

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.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征

赵楠¹, 曹梵诗¹, 田晴¹, 陈勇航^{1,2}, 刘琼^{1*}, 黄艺伟¹, 王羽佳¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用 2008~2017 年 OMI/Aura OMAERUV L2 气溶胶数据集, 研究了近 10 年长三角地区吸收性气溶胶的时空分布特征。结果表明: ①在时间分布上, 长三角地区气溶胶光学厚度 (AOD) 与吸收性气溶胶光学厚度 (AAOD) 的年际变化趋势一致, 均为先升后降, 于 2011 年达最高值, 分别为 0.702 和 0.056。月际变化显示 AAOD 高值多发生在 1、3 和 6 月, 11 月到次年 1 月明显增加。②在空间分布上, 长三角地区 AAOD 呈北高南低分布, AOD 与 AAOD 分布相似, AAOD > 0.05 的高值区主要集中在安徽北部、江苏北部以及南京、杭州和金华等地区。AAOD 与 AOD 季节空间分布均为春冬高, 秋季较低, 但二者不同的是, 夏季 AOD 很大, AAOD 却很小。长三角地区 AAOD 和 AOD 的年均空间分布与黑碳贡献量一致。

关键词: 吸收性气溶胶; 臭氧监测仪 (OMI); 吸收性气溶胶光学厚度 (AAOD); 时空分布; 黑碳; 长三角地区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-3898-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811211

Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta

ZHAO Nan¹, CAO Fan-shi¹, TIAN Qing¹, CHEN Yong-hang^{1,2}, LIU Qiong^{1*}, HUANG Yi-wei¹, WANG Yu-jia¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on the ozone monitoring instrument (OMI)/Aura L2 OMAERUV data from 2008 to 2017, the spatial-temporal distribution of absorptive aerosols during the past 10 years were studied. The results are as follows. ① In the temporal distribution, the inter-annual variation of absorptive aerosol optical depth (AAOD) first increased and then decreased, reaching the highest value of 0.056 in 2011; this is consistent with the aerosol optical depth (AOD) of 0.702 in the Yangtze River Delta. The inter-monthly variation shows that the high value of AAOD appeared mostly in January, March, and June and increased significantly from November to January. ② In the spatial distribution, the AAOD was higher in the north than in the south in the Yangtze River Delta, and the AOD was similar to the AAOD. High values of AAOD above 0.05 were concentrated mainly in northern Anhui and Jiangsu provinces and in Nanjing, Hangzhou, and Jinhua. The seasonal spatial distribution of AAOD and AOD was higher in spring and winter and lower in autumn, although the AOD was very high and the AAOD was low in summer. The contribution of black carbon in the Yangtze River Delta was consistent with the annual spatial distribution of the AAOD and AOD.

Key words: absorptive aerosol; ozone monitoring instrument (OMI); absorptive aerosol optical depth (AAOD); spatial-temporal distribution; black carbon; Yangtze River Delta

长三角地区是我国经济发达、人口密集的超大城市群, 同时也是复合型大气污染最严重的地区之一^[1]。近年来, 虽然该地区大气气溶胶污染有所好转, 但以碳质气溶胶为主的吸收性气溶胶区域性大气污染问题仍十分严峻^[2~4]。吸收性气溶胶主要包括来自化石燃料燃烧和生物质燃烧的黑碳、有机碳气溶胶^[5, 6]和来自沙尘天气的起沙、输送过程中产生的沙尘气溶胶^[7]。由于吸收性气溶胶对太阳辐射有较强的吸收能力, 可以加热大气、改变大气稳定度、蒸发云滴、减少云量并间接影响气候^[8, 9], 是评估和预测全球气候变化最大的不确定因素之一^[10]。因此, 研究长三角地区吸收性气溶胶的时空分布和变化特征是十分必要的。

由于气溶胶来源广泛且时空变化显著, 常规手段很难获得大范围的监测信息, 因此, 目前国内外学者主要通过卫星遥感研究大气气溶胶的性质、组成及时空分布^[11~21]。对吸收性气溶胶的研究主要是基于气溶胶指数, 如王爽等^[8]利用 OMI (ozone

monitoring instrument, OMI) 数据集中气溶胶指数 (aerosol index, AI) 研究天水市吸收性气溶胶, 结果表明 OMI 监测的气溶胶受下垫面影响较小, 对吸收性气溶胶更敏感。张芝娟等^[22]利用 OMI 资料对 APEC 会议前后京津冀地区吸收性气溶胶的时空变化进行研究, 发现控制吸收性气溶胶的排放是减少雾-霾的有效措施。王宏斌等^[23]使用 OMI 数据集中吸收性气溶胶指数 (absorptive aerosol index, AAI) 来识别吸收性气溶胶, 其呈现的季节变化与燃煤取暖和沙尘事件发生时间一致。

综上所述, 目前尚缺乏长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征的研究。因此, 本文基于 OMI 反演得到的吸收性气溶胶光学厚度 (absorptive aerosol

收稿日期: 2018-11-26; 修订日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (91644211); 中央高校基本科研业务费专项 (2232019D3-27)

作者简介: 赵楠 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气遥感, E-mail: 18621031090@163.com

* 通信作者, E-mail: liuqiong@dhxu.edu.cn

optical depth, AAOD)、气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 和单次散射反照率 (single scattering albedo, SSA) 研究长三角地区吸收性气溶胶的时空变化特征及其影响因素, 以期为区域环境污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

卫星遥感因其较高的空间覆盖率被广泛使用。虽然 MODIS 卫星遥感的数据精度一直在不断提高, 但李龙等^[24]的研究发现华东地区 MODIS AOD 数据缺失较严重, 不同版本的 AOD 反演均存在一定缺陷, 而 OMI 获得的气溶胶资料更为完整, 不仅提供 AOD 和 SSA, 还提供了 AAOD 和气溶胶类型等参数, 其重要功能之一是获取局地吸收性气溶胶的分布情况。康丽泰^[25]研究发现 OMAERUV 数据集在东亚地区的准确性较高。因此, 本文使用 Aura 卫星上搭载的臭氧监测仪 OMI 反演得到的 OMAERUV L2 气溶胶数据集^[26, 27]。本文使用近紫外算法在 388 nm 波段下反演的 AOD、AAOD 和 SSA, 分析长三角地区吸收性气溶胶的时空分布特征, 三者之间计算关系如下^[28]:

$$AAOD = (1 - SSA) \times AOD$$

近紫外算法优势之一是陆地表面对其计算结果影响很小, 因而可以反演复杂地表上的气溶胶性质; 二是可利用气溶胶吸收性和气溶胶层下分子散射间的强相互作用来估测大气气溶胶的吸收能力。据研究 OMAERUV 数据集中 AAOD 均方根误差约为 0.01。选择 2008 年 1 月 1 日到 2017 年 12 月 31 日最近 10a 的 OMI/Aura OMAERUV L2 气溶胶数据集, 存储格式为 HDF-EOS5, 空间分辨率为 12 km × 24 km, 研究范围为: 经度 113.5° ~ 124.5°E, 纬度 25° ~ 37°N, 包含安徽省、江苏省、浙江省和上海市 (如图 1)。为方便描述长三角地区的空间特征, 将长三角地区分为南部和北部, 长三角北部地区包括: 江苏省、上海市以及安徽省部分地区, 主要以平原为主, 具有工业发达、城市化进程快等特点。长三角南部地区包括: 浙江省以及安徽省部分地区, 多为丘陵和山地, 历年气溶胶光学厚度较低。文中季节采用气象季节: 3 ~ 5 月为春季, 6 ~ 8 月为夏季, 9 ~ 11 月为秋季, 12 月 ~ 次年 2 月为冬季。

2 结果与讨论

2.1 时间分布

吸收性气溶胶光学厚度 (AAOD) 表示由气溶胶的吸收而造成太阳辐射的衰减, 是研究吸收性气溶

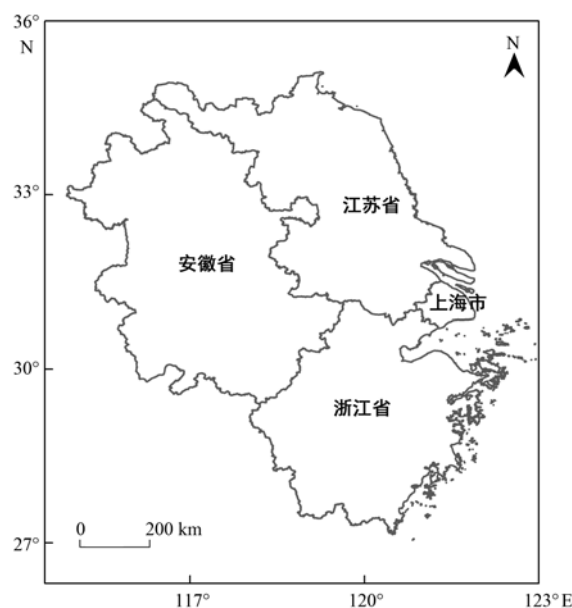


图 1 长三角地区研究区域

Fig. 1 Study area map of the Yangtze River Delta

胶时空分布的关键参数。AAOD 与吸收性气溶胶含量呈正相关关系, AAOD 越大, 则吸收性气溶胶含量越高。为更清晰地探究 2008 ~ 2017 年 AAOD 年际变化规律, 故将 AAOD 的数值扩大 10 倍作图显示 AAOD 曲线整体趋势为先升后降 (图 2), 2011 年达最大值 0.056, 之后逐年降低, 2016 年略有升高, 2017 年达 10 年最小值 0.042。

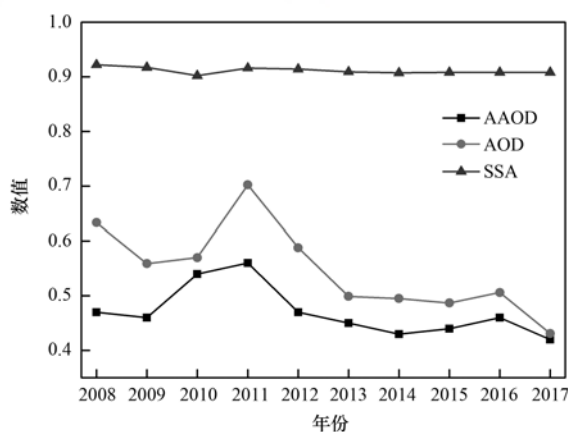


图 2 2008 ~ 2017 年长三角地区 AOD、SSA 和 AAOD 的年际变化

Fig. 2 Annual changes in AOD, SSA, and AAOD in the Yangtze River Delta from 2008 to 2017

从月际变化来看, 2008 ~ 2017 年长三角地区 AAOD 的波动较大 (图 3), 高值多出现在 1、3 和 6 月, 其中峰值的最大值 (0.082) 和最小值 (0.059) 分别出现于 2010 年 3 月和 2016 年 2 月。3 月多为中国北方沙尘高发期, 沙尘气溶胶通过远距离输送作用使长三角地区的沙尘含量增加^[29], 沙尘气溶胶也是一种弱吸收性的气溶胶, 因此 3 月 AAOD 略

有变大. 2008~2014 年 6 月 AAOD 略有升高与江苏省夏收时期秸秆燃烧有关, 秸秆等生物质燃烧产物以黑碳为主, 黑碳的增加使 AAOD 增加. 加之受梅雨季节的影响, 气象扩散条件较差^[30], AAOD 会略有上升. 但从 2014 年开始, 每年 6 月的 AAOD 明显减小, 或与江苏省和安徽省陆续出台了秸秆综合利

用以及禁烧的政策有关, 使得秸秆燃烧得到有效控制. AAOD 在 8~10 月较低, 在 11 月以后急剧上升. 11 月到次年 1 月 AAOD 持续增加, 可能与燃煤活动的增加、逆温天气频繁出现有关^[31]. 2017 年 10~12 月出现一次异常增大, AAOD 急剧升高, 其原因有待进一步研究.

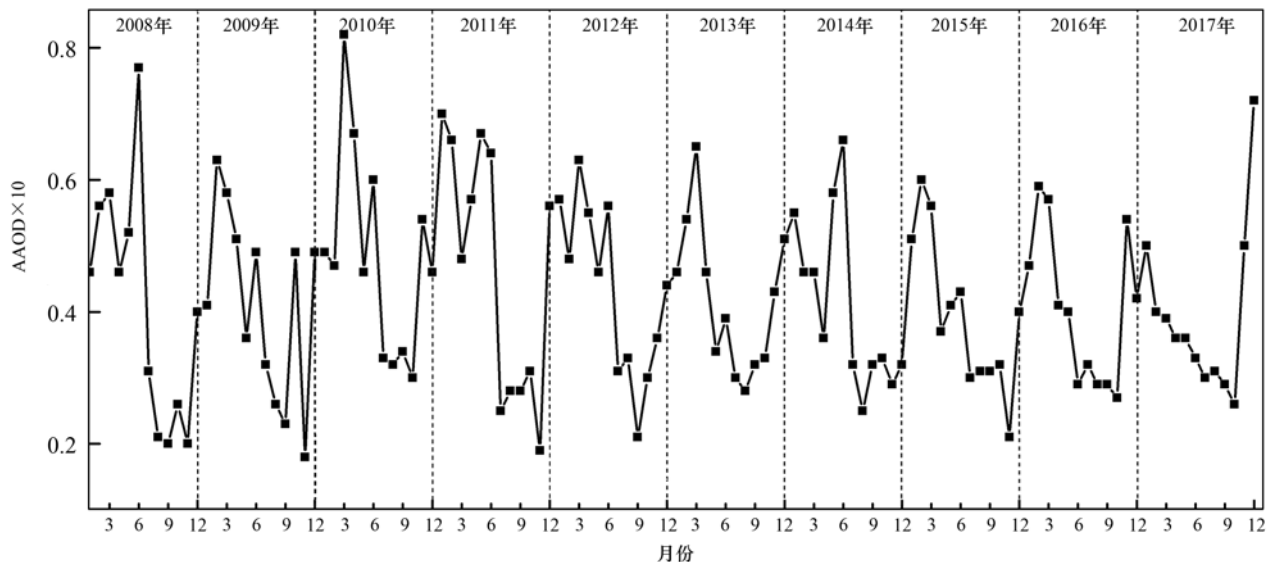


图 3 2008~2017 年长三角地区 AAOD 月际变化

Fig. 3 Monthly changes of AAOD in the Yangtze River Delta from 2008 to 2017

单次散射反照率(SSA)被定义为散射系数与消光系数的比值(散射系数和吸收系数)^[32], 理论值从 0(完全吸收)到 1(完全散射), 是衡量气溶胶吸收强弱的一个重要光学参数^[33]. SSA 越大, 表示散射性气溶胶含量越高, 气溶胶的散射能力越强, 则其吸收能力越弱. 2008~2017 年 SSA 年际变化在 0.902~0.922 范围内, 散射性气溶胶含量变化不明显(图 2).

2008~2017 年长三角地区 SSA 月际变化较为明显(图 4), 总体上看 SSA 略有下降, 10 年月际变

化范围在 0.881~0.959 内, 最大值从 2008 年 8 月的 0.945 降为 2017 年的 0.931, 下降了 1.48%; 最小值从 2008 年 12 月的 0.902 降为 2017 年 12 月的 0.888, 下降了 1.55%. SSA 高值多发生在 6 月, 此时温度高、辐照强, 光化学反应十分活跃, 大气中硫酸盐、硝酸盐等散射性气溶胶含量增多^[34, 35], SSA 增大. SSA 低值常发生在 12 月, 此时大气中硫酸盐气溶胶的浓度较低^[36], 而硫酸盐气溶胶是长三角地区主要的散射性气溶胶, 所以 12 月气溶胶的散射能力较弱. 另外, 12 月燃煤活

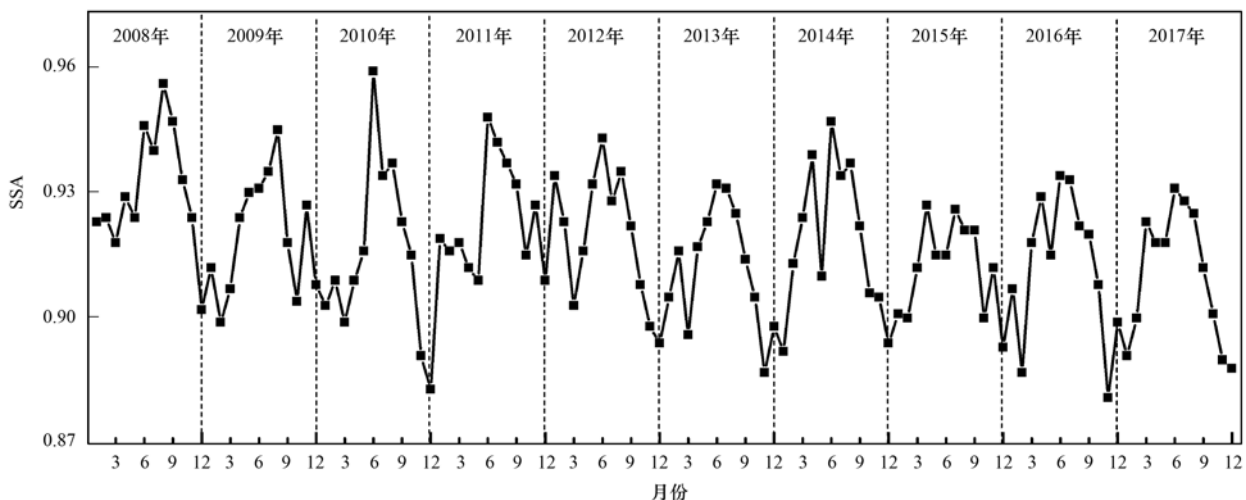


图 4 2008~2017 年长三角地区 SSA 月际变化

Fig. 4 Monthly changes of SSA in the Yangtze River Delta from 2008 to 2017

动的增加,使得以黑碳气溶胶为主的吸收性气溶胶含量增加,气溶胶的吸收能力变强. 综上,12月散射性气溶胶含量减少,吸收性气溶胶含量增加,从而 SSA 较小.

气溶胶光学厚度(AOD)是最常用的气溶胶参数之一,是表征大气气溶胶消光特性的一个重要参数,是推算气溶胶含量、研究气溶胶气候效应的关键因子^[37, 38]. 2008~2017年长三角地区 AOD 的年际变化趋势(图2)为先升后降,与 AAOD 变化趋势大致相同,2011年 AOD 达到最大为 0.702,2017年最小为 0.431.

2008~2017年长三角地区 AOD 月际变化显示(图5),2008年6月 AOD 为 1.61 达 10年中最大值,2015年11月 AOD 为 0.226 达 10年中最小值. 2008、2010~2012、2014这5年,年内 AOD 起伏波

动变化较大,近3年(2015~2017年)AOD 无异常增大. 6月 AOD 略有升高. 原因有二:一是由于 AAOD 的增加所导致的 AOD 增加;二是 AOD 与相对湿度呈正相关关系. 有研究表明,消光系数会随着相对湿度的增大而增大^[39],因此 AOD 在6月会略高于其他时期. 9~11月 AOD 较低,从11月到次年1月, AOD 呈持续增加的态势,姚玲玲^[40]认为 AOD 的升高与地方气象条件以及冬季北方的供暖有关,由于北方处于供暖期,化石燃料燃烧对南方的大气恶化有一定影响. 但更为重要的是长三角地区燃煤量的增加以及逆温频发而使 AAOD 增加,进而导致 AOD 增大. 个别时段在3月也出现了明显的高值,或与3月沙尘气溶胶远距离传输有关,长三角地区沙尘含量的增加影响了 AAOD 增加,进而使 AOD 增加.

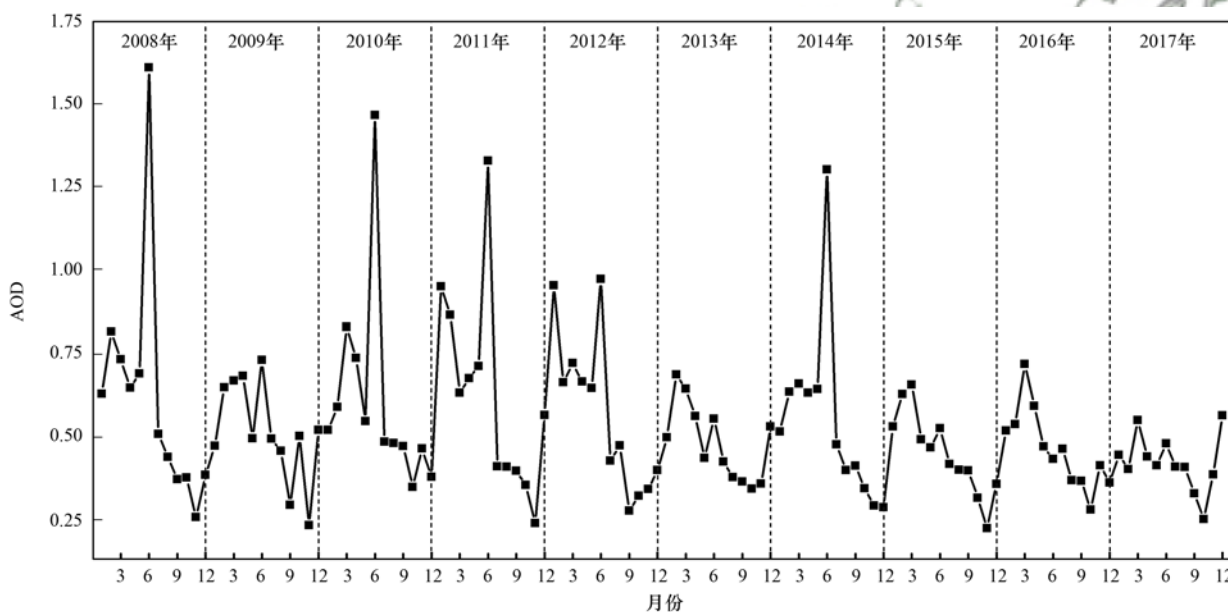


图5 2008~2017年长三角地区 AOD 月际变化

Fig. 5 Monthly changes of AOD in the Yangtze River Delta from 2008 to 2017

2.2 空间分布

2008~2017年长三角地区 AAOD 年均空间分布显示(图6), AAOD > 0.05 的高值区主要集中在徐州、苏州以及南京等长三角地区的北部,而南部 AAOD 较低,即长三角地区北部吸收性气溶胶含量高于南部. 2008~2017年长三角地区 AAOD 呈明显季节分布(图7),春冬两季高,夏秋两季低. 春季,长三角大部分地区 AAOD > 0.05,高值区分布范围较广,受沙尘远距离传输影响较大,冬季 AAOD 高值范围小于春季,主要分布在南京、合肥、杭州等地区,受冬季燃煤取暖影响较大. 春冬两季高值区主要集中在苏皖两省,这是因为长三角地区是以传统煤和生物质为主要燃料的碳排放量较为集中的地区^[41],大规模的燃料燃烧导致黑碳和有机

碳含量迅速增加从而使 AAOD 增大. 夏季和秋季 AAOD 空间分布相差不大,绝大部分地区 AAOD 较低,均在 0.035 左右. 在吸收性气溶胶当中,由于有机碳气溶胶属于吸湿性气溶胶^[42],吸湿会使 AAOD 增大,而黑碳气溶胶和沙尘气溶胶则不然,但是在相对湿度较大的夏季,AAOD 并未出现大范围的高值,则可推测出长三角地区夏季有机碳含量并不高.

从 2008~2017年长三角地区 SSA 年均空间分布中可以看出,SSA > 0.925 的高值区主要分布在长三角地区的南部(图6),长三角地区 SSA 呈现出南部高、北部低的分布特征,说明南部的气溶胶的散射能力强于北部,即气溶胶吸收能力较弱. 2008~2017年长三角地区 SSA 季节空间分布显示(图

8), SSA 夏季最高, 春季其次, 冬季和秋季相差不大. 夏季 SSA > 0.925 高值区几乎覆盖了整个长三角地区, 气溶胶散射能力很强; 春季 SSA > 0.925 的高值区主要分布在苏南、皖东和浙东等地区, 沿海地区 SSA 略高, 春夏季气溶胶主要以散射为主. 长三角地区气候湿润、高温多雨, 春夏更甚, 且

SSA 与相对湿度之间存在正相关关系^[43], 相对湿度越大的地方, 气溶胶的散射能力就越强. 秋冬两季高值区空间分布相似, 冬季是因为燃煤取暖产生的大量吸收性气溶胶, 以及因北方供暖而造成气溶胶的远距离传输, 从而影响长三角地区气溶胶散射能力^[44], 所以 SSA 秋冬较低.

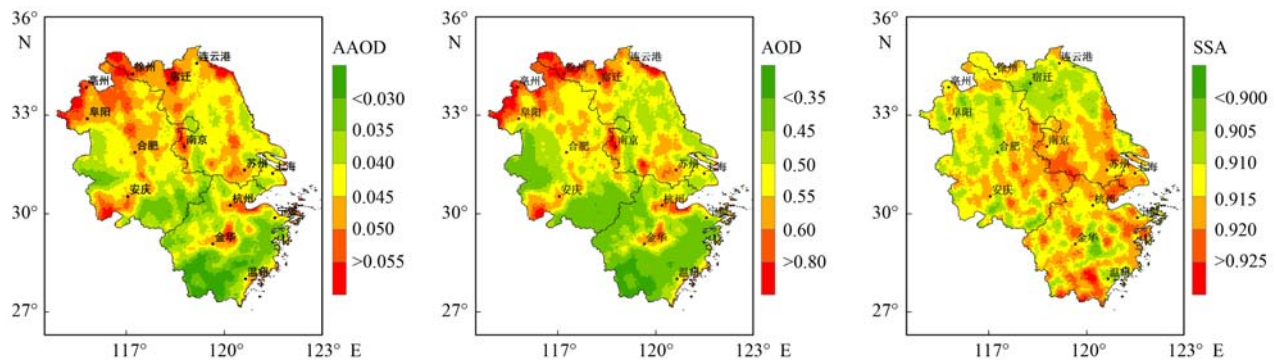


图 6 2008 ~ 2017 年长三角地区 AAOD、AOD 和 SSA 年均空间分布

Fig. 6 Annual average spatial distribution of AAOD, AOD, and SSA in the Yangtze River Delta from 2007 to 2018

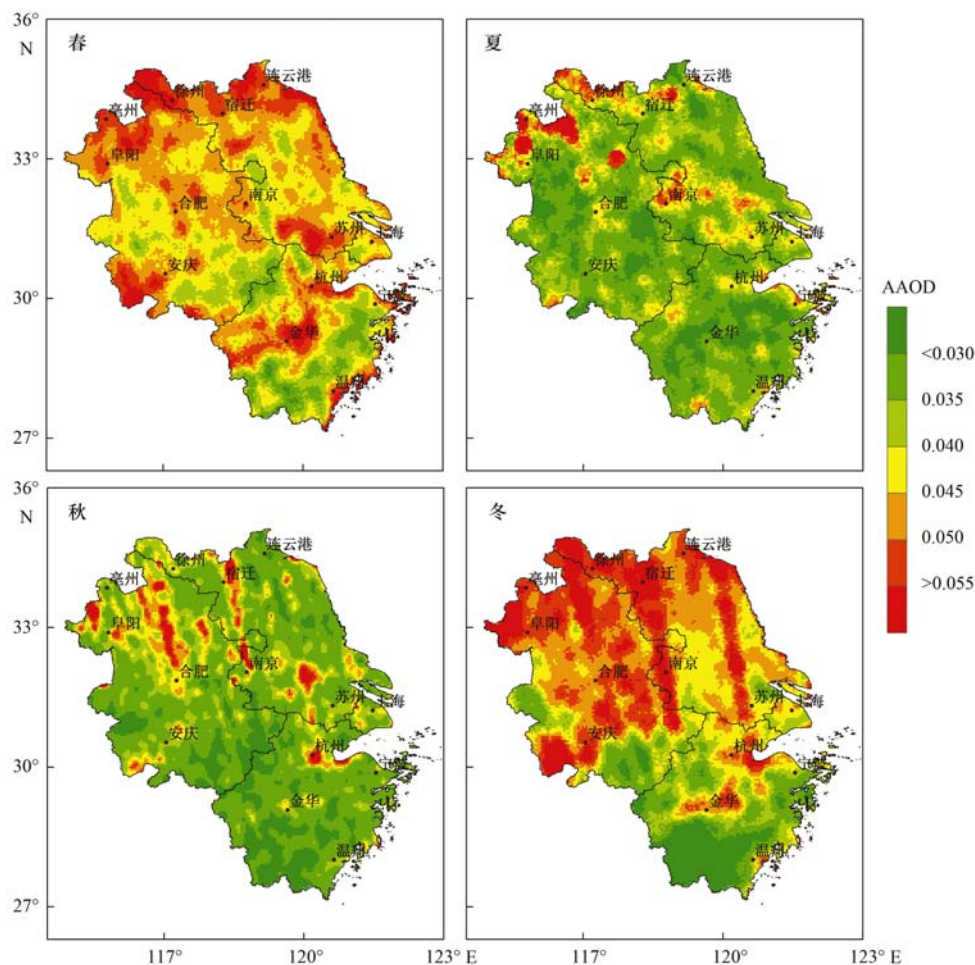


图 7 2008 ~ 2017 年长三角地区 AAOD 季节空间分布

Fig. 7 Seasonal distribution of AAOD season in the Yangtze River Delta from 2008 to 2017

2008 ~ 2017 年长三角地区 AOD 年均空间分布可知(图 6), AOD > 0.6 高值区主要集中在长三角地区北部, AOD 与 AAOD 空间分布相同, 即长三角

地区北部气溶胶含量高于南部. 长三角南部地区 AOD 较低的主要原因是地形多为山地、丘陵, 植被覆盖率较高, 人口密度小, 有较少的气溶胶排放.

2008 ~ 2017 年长三角地区 AOD 季节空间分布显示 (图 9), AOD 季节空间分布规律: 春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季. 春季 AOD > 0.8 高值主要集中在长三角北部以及杭州、金华等地区. 春季气溶胶分布范围最为广泛, 可能与沙尘气溶胶的远距离传输和生物质燃烧有关. 冬季 AOD 高值主要集中在苏皖两省, 苏皖两省有着发达的工业企业, 加上冬季取暖导致

气溶胶含量增加, AOD 较大. 夏季 AOD > 0.6 主要分布在皖北、苏北以及上海、苏州、南京等地区, 夏季 AOD 较高的主要原因是夏季湿度相对较大, 吸湿性气溶胶吸湿使 AAOD 增大, 从而使 AOD 增加^[45]. 秋季长三角绝大部分地区 AOD 低于 0.35, 秋季大气对流作用良好, 有利于污染物扩散^[46], 气溶胶含量较低.

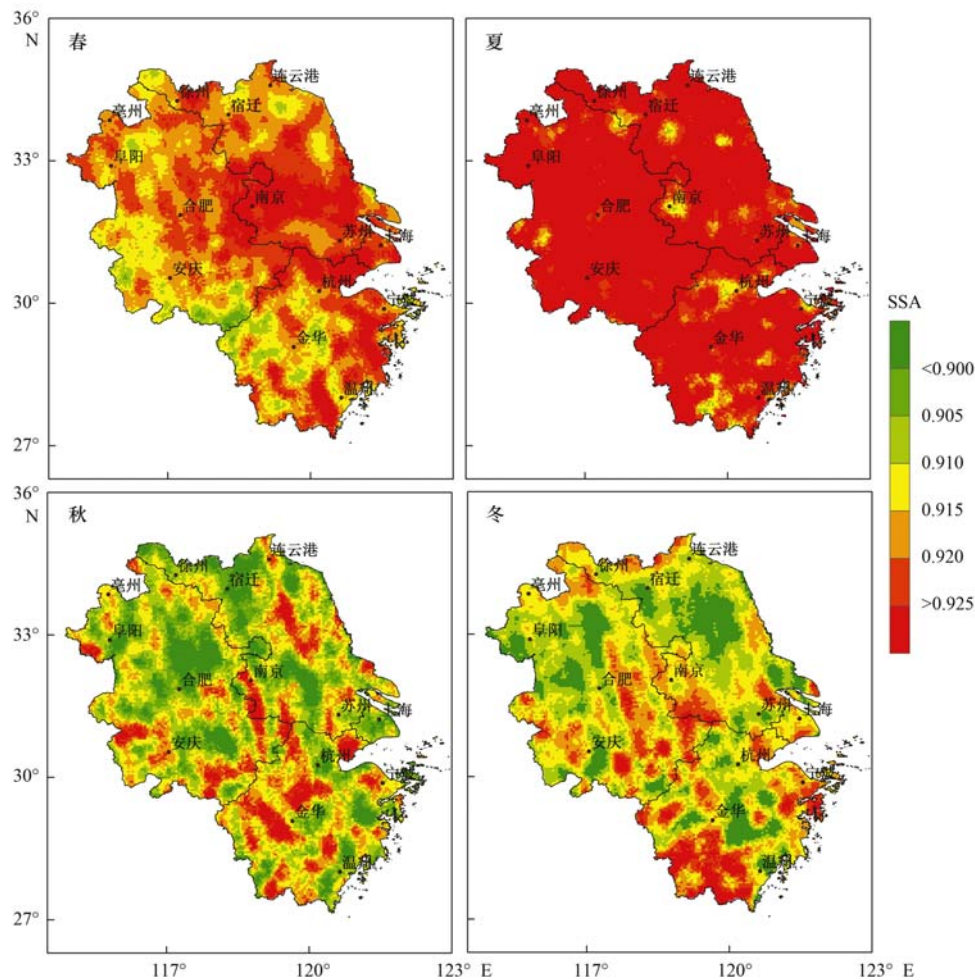


图 8 2008 ~ 2017 年长三角地区 SSA 季节空间分布

Fig. 8 Seasonal distribution of SSA season in the Yangtze River Delta region from 2008 to 2017

3 黑碳排放与分布特征

长三角地区是我国四大工业基地之一, 轻重工业都非常发达, 能源结构以煤炭为主^[3], 黑碳是煤炭燃烧后的主要产物, 因此有必要进一步分析黑碳的排放及分布.

付加锋等^[47]基于统计学方法得出中国大陆 2012 年黑碳排放量, 得出全国黑碳排放总量为 188.676×10^4 t, 其中工业源和居民生活源排放量较大, 分别占全国排放的 42.9% 和 43.3%, 居民生活源排放量居全国首位. 而长三角地区各省市不同源的黑碳排放量分别为: 上海市工业源排放量为 1.217×10^4 t, 占上海市总排放量的 72.4%, 江苏

省工业源和居民生活源排放量分别为 3.691×10^4 t 和 2.475×10^4 t, 占江苏省总排放量 46.0% 和 30.8%, 浙江省工业源和交通源排放量分别为 0.698×10^4 t 和 1.178×10^4 t, 占浙江省总排放量 27.6% 和 46.5%, 安徽省工业源和居民生活源排放量分别为 1.684×10^4 t 和 3.478×10^4 t, 占安徽省总排放量 26.6% 和 55.0%. 由此可见, 工业源和居民生活源是长三角地区黑碳气溶胶的主要来源.

从各个行业源看 (图 10), 各省市占长三角地区黑碳总排放量比重不同, 苏皖两省对黑碳排放的贡献量较大. 苏皖两省地处平原, 工业发展迅速, 工业源对黑碳排放的贡献占主导, 上海市黑碳排放多来自于工业源, 而浙江省与其他省市相比, 工业

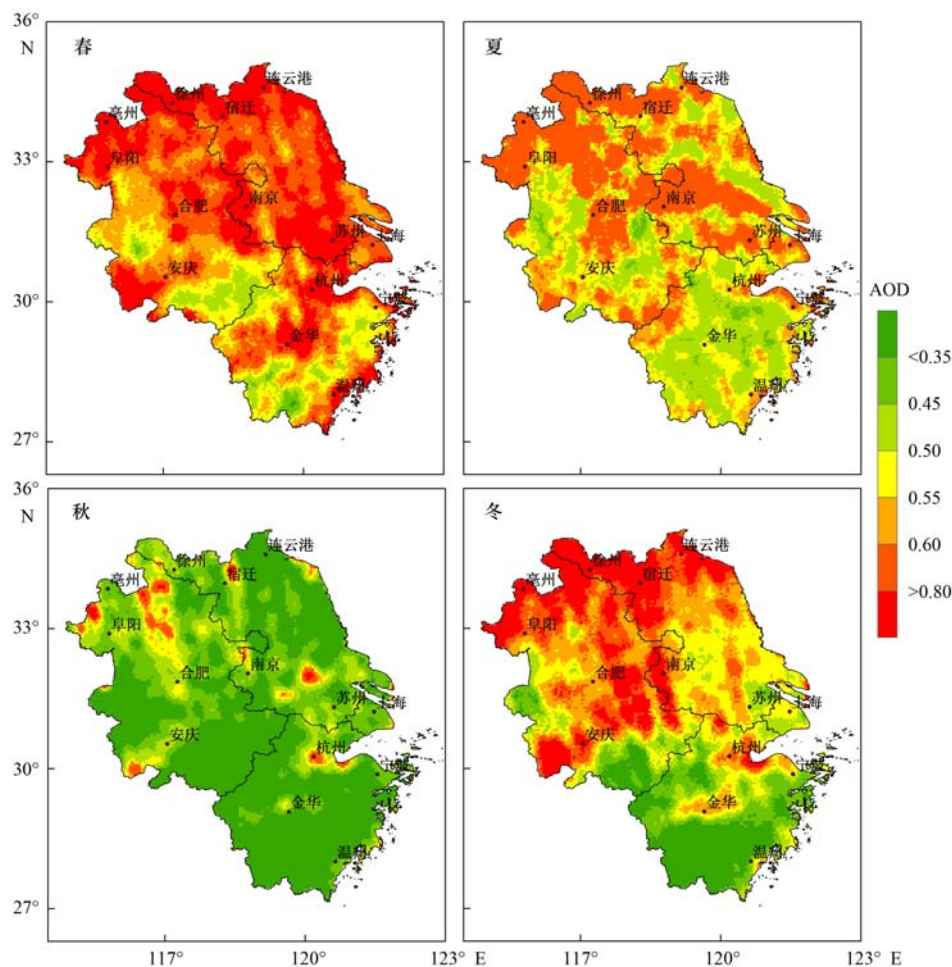


图 9 2008 ~ 2017 年长三角地区 AOD 季节空间分布

Fig. 9 Seasonal distribution of AOD season in the Yangtze River Delta region from 2008 to 2017

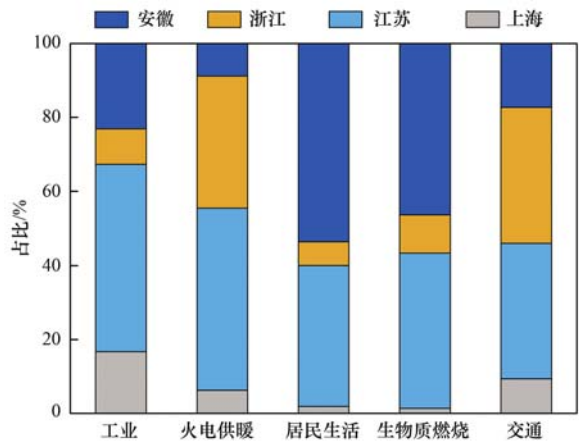


图 10 长三角地区各省市不同源黑碳排放情况

Fig. 10 Black carbon emissions from different sources in provinces and cities in the Yangtze River Delta

源黑碳排放量较少。安徽省和江苏省居民生活源的黑碳排放量均很大,上海市和浙江省远远小于前面两者。关于居民生活消费,各类能源贡献在2012年黑碳气溶胶排放清单中提到,江苏省和安徽省也是以秸秆燃烧为主要的居民黑碳排放^[47]。

长三角地区黑碳排放分布不均匀,各省市对长三角地区黑碳贡献量为:江苏省 > 安徽省 > 浙江省

> 上海市,呈北高南低的趋势,与 AAOD 和 AOD 的年均空间分布一致,有研究表明长三角地区 AOD 的增加与当地城市化、工业化的发展速度以及地区的人口密度有关^[48]。从 2007 ~ 2018 年 AAOD 与 AOD 的年均空间分布可以看出,苏皖两省均有较高值,主要集中在亳州、宿迁、徐州、南京及苏州等地,可能与当地工业发展水平或是人口密度有关。

4 结论

(1)长三角地区 AAOD 与 AOD 具有一致的 10 年变化趋势,均为先升高后下降,AAOD 在 2011 年达最大值 0.056, AOD 在 2011 年达最大值 0.702. SSA 的 10a 变化趋势不明显,在 0.902 ~ 0.922 范围内变化. AAOD 高值多出现在 3 月和 6 月,11 月到次年 1 月持续增加; AOD 6 月略有升高,11 月到次年 1 月持续升高; SSA 高值常出现在 6 月,低值出现在 12 月。

(2)长三角地区 AAOD 与 AOD 具有相似的年均空间分布,均呈北高南低分布,高值区主要集中在

在安徽北部、江苏北部以及南京、杭州和金华等地区。SSA 与 AAOD 和 AOD 的年均空间分布相反,呈南高北低分布,高值集中在浙江省以及苏皖南部。长三角地区 AAOD 与 AOD 季节空间变化显示,春冬两季较高,秋季较低,但二者不同的是,夏季 AOD 较大,AAOD 却很小。

(3)长三角地区吸收性气溶胶以黑碳为主,黑碳主要来自于工业源和居民生活源,各省市对长三角地区黑碳贡献量为:江苏省 > 安徽省 > 浙江省 > 上海市,与 AAOD 的空间分布表现出一致性。

致谢:本研究卫星数据来自美国 NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC),在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 余卫, 房世波, 余学祥. 中国卫星遥感气溶胶研究进展[J]. 能源环境, 2016, 30(1): 1-6.
Yu W G, Fang S B, Yu X X. Research progress on satellite remote sensing of atmospheric aerosols of China[J]. Energy Environmental Protection, 2016, 30(1): 1-6.
- [2] 罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 等. 近 20 年来中国典型区域 PM_{2.5} 时空演变过程[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3003-3013.
Luo Y, Deng Q F, Yang K, et al. Spatial-Temporal change evolution of PM_{2.5} in typical regions of China in recent 20 years[J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3003-3013.
- [3] 李莉, 徐健, 安静宇, 等. 长三角经济能源约束下的大气污染问题及对区域协作的启示[J]. 中国环境管理, 2017, 9(5): 9-18.
Li L, Xu J, An J Y, et al. The air pollution issues under the economic and energy constraint and their implications on the regional Joint-effort in the Yangtze River Delta Region[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9(5): 9-18.
- [4] Wang C. Impact of anthropogenic absorbing aerosols on clouds and precipitation: a review of recent progresses[J]. Atmospheric Research, 2013, 122: 237-249.
- [5] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D14): D14203.
- [6] Gadavi H, Jayaraman A. Absorbing aerosols: contribution of biomass burning and implications for radiative forcing[J]. Annales Geophysicae, 2010, 28: 103-111.
- [7] 张鹏, 王春姣, 陈林, 等. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题[J]. 气象, 2018, 44(6): 725-736.
Zhang P, Wang C J, Chen L, et al. Current status of satellite-based dust aerosol remote sensing and some issues to be concerned[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(6): 725-736.
- [8] 王爽, 巨天珍, 谢顺涛, 等. 天水市紫外吸收性气溶胶时空动态的遥感监测[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(1): 46-49.
Wang S, Ju T Z, Xie S T, et al. Temporal and spatial dynamic monitoring of tropospheric UV-absorbing aerosol in Tianshui based on remote sensing[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, 30(1): 46-49.
- [9] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 153.
- [10] Zheng Y, Che H Z, Zhao T L, et al. Aerosol optical properties observation and its relationship to meteorological conditions and emission during the Chinese National Day and Spring Festival holiday in Beijing[J]. Atmospheric Research, 2017, 197: 188-200.
- [11] 于彩霞, 杨元建, 邓学良, 等. 基于 CALIOP 探测的合肥气溶胶垂直分布特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1677-1683.
Yu C X, Yang Y J, Deng X L, et al. Vertical distribution characteristics of aerosol optical properties on haze and clear day in Hefei based on CALIOP satellite measuring[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1677-1683.
- [12] 高星星, 陈艳, 张镭, 等. 华北地区气溶胶的季节垂直分布特征及其光学特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 395-403.
Gao X X, Chen Y, Zhang L, et al. Vertical distribution of seasonal aerosols and their optical properties over Northern China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(3): 395-403.
- [13] 刘贞, 张雪姣, 郑有飞, 等. 基于 CALIPSO 对中国春季一次沙尘暴的研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4315-4327.
Liu Z, Zhang X J, Zheng Y F, et al. Spatio-temporal distribution and transport behavior of a dust event based on the CALIPSO in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4315-4327.
- [14] Kumar A, Singh N, Anshumali, et al. Evaluation and utilization of MODIS and CALIPSO aerosol retrievals over a complex terrain in Himalaya[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 206: 139-155.
- [15] 王苑, 邓军英, 史兰红, 等. 基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 830-838.
Wang Y, Deng J Y, Shi L H, et al. A floating-dust case study based on the vertical distribution of aerosol optical properties[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 830-838.
- [16] 林泓锦, 都瓦拉, 玉山, 等. 基于 MODIS 的内蒙古气溶胶时空分布特征分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4573-4581.
Lin H J, Du W L, Yu S, et al. Spatial-temporal characteristics of aerosol optical depth with MODIS data over Inner Mongolia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(12): 4573-4581.
- [17] 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 等. 基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3563-3570.
Hu J, Kang Y M, Chen Y H, et al. Analysis of aerosol optical depth variation characteristics for 10 years in Urumqi based on MODIS_C006[J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3563-3570.
- [18] 杨东旭, 韦晶, 钟永德. 利用 MODIS 卫星资料反演北京地区气溶胶光学厚度[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(11): 3464-3469.
Yang D X, Wei J, Zhong Y D, et al. Aerosol optical depth retrieval over Beijing using MODIS satellite images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(11): 3464-3469.
- [19] 袁兴明, 邢立鹏, 靳合波, 等. 基于 MODIS AOD 的山东地区

- PM_{2.5}反演[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, **41**(11): 88-90, 93.
- Yuan X M, Xing L P, Jin H B, *et al.* Estimation of PM_{2.5} over Shandong from MODIS AOD [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, **41**(11): 88-90, 93.
- [20] Jiang C, Xu Q, Gu Y K, *et al.* Spatial and temporal changes of aerosol optical depth and its driving factors based on MODIS in Jiangsu province [A]. In: ISPRS TC III Mid-term Symposium "Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing [C]. Beijing: ISPRS Technical Commission III on Remote Sensing, 2018. 645-649.
- [21] 王海林, 刘琼, 陈勇航, 等. MODIS C006 气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 44-54.
- Wang H L, Liu Q, Chen Y H, *et al.* Applicability of MODIS C006 aerosol products in a typical environmental area of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 44-54.
- [22] 张芝娟, 陈斌, 王皓, 等. 利用 OMI 资料分析 APEC 期间吸收性气溶胶的时空分布特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, **53**(1): 93-100.
- Zhang Z J, Chen B, Wang H, *et al.* Spatial and temporal characteristic of absorbing aerosols during APEC based on OMI data[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2017, **53**(1): 93-100.
- [23] 王宏斌, 张志薇, 徐萌. 基于地面和卫星观测的江苏地区污染物分布特征及其轨迹预报模型[A]. 见: 中国环境科学学会. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷)[C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2017. 10.
- [24] 李龙, 施润和, 张璐, 等. 华东地区 MODIS 与 OMI 气溶胶光学厚度数据融合[J]. 地球信息科学学报, 2015, **17**(10): 1224-1233.
- Li L, Shi R H, Zhang L, *et al.* Data fusion of MODIS AOD and OMIAOD over East China using universal kriging[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, **17**(10): 1224-1233.
- [25] 康丽泰. 东亚地区吸收性气溶胶的时空分布及辐射强迫特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [26] 赵莹, 陈圣波, 张莹. 臭氧总量测绘分光仪和臭氧监测仪紫外辐照度数据的对比研究[J]. 科学技术与工程, 2014, **14**(16): 195-199.
- Zhao Y, Chen S B, Zhang Y, *et al.* Comparison between ultraviolet irradiation data of TOMS and OMI [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, **14**(16): 195-199.
- [27] 葛拥晓, 阿力甫·那思尔, 吉力力·阿不都外力, 等. 威海地区粉尘气溶胶动态变化及潜在扩散特征[J]. 中国沙漠, 2016, **36**(5): 1374-1380.
- Ge Y X, Naser A, Jilili A, *et al.* Dynamic change and potential transport characteristics of dust aerosol originating from the Aral Sea Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, **36**(5): 1374-1380.
- [28] Chung E C, Ramanathan V, Decremier 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): 11624-11629.
- [29] 延昊, 王长耀, 牛铮, 等. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究[J]. 地理科学进展, 2002, **21**(1): 90-94.
- Yan H, Wang C Y, Niu Z, *et al.* Remote sensing study of tracks and source areas of Eastern Asian dust [J]. *Progress in Geography*, 2002, **21**(1): 90-94.
- [30] 戴昭鑫, 张云芝, 胡云锋, 等. 基于地面监测数据的 2013 ~ 2015 年长三角地区 PM_{2.5} 时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(5): 813-821.
- Dai Z X, Zhang Y Z, Hu Y F, *et al.* Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Yangtze River Delta (YRD) region based on the ground monitoring data from 2013-2015 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(5): 813-821.
- [31] 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3280-3289.
- Xiao S H, Yu X N, Zhu B, *et al.* Characteristics of black carbon aerosol and influencing factors in northern suburbs of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3280-3289.
- [32] Gyawali M, Arnott W P, Lewis K, *et al.* In situ aerosol optics in Reno, NV, USA during and after the summer 2008 California wildfires and the influence of absorbing and non-absorbing organic coatings on spectral light absorption[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(20): 8007-8015.
- [33] 范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展[J]. 大气科学, 2013, **37**(2): 477-498.
- Fan X H, Chen H B, Xia X A. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, **37**(2): 477-498.
- [34] Norman A L, Anlauf K, Hayden K, *et al.* Aerosol sulphate and its oxidation on the Pacific NW coast: S and O isotopes in PM_{2.5} [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(15): 2676-2689.
- [35] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子 PM_{2.5} 的影响[J]. 环境科学, 2002, **23**(4): 33-36.
- Song Y, Tang X Y, Zhang Y H, *et al.* Effects on fine particles by the continued high temperature weather in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2002, **23**(4): 33-36.
- [36] 刘湾湾, 刘琼, 陈勇航, 等. 上海地区对流层低层臭氧及硫酸盐气溶胶时空分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(6): 2214-2222.
- Liu W W, Liu Q, Chen Y H, *et al.* The temporal and spatial distribution characteristics of lower tropospheric ozone and sulfate aerosols in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2214-2222.
- [37] Kaufman Y J, Fraser R S, Ferrare R A. Satellite measurements of Large-scale air pollution: method [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, **95**(D7): 9895-9909.
- [38] Xia X G, Chen H B, Li Z Q, *et al.* Significant reduction of surface solar irradiance induced by aerosols in a suburban region in northeastern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D22): D22S02.
- [39] 宋秀瑜, 曹念文, 赵成, 等. 南京地区相对湿度对气溶胶含量的影响[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(9): 3240-3246.
- Song X Y, Cao N W, Zhao C, *et al.* Effect of relative humidity on aerosol content in Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3240-3246.
- [40] 姚玲玲. 中国及典型地区气溶胶光学厚度的时空分布特征及影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [41] 黄观, 刘伟, 刘志红, 等. 黑碳气溶胶研究概况[J]. 灾害学, 2015, **30**(2): 205-214.
- Huang G, Liu W, Liu Z H, *et al.* A research overview of black carbon aerosols [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, **30**(2): 205-214.
- [42] 孙俊英, 张璐, 沈小静, 等. 大气气溶胶散射吸湿增长特性研究进展[J]. 气象学报, 2016, **74**(5): 672-682.
- Sun J Y, Zhang L, Shen X J, *et al.* A review of the effects of relative humidity on aerosol scattering properties [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(5): 672-682.
- [43] Qiu J H, Yang J H. Absorption properties of urban/suburban

- aerosols in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, **25**(1): 1-10.
- [44] 康颖. 基于地面和卫星数据分析中国地区气溶胶单次散射反照率的变化特征[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [45] 周寅. 长三角地区大气气溶胶光学厚度遥感及时空变化规律研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [46] 吴万宁, 查勇, 王强, 等. 南京仙林地区近地表消光系数变化及影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(12): 106-111.
Wu W N, Zha Y, Wang Q, *et al.* Variation characteristics and influencing factors of extinction coefficient in xianlin area of Nanjing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(12): 106-111.
- [47] 付加锋, 齐蒙, 刘倩, 等. 黑碳气溶胶排放量测算及空间分布研究[J]. *科技导报*, 2018, **36**(2): 38-46.
Fu J F, Qi M, Liu Q, *et al.* The emission estimation and spatial distribution of black carbon aerosol[J]. *Science & Technology Review*, 2018, **36**(2): 38-46.
- [48] 高嵩, 许潇锋, 陶风波, 等. 长三角地区近 10 年气溶胶时空分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(9): 192-202.
Gao S, Xu X F, Tao F B, *et al.* Temporal and spatial distributions of aerosols over the Yangtze River Delta region in recent 10 years [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(9): 192-202.

环境科学

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jin-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occcluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)