[J]. *Atmospheric Research*, 2004, **71**(4): 265-274.
- [9] Huang X, Wang Z L, Ding A J. Impact of aerosol-PBL interaction on haze pollution: multiyear observational evidences in North China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(16): 8596-8603.
- [10] Slater J, Coe H, McFiggans G, *et al.* The effect of BC on aerosol-boundary layer feedback: potential implications for urban pollution episodes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(4): 2937-2953.
- [11] Li Y, Henze D K, Jack D, *et al.* Assessing public health burden associated with exposure to ambient black carbon in the United States[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **539**: 515-525.
- [12] 欧奕含, 张小玲, 张莹, 等. 西安 BC 、 $\text{PM}_{2.5}$ 与气温协同对心脑血管疾病死亡的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(9): 4415-4425.
Ou Y H, Zhang X L, Zhang Y, *et al.* Influence of BC, $\text{PM}_{2.5}$, temperature and their synergy on mortality of cardiovascular diseases in Xi'an[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 4415-4425.
- [13] Meena G S, Mukherjee S, Buchunde P, *et al.* Seasonal variability and source apportionment of black carbon over a rural high-altitude and an urban site in western India[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(2): 32-45.
- [14] 王新莹, 李颖芳, 桂柯, 等. 我国西南地区吸收性气溶胶时空分布[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3096-3105.
Wang X Y, Li Y F, Gui K, *et al.* Spatial and temporal distribution of absorbing aerosol in Southwest China[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3096-3105.
- [15] 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 等. 2008~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1215-1222.
Wang H Q, He Q S, Chen Y H, *et al.* Analysis of characteristics of black carbon concentration in Shanghai from 2008 to 2012[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1215-1222.
- [16] Luoma K, Niemi J V, Aurela M, *et al.* Spatiotemporal variation and trends in equivalent black carbon in the Helsinki metropolitan area in Finland[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(2): 1173-1189.
- [17] Feng J L, Zhong M, Xu B H, *et al.* Concentrations, seasonal and diurnal variations of black carbon in $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Research*, 2014, **147-148**: 1-9.
- [18] Rattigan O V, Civerolo K, Doraiswamy P, *et al.* Long term black carbon measurements at two urban locations in New York [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(4): 1181-1196.
- [19] Laborde M, Crippa M, Tritscher T, *et al.* Black carbon physical properties and mixing state in the European megacity Paris[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5831-5856.
- [20] Liu D T, Joshi R, Wang J F, *et al.* Contrasting physical properties of black carbon in urban Beijing between winter and summer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**

- (10): 6749-6769.
- [21] 张泽宇, 王甜甜, 范萌, 等. 北京地区基于化学组分的夏季气溶胶吸湿特性[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(6): 2353-2360.
- Zhang Z Y, Wang T T, Fan M, *et al.* An experimental study on aerosol hygroscopic properties during the summer in Beijing based on chemical composition [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(6): 2353-2360.
- [22] 吕欢, 安俊琳, 苏筱倩, 等. 南京北郊地区黑碳气溶胶对光解系数的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1421-1428.
- Lü H, An J L, Su X Q, *et al.* Study on the influence of black carbon aerosol on photolysis coefficient in northern suburb of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1421-1428.
- [23] 蔡园青, 徐学哲, 周家成, 等. 黑碳仪测量气溶胶吸收系数的校正算法和影响因素研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(9): 4026-4035.
- Cai Y Q, Xu X Z, Zhou J C, *et al.* Research progress of correction algorithm and influence factors for aerosol absorption coefficient from aethalometer measurement [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 4026-4035.
- [24] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **370**(1): 190-206.
- [25] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle [J]. *Science*, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [26] Shen L J, Wang H L, Kong X C, *et al.* Characterization of black carbon aerosol at the summit of Mount Tai (1534 m) in central east China: Temporal variation, source appointment and transport [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118152.
- [27] 姚青, 郝天依, 蔡子颖, 等. 天津黑碳气溶胶潜在来源分析与健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(12): 5221-5228.
- Yao Q, Hao T Y, Cai Z Y, *et al.* Potential source analysis and health risk assessment of black carbon aerosol in Tianjin city [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5221-5228.
- [28] Chen B, Andersson A, Lee M, *et al.* Source forensics of black carbon aerosols from China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9102-9108.
- [29] 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 等. 北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5633-5643.
- Cao Y, An X X, Liu B X, *et al.* Characteristics and main influencing factors of black carbon aerosol in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5633-5643.
- [30] Wang Q Y, Li L, Zhou J M, *et al.* Measurement report: source and mixing state of black carbon aerosol in the North China Plain; implications for radiative effect [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(23): 15427-15442.
- [31] Zheng H, Kong S F, Zheng M M, *et al.* A 5.5-year observations of black carbon aerosol at a megacity in Central China: levels, sources, and variation trends [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **232**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117581.
- [32] 杨晓旻, 施双双, 张晨, 等. 南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 620-629.
- Yang X M, Shi S S, Zhang C, *et al.* Temporal evolution and main influencing factors of black carbon aerosol in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 620-629.
- [33] 王璐, 袁亮, 张小玲, 等. 成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1561-1572.
- Wang L, Yuan L, Zhang X L, *et al.* Characteristics and source apportionment of black carbon in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1561-1572.
- [34] 张玲, 孔少飞, 郑煌, 等. 华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2363-2372.
- Zhang L, Kong S F, Zheng H, *et al.* Concentrations and sources of black carbon aerosols in rural areas of Southern North China Plain [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2363-2372.
- [35] 孙嘉胤, 吴晟, 吴兑, 等. 广州城区黑碳气溶胶吸光增强特性研究[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(10): 4177-4189.
- Sun J Y, Wu C, Wu D, *et al.* The light absorption enhancement characteristics of black carbon aerosols in urban Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4177-4189.
- [36] 吉振明. 青藏高原黑碳气溶胶外源传输及气候效应模拟研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, **37**(4): 465-475.
- Ji Z M. Advances and prospects of research on simulating transboundary black carbon and their climatic effects over the Tibetan Plateau [J]. *Progress in Geography*, 2018, **37**(4): 465-475.
- [37] Li F, Wan X, Wang H J, *et al.* Arctic sea-ice loss intensifies aerosol transport to the Tibetan Plateau [J]. *Nature Climate Change*, 2020, **10**(11): 1037-1044.
- [38] Pani S K, Ou-Yang C F, Wang S H, *et al.* Relationship between long-range transported atmospheric black carbon and carbon monoxide at a high-altitude background station in East Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **210**: 86-99.
- [39] Dutkiewicz V A, Alvi S, Ghauri B M, *et al.* Black carbon aerosols in urban air in South Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(10): 1737-1744.
- [40] Li X F, Kang S C, Sprenger M, *et al.* Black carbon and mineral dust on two glaciers on the central Tibetan Plateau: sources and implications [J]. *Journal of Glaciology*, 2020, **66**(256): 248-258.
- [41] Wang X, Xu B Q, Ming J. An overview of the studies on black carbon and mineral dust deposition in snow and ice cores in East Asia [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, **28**(3): 354-370.
- [42] Xie F, Lin Y C, Ren L, *et al.* Decrease of atmospheric black carbon and CO₂ concentrations due to COVID-19 lockdown at the Mt. Waliguan WMO/GAW baseline station in China [J]. *Environmental Research*, 2022, **211**, doi: 10.1016/j.envres.2022.112984.
- [43] Dai M M, Zhu B, Fang C W, *et al.* Long-term variation and source apportionment of black carbon at Mt. Waliguan, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(21), doi: 10.1029/2021JD035273.
- [44] 汤洁, 温玉璞, 周凌晔, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. 应用气象学报, 1999, **10**(2): 160-170.
- Tang J, Wen Y P, Zhou L X, *et al.* Observational study of black carbon in clean air area of western China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, **10**(2): 160-170.
- [45] Ni M J, Huang J X, Lu S Y, *et al.* A review on black carbon emissions, worldwide and in China [J]. *Chemosphere*, 2014, **107**: 83-93.
- [46] He C L, Li Q B, Liou K N, *et al.* Black carbon radiative forcing over the Tibetan Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(22): 7806-7813.
- [47] Zhang X L, Rao R Z, Huang Y B, *et al.* Black carbon aerosols

- in urban central China[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, **150**: 3-11.
- [48] Wang Q Y, Schwarz J P, Cao J J, *et al.* Black carbon aerosol characterization in a remote area of Qinghai-Tibetan Plateau, western China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **479-480**: 151-158.
- [49] Sandradewi J, Prévôt A S H, Szidat S, *et al.* Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (9): 3316-3323.
- [50] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, *et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, **96**(12): 2059-2077.
- [51] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park[J]. *Atmospheric Environment*, 1985, **19** (8): 1263-1270.
- [52] Lucey D, Hadjiiski L, Hopke P K, *et al.* Identification of sources of pollutants in precipitation measured at the mid-Atlantic US coast using potential source contribution function (PSCF) [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (23): 3979-3986.
- [53] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [54] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35** (21): 4214-4226.
- [55] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 545-562.
- [56] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(11): 2989-3034.
- [57] 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 等. 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2668-2678.
- Cao S S, Duan Y S, Gao C C, *et al.* Changes and potential sources of atmospheric black carbon concentration in Shanghai over the past 40 years based on MERRA-2 reanalysis data[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2668-2678.
- [58] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 重庆市黑碳气溶胶特征及影响因素初探[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 812-818.
- Zhang C, Zhou Z E, Zhai C Z, *et al.* Characteristics and influencing factors of black carbon aerosol in Chongqing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 812-818.
- [59] 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.
- [60] Eck T F, Holben B N, Reid J S, *et al.* Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D24): 31333-31349.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwlung Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)