

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚 (1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣 (1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰 (1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚 (1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余 (1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉 (1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰 (1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊 (1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀 (1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰 (1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲 (1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣 (1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超 (1645)
南昌市场尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任 (1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰 (1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌 (1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新 (1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬 (1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫 (1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高 (1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠 (1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民 (1726)
湛江湾沉积物中六六六 (HCHs)、滴滴涕 (DDTs) 有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中 (1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳 (1742)
溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪 (1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安 (1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生 (1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏 (1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳 (1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华 (1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲 (1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓 (1811)
金属有机框架 MIL-53 (Fe) 可见光催化还原水中 U (VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永 (1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞 (1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政 (1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖 (1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕 (1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂 (1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟 (1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚 (1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启 (1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹 (1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良 (1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳 (1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand (1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔 (1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪 (1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮 (N ₂ O) 浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波 (1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋 (1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹 (1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣 (1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥 (1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青 (1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏 (1990)
《环境科学》征订启事 (1612)	《环境科学》征稿简则 (1787)
信息 (1663, 1796, 1833)	

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性

齐冰^{1,2}, 车慧正^{3*}, 徐婷婷⁴, 杜荣光¹, 胡德云¹, 梁卓然¹, 马千里⁵, 姚杰⁵

(1. 杭州市气象局, 杭州 310051; 2. 中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4. 上海宝钢工业技术服务有限公司, 上海 201900; 5. 临安区域大气本底站, 临安 311307)

摘要: 利用2012年杭州、桐庐、建德、淳安CE-318太阳光度计的观测资料, 反演获得了气溶胶光学厚度(AOD)、Ångström波长指数(AE)、单次散射反照率(SSA)和气溶胶粒子谱(ASD)等参数, 分析了杭州地区气溶胶光学特性的变化规律。结果表明, 2012年杭州、桐庐、建德、淳安AOD_{440nm}年均值分别为 0.94 ± 0.16 、 0.84 ± 0.17 、 0.82 ± 0.22 、 0.71 ± 0.20 , 呈现出自东北向西南逐渐下降的变化趋势, 是长三角地区AOD高值地区之一。AE_{440-870nm}年均值分别为 1.24 ± 0.12 、 1.19 ± 0.17 、 1.06 ± 0.04 、 1.04 ± 0.10 , 表明杭州地区以半径较小的气溶胶粒子为主控模态。3~4月AE相对偏低与来自北方的沙尘粒子远距离输送有关。除淳安外, 杭州、桐庐和建德AOD有明显的日变化特征。不同地区细模态粒子峰值半径春季、秋季和冬季均在 $0.15 \mu\text{m}$ 左右, 由于气溶胶粒子的吸湿增加导致夏季细模态粒子的峰值半径在 $0.25 \mu\text{m}$ 左右; 粗模态粒子峰值半径夏季、秋季和冬季均在 $2.94 \mu\text{m}$ 左右, 高于春季($1.7 \sim 2.2 \mu\text{m}$)。SSA_{440nm}年均值分别为 0.91 ± 0.01 、 0.92 ± 0.03 、 0.92 ± 0.02 、 0.93 ± 0.02 , 说明杭州地区气溶胶粒子为中等强度吸收性气溶胶。对气溶胶类型进行分类表明, 杭州以生物质燃烧/城市工业型为主, 而桐庐、建德和淳安以混合型为主。

关键词: 气溶胶光学厚度; Ångström波长指数; 单次散射反照率; 气溶胶粒子谱; 杭州地区

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1604-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808071

Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region

Qi Bing^{1,2}, Che Hui-zheng^{3*}, Xu Ting-ting⁴, Du Rong-guang¹, Hu De-yun¹, Liang Zhuo-ran¹, Ma Qian-li⁵, Yao Jie⁵

(1. Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Chemistry, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Shanghai Baosteel Industry Technological Service Co., Ltd., Shanghai 201900, China; 5. Lin'an Regional Background Station, Lin'an 311307, China)

Abstract: To investigate the optical properties of aerosols in the Hangzhou region (Hangzhou, Tonglu, Jiande, and Chun'an), the aerosol optical depth (AOD), Ångström exponent (AE), single scattering albedo (SSA), and aerosol size distribution (ASD) were measured using CIMEL sun-photometers in 2012. The results showed that the annual average values of AOD_{440nm} in Hangzhou, Tonglu, Jiande, and Chun'an were 0.94 ± 0.16 , 0.84 ± 0.17 , 0.82 ± 0.22 , and 0.71 ± 0.20 , respectively. The values generally decreased from the northeast to the southwest, and represented one of highest AOD districts in the Yangtze River Delta, China. The annual average values of AE_{440-870nm} were 1.24 ± 0.12 , 1.19 ± 0.17 , 1.06 ± 0.04 , and 1.04 ± 0.10 , respectively, indicating that particles with small average effective radii were predominant. The relatively lower AE values in March and April were generally attributed to the long-range transport of dust aerosols from Northwest China. Obvious diurnal variations in the AOD were found in Hangzhou, Tonglu, and Jiande, but not in Chun'an. An average fine-mode effective radius of $\sim 0.15 \mu\text{m}$ was observed in spring, autumn, and winter, while a value of $\sim 0.25 \mu\text{m}$ was observed in summer, in conjunction with aerosol hygroscopic growth. An average coarse-mode effective radius of $\sim 2.94 \mu\text{m}$ was observed in summer, autumn, and winter, which was higher than the value in spring. The annual average values of SSA_{440nm} were 0.91 ± 0.01 , 0.92 ± 0.03 , 0.92 ± 0.02 , 0.93 ± 0.02 , respectively, indicating that the particles had relatively strong to moderate absorption. Characterization of the aerosol types showed the predominance of biomass burning and urban industrial type aerosols in Hangzhou, while mixed type aerosols were observed in Tonglu, Jiande, and Chun'an.

Key words: aerosol optical depth; Ångström exponent; single scattering albedo; aerosol size distribution; Hangzhou region

气溶胶是大气中的一种重要的组成成分, 它们通过散射和吸收太阳辐射改变地气系统的辐射平衡, 在全球和区域气候变化中扮演着十分重要的角色^[1, 2]。目前对于气溶胶的直接和间接效应还存在很大的不确定性, 进而影响了气候预测^[3, 4]。气溶胶的污染特性取决于它们的物理、化学和光学性质, 以及在大气中的非均相化学反应有着密切的关系, 并且在空间和时间上都具有很大的差异^[5]。此

外, 气溶胶还与酸雨的形成、烟雾事件的发生等密

收稿日期: 2018-08-08; 修订日期: 2018-10-05

基金项目: 中国气象局大气化学重点开放实验室开放课题项目(2017B03); 国家重点研发计划项目(2016YFA0601900); 国家自然科学基金重大项目(41590874); 浙江省自然科学基金项目(LY16D010006); 浙江省气象局科技计划项目(2018YB02)

作者简介: 齐冰(1981~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: bill_129@sina.com

* 通信作者, E-mail: chehz@cma.gov.cn

切相关^[6], 也会对人体健康产生重要作用^[7].

卫星和地基遥感技术是目前研究气溶胶光学特性和辐射效应最常用的手段. 其中, 地基遥感被认为是高精度测量方法^[8], 常用于卫星数据的验证^[9, 10]. 近年来, 我国大多数基于地基遥感研究气溶胶光学特性都是在经济快速发展的城市地区进行的^[11~15], 这些地方通常都具有较高的气溶胶负荷. 长江三角洲地区是我国经济最具活力的区域之一, 持续快速的发展所带来的环境问题也日益严重. 许多学者对长三角地区的南京、上海、杭州、太湖等地区开展气溶胶光学特性调查研究^[16~20], 这有助于人们了解当地的空气质量和区域气候变化带来的影响.

杭州是长江三角洲重要的中心城市之一, 随着城市化进程的加快, 杭州城市及其辐射的周边区域气溶胶也不断发生改变, 由此引发的大气环境问题愈发引起关注. 本文利用杭州、桐庐、建德和淳安 CE-318 太阳光度计的观测资料, 反演获得了气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD)、Ångström 波长指数 (Ångström exponent, AE)、单次散射反照率 (single scattering albedo, SSA) 以及气溶胶粒径分布 (aerosol size distribution, ASD) 这 4 个重要气溶胶光学参数指标, 分析了不同地区气溶胶光学参数的变化规律, 以期为该区域气溶胶特性及其气候影响研究提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

杭州地处长江三角洲南翼, 杭州湾西端, 具有平原、丘陵、山地和水体等多种土地类型. 杭州地区总面积 16 596 km², 截至 2012 年底总人口 880.2 万人. 杭州地域经济、工业布局及人口分布极不平衡, 因此大气环境也具有明显的区域特征. 本文采用的 CE-318 自动跟踪扫描太阳光度计监测均安装在各地气象局观测场内, 具体位置如图 1 所示. 杭

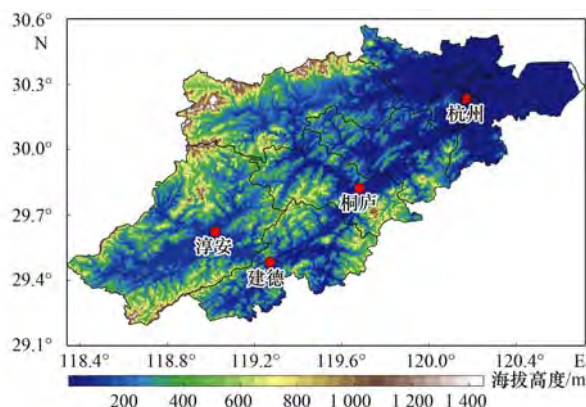


图 1 观测站点布局示意

Fig. 1 Locations and elevations of the four sites in Hangzhou

州市区人口密集, 交通流量大, 代表城市区域; 桐庐和建德分别位于杭州市区西南方向约 70 km 以及 110 km, 该地区近些年发展较快, 代表城乡结合类型; 淳安位于杭州市区西南方向约 130 km, 该地区工业很少, 人口规模较小, 主要为旅游风景区, 生态环境较好, 代表乡村地区.

1.2 资料来源

本研究采用统一的 CE-318 型自动跟踪扫描太阳光度计, 该仪器纳入了中国气象局气溶胶光学特性观测网 (CARSNET). CE-318 太阳光度计滤光片中心波长分别为 340、380、440、500、670、870、936、1 020 和 1 640 nm, 各波段带宽为 10 nm. 仪器的视场角为 1°, 太阳跟踪精度小于 0.1. 利用 CARSNET 参考仪器对杭州站 CE-318 仪器进行校准^[21], 桐庐、建德和淳安站点仪器在 2011 年 12 月~2012 年 1 月安装运行, 按照生产厂家建议新仪器在第一年观测中不需要进行额外定标, 因此资料处理采用了仪器出厂时的定标数据. 所使用的数据时段为 2012 年 1~12 月. 各观测站点每月有记录的天数如图 2 所示, 桐庐站因为建站较晚, 所以 1 月观测日数仅有 2 d. 将观测得到的瞬时值取小时平均, 进而计算得到日平均值, 再计算成月平均值.

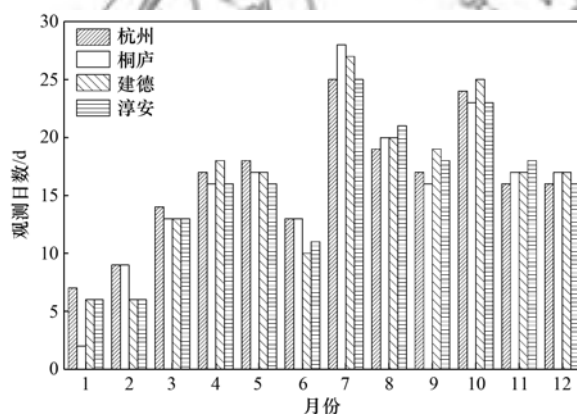


图 2 逐月观测天数

Fig. 2 Observation days per month

1.3 数据处理

采用 ASTPwin 软件对云层处理后得到 Level 1.5 的 AOD 数据. 根据 Che 等^[21]的研究, ASTPwin 软件计算得出的 AOD 值比 AERONET 在 440、670、870 和 1 020 nm 分别高出 0.01、0.01、0.01 和 0.03; 可以近似认为两者结果一致. 采用 Dubovik 等^[22~24]提出的算法, 利用天空辐射测量和太阳直接测量结合起来反演获得气溶胶粒子谱, 单次散射反照率等气溶胶微物理特性.

2 结果与讨论

2.1 AOD_{440nm} 和 AE_{440-870nm}

2012 年杭州、桐庐、建德和淳安的 AOD_{440nm} 年

平均分别为 0.94 ± 0.16 、 0.84 ± 0.17 、 0.82 ± 0.22 和 0.71 ± 0.20 。杭州 AOD_{440nm} 要高于同区域类型的南京 (0.88)^[25]、西安 (0.88)^[26]、上海 (0.74)^[27] 和北京 (0.71)^[28]，但低于武汉 (1.10)^[29] 和成都 (0.98)^[2]。淳安 AOD_{440nm} 要明显低于同区域类型的临安 (0.89)^[27] 和太湖 (~ 0.90)^[30]。图 3 为各站点 AOD_{440nm} 逐月变化，从中可见， AOD_{440nm} 逐月变化趋势具有较高一致性，由于 4 个观测站点所在区域通常受同一个天气系统控制，气象要素变化规律具有相对的一致性，对气溶胶光学特性变化趋势的影响差别不大^[31]。杭州、桐庐、建德和淳安的 AOD_{440nm} 在 6 月出现高值，分别为 1.07 ± 0.80 、 1.07 ± 0.42 、 1.11 ± 0.38 、 0.88 ± 0.45 ，6 月各地区平均相对湿度均高于 80%，较高相对湿度条件下会引起气溶胶吸湿增长导致气溶胶光学厚度的增加^[30]。其次 1 月 AOD_{440nm} 也相对偏高，分别为 1.10 ± 0.51 、 0.92 ± 0.17 、 1.28 ± 0.76 、 1.13 ± 0.72 ，可能是由于该地区冬季多受大陆高压系统控制，大气层结稳定，多逆温容易造成污染物堆积。由于 1 月桐庐建站时间晚，较少的观测时次可能造成 AOD_{440nm} 月均值偏低。由图 3 还可以看出， AOD_{440nm} 低值区主要出现在 7~8 月，受副热带高压系统影响，对流比较旺盛，边界层高度基本在 $1.5 \sim 2.0 \text{ km}$ ^[32]，污染物扩散条件较好，因此 AOD_{440nm} 相对偏低。

相比而言，除了 7 月较低外，杭州 AOD_{440nm} 的高值贯穿全年，大多数接近甚至远高于 0.9。可以看出人口密集的城市区域，机动车保有量高，污染物排放高，因此在城市上空气溶胶的负载量巨大。淳安除了 1、2、3、6 月 AOD_{440nm} 相对偏高，其余月份基本都在 0.7 以下，作为旅游风景区，工业污染少，人口规模小， AOD_{440nm} 要远低于杭州。城乡结合地区的桐庐和建德， AOD_{440nm} 月变化大致介于杭州和淳安之间，部分月份甚至高于杭州。这意味着城乡与城市间的差异正在逐渐消失，究其原因可能是

因为城市化进程的加快以及日益增长的城市污染对周边区域产生了一定影响^[33]，尤其在人口密度更高的东部地区，存在大量的人为和工业活动，这种特征则表现得更为显著。

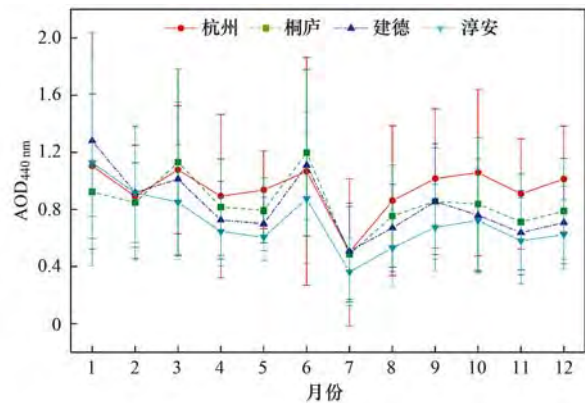


图 3 AOD_{440nm} 逐月变化

Fig. 3 Monthly variations of AOD_{440nm}

2012 年杭州、桐庐、建德和淳安的 $AE_{440-870nm}$ 年平均分别为 1.24 ± 0.12 、 1.19 ± 0.17 、 1.06 ± 0.04 和 1.04 ± 0.10 。图 4 为各站点 $AE_{440-870nm}$ 逐月变化，从中可见，除 3~4 月外，其余月份各站 $AE_{440-870nm}$ 月均值基本都大于 1，表明杭州地区主要以半径较小的气溶胶粒子为主。杭州、桐庐、建德和淳安 AE 高值区出现在秋季的 9~10 月 ($1.15 \sim 1.37$) 和冬季的 1~2 月 ($1.00 \sim 1.34$)，说明来源于人为排放和工业活动产生的细粒子占居主导。而 3~4 月的 $AE_{440-870nm}$ 较其他月份明显偏低，与起源于北方的沙尘粒子远距离输送有关^[34, 35]。尽管如此，Eck 等^[36]的研究表明当 $AE_{440-870nm}$ 大于 0.8 时，人类密集活动地区仍以细粒子占居主导，甚至是在春季气溶胶中混合了来源于北方的沙尘粒子。

2.2 AOD_{440nm} 日变化

图 5 给出 2012 年各站点 AOD_{440nm} 日变化，从中可见，杭州 AOD_{440nm} 日变化大体呈现单边上升趋势，下午要高于上午，峰值出现在 16:00，为 0.95

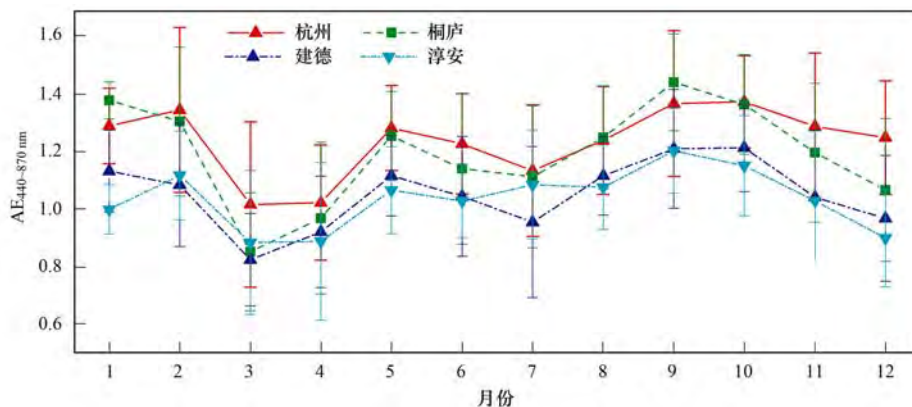


图 4 $AE_{440-870nm}$ 逐月变化

Fig. 4 Monthly variations of $AE_{440-870nm}$

± 0.59 . 桐庐和建德 AOD_{440nm} 日变化趋势较为一致, 略呈现单边下降趋势; 小时均值差不超过 0.04, 上午要高于下午, 峰值均出现在 07:00, 分别为 0.83 ± 0.50 和 0.81 ± 0.42 . 淳安 AOD_{440nm} 日变化非常平缓, 数值变化范围在 0.57~0.63 之间, 且逐时均值要明显低于其他 3 个地区. AOD 日变化特征与人为活动和气象条件密切相关. 杭州、桐庐和建德 AOD 在早晨均出现增加趋势, 可能是处于人们集中出行的早高峰时期, 加之边界层高度较低, 污染物不易扩散. 杭州午后 AOD 再次出现增加可能是因为城市气溶胶排放是一个持续的过程, 午后对流活动增强, 大气层结变得越来越不稳定, 近地面气溶胶通过湍流运动被卷到空中, 从而对 AOD 产生影响^[37]. 通过对比不同区域类型的 AOD 日变化可以看出, 人口密集城市的杭州气溶胶排放不仅是一个持续的过程, 而且人为活动对 AOD 的贡献巨大; 桐庐和建德在特定时间段的集中人为活动会导致 AOD 增加, 由于没有持续的污染物排放, AOD 会逐渐下降; 淳安则没有体现出污染物集中释放时段, 受人为源影响也相对较小, AOD 较低且变化平缓.

2.3 气溶胶粒子谱

图 6 和图 7 分别给出杭州地区不同季节气溶胶体积浓度谱分布以及气溶胶体积浓度. 从图 6(a) 和图 7(a) 可以看出, 杭州春季、秋季和冬季细模态粒子峰值半径在 0.15 μm 左右, 夏季细模态粒子的峰值半径均要高于其他 3 个季节, 在 0.25 μm 左

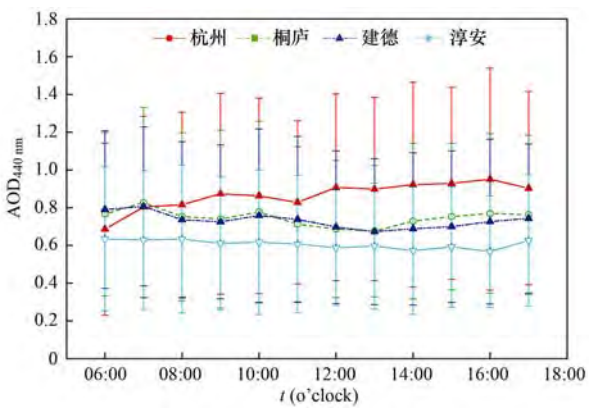


图 5 AOD_{440nm} 日变化

Fig. 5 Daily variation of AOD_{440nm}

右, 夏季细模态粒子峰值增加可能与气溶胶的吸湿增长有关. 夏季、秋季和冬季粗模态粒子峰值半径在 2.94 μm , 春季粗模态粒子峰值半径变化范围在 1.7~2.94 μm . 杭州气溶胶体积浓度不同季节相差不大, 春季最高 0.25 $\mu m^3 \cdot \mu m^{-2}$, 秋季最低 0.21 $\mu m^3 \cdot \mu m^{-2}$. 夏季细模态粒子体积浓度 0.18 $\mu m^3 \cdot \mu m^{-2}$ 是粗模态粒子的 2.8 倍; 秋季和冬季细模态粒子体积浓度也高于粗模态粒子浓度, 而春季粗模态粒子体积浓度 0.14 $\mu m^3 \cdot \mu m^{-2}$ 约为细模态粒子的 1.4 倍, 这可能受远距离传输的沙尘气溶胶影响.

由图 6(b) 和图 7(b) 可见, 桐庐春季、秋季和冬季细模态粒子峰值半径也在 0.15 μm 左右, 夏季细模态粒子峰值半径有所增加, 在 0.19 μm 左右, 低于杭州. 夏季和冬季粗模态粒子峰值半径在 2.94

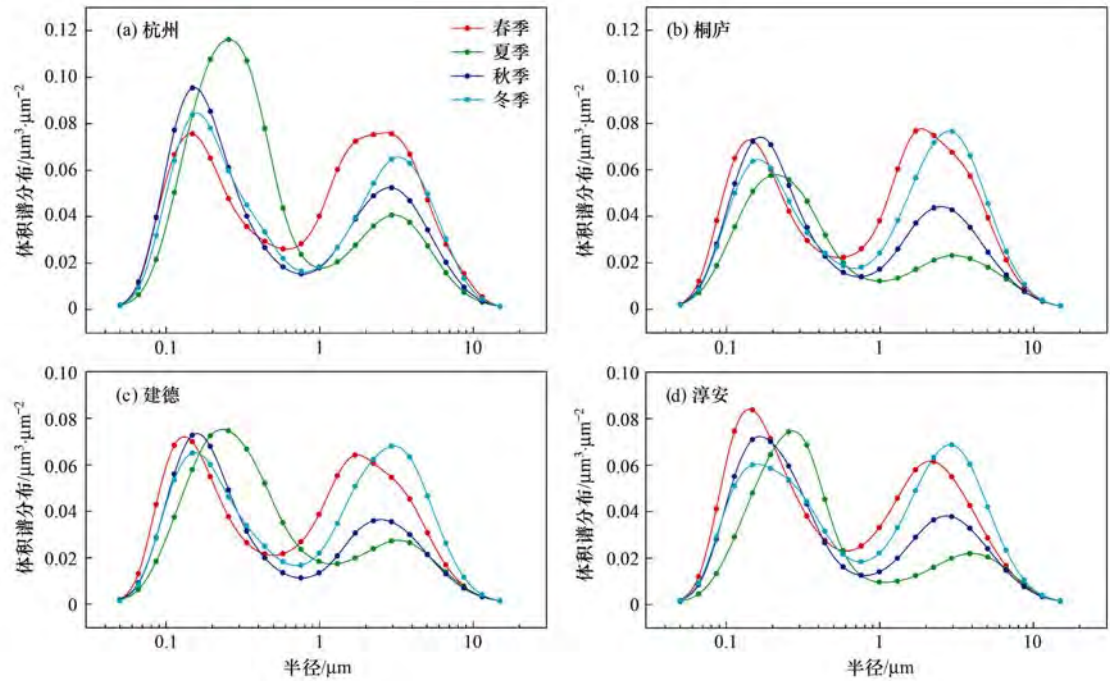


图 6 不同季节气溶胶体积浓度谱分布

Fig. 6 Seasonal variation of the aerosol volume size distributions

μm , 秋季粗模态粒子峰值半径在 $2.24 \mu\text{m}$, 而春季粗模态粒子峰值半径在 $1.7 \mu\text{m}$, 与杭州相比要略偏低. 桐庐体积浓度季节相差较大, 春季和冬季体积浓度分别为 $0.23 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 和 $0.21 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$, 夏季最低 $0.13 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$. 与杭州气溶胶体积浓度变化不同, 桐庐粗模态粒子体积浓度在春季、冬季比细模态粒子均偏高 $0.03 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$. 春季基本处于同一天气系统控制, 沙尘气溶胶仍然对此区域有一定贡献. 由图 6(c) 和图 7(c) 可见, 建德和桐庐属于同一区域类型, 其气溶胶粗、细模态的粒径分布特征和气溶胶体积浓度的季节变化特征与桐庐均表现为较好的一致性.

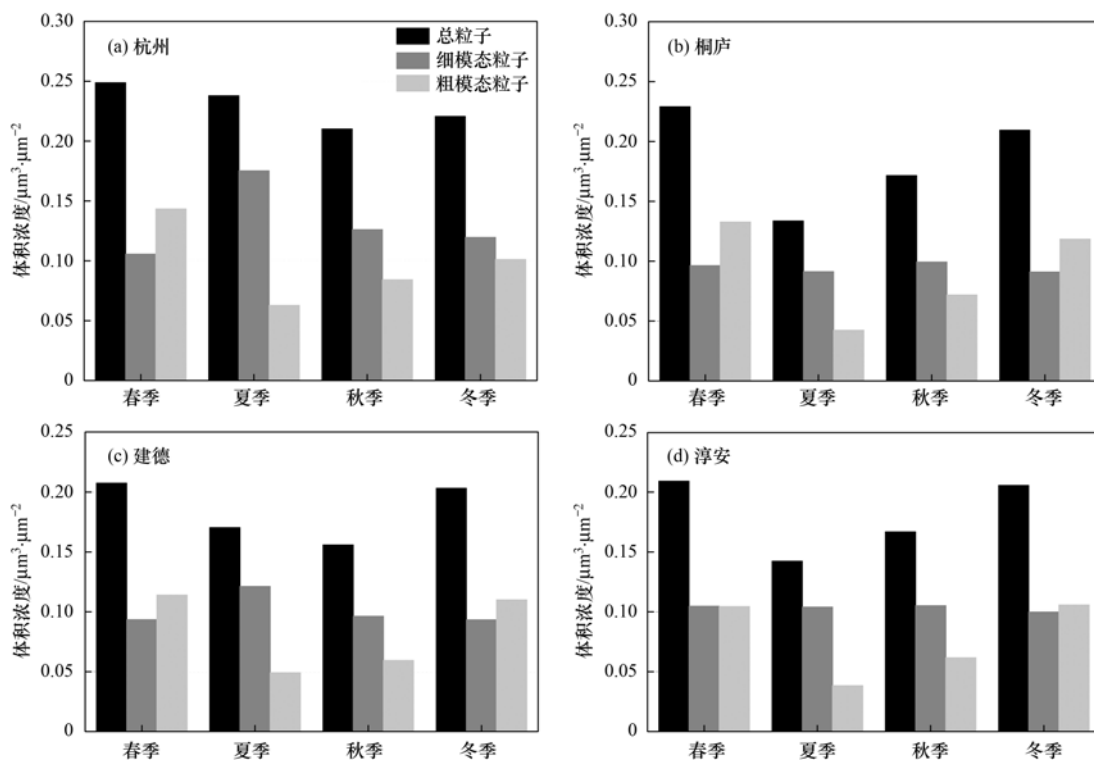


图 7 不同季节气溶胶体积浓度

Fig. 7 Seasonal variation of the aerosol volume

2.4 单次散射反照率 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$

2012 年杭州、桐庐、建德和淳安的 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 年平均分别为 0.91 ± 0.01 、 0.92 ± 0.03 、 0.92 ± 0.02 和 0.93 ± 0.02 . 这一结果与上海 (0.91)^[13]、武汉 (0.90)^[14]、沈阳 (0.90)^[15]、太湖 (0.90)^[30]、寿县 (0.92)^[38] 相当, 高于西安 (0.89)^[26] 和北京 (0.89)^[28], 低于合肥 (0.95)^[39]. Eck 等^[36] 的研究表明, 从 AERONET 站点获取的 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 变化范围在 $0.82 \sim 0.98$ 之间. 由此可见, 杭州地区 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 值可以认为与人为源排放的中等强度吸收性气溶胶粒子有关. 图 8 为各站点 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 逐月变化, 从中可见, 淳安逐月 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 都要高于杭州, 说明吸收性气溶胶在城市地区比乡村地区占有更高比例. 不同

由图 6(d) 和图 7(d) 可见, 淳安细模态粒子峰值半径变化与杭州类似, 春季、秋季和冬季在 $0.15 \mu\text{m}$, 夏季在 $0.25 \mu\text{m}$, 高于杭州. 粗模态粒径峰值半径春季和夏季分别为 $2.2 \mu\text{m}$ 和 $3.9 \mu\text{m}$ 、秋季和冬季在 $2.94 \mu\text{m}$ 左右. 不同于其他 3 个地区, 淳安夏季粗模态粒子峰值半径较大, 春季粗模态粒子峰值半径也要高于桐庐和建德. 淳安夏季细模态粒子体积浓度为 $0.14 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$, 是粗模态粒子体积浓度的 2.2 倍. 淳安春季和冬季气溶胶体积浓度相当, 分别为 $0.22 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 和 $0.21 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$. 与桐庐和建德不同, 淳安在冬、春季节粗、细模态粒子体积浓度几乎一样, 基本在 $0.10 \mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 左右.

地区 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 在 3~4 月相对偏低, 特别是桐庐和建德在 3 月 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 仅为 0.85 和 0.86. Reid 等^[40] 的研究指出, 在沙尘气溶胶长距离传输过程中, 由于沉积作用使 SSA 相对偏低. 特别是沙尘气溶胶中混合了矿物质, 由于铁氧化物的吸收作用导致 440 nm 波段 SSA 的低值^[41]. 不同地区 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 在 6~8 月由于气溶胶粒子的吸湿增长, 表现出更强的光散射能力^[30]. 而 12、1、2 月杭州地区 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 平均变化范围在 $0.90 \sim 0.95$ 之间, 由于杭州没有采暖期, 排放产生的强吸收性气溶胶与北方城市相比不会明显增加, 因此 $\text{SSA}_{440\text{nm}}$ 仍高于北京^[28].

2.5 气溶胶类型分类

基于气溶胶光学厚度、粒径大小和吸收特性等

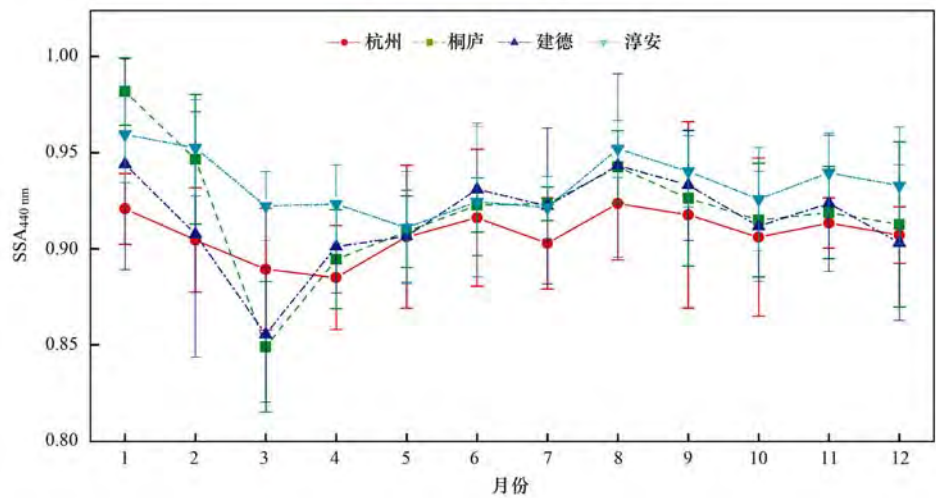


图8 SSA 逐月变化

Fig. 8 Monthly variations of SSA

大量表征气溶胶指标的参数可以对气溶胶进行分类^[42, 43]. 通常利用气溶胶光学厚度与波长指数的相对值或吸收性与消光性波长指数的相对值相结合的方法来识别不同类型的气溶胶^[44, 45]. Pace 等^[46]和 Kang 等^[47]认为绘制 AOD_{500nm} 和 $AE_{440-870nm}$ 的散点分布能更好地表征气溶胶特性, 通过计算它们物理意义上的群分布即可确定特定区域气溶胶所属的类型(图9). 本文采用该方法分析杭州不同地区气溶

胶的类型, 具体分型方法定义如下: $AOD_{500nm} < 0.3$, $AE_{440-870nm} > 1.0$ 为清洁大陆型 (continent clean, CC); $AOD_{500nm} < 0.3$, $AE_{440-870nm} < 0.9$ 为海洋型 (marine, MA); $AOD_{500nm} > 0.6$, $AE_{440-870nm} > 1.0$ 属于生物质燃烧/城市工业型 (biomass burning/urban industrial, BB/UI); $AOD_{500nm} > 0.7$, $AE_{440-870nm} < 0.7$ 为沙尘型 (desert dust, DD); AOD_{500nm} 和 $AE_{440-870nm}$ 数值不在上述范围内定义为混合型 (mixed, MX).

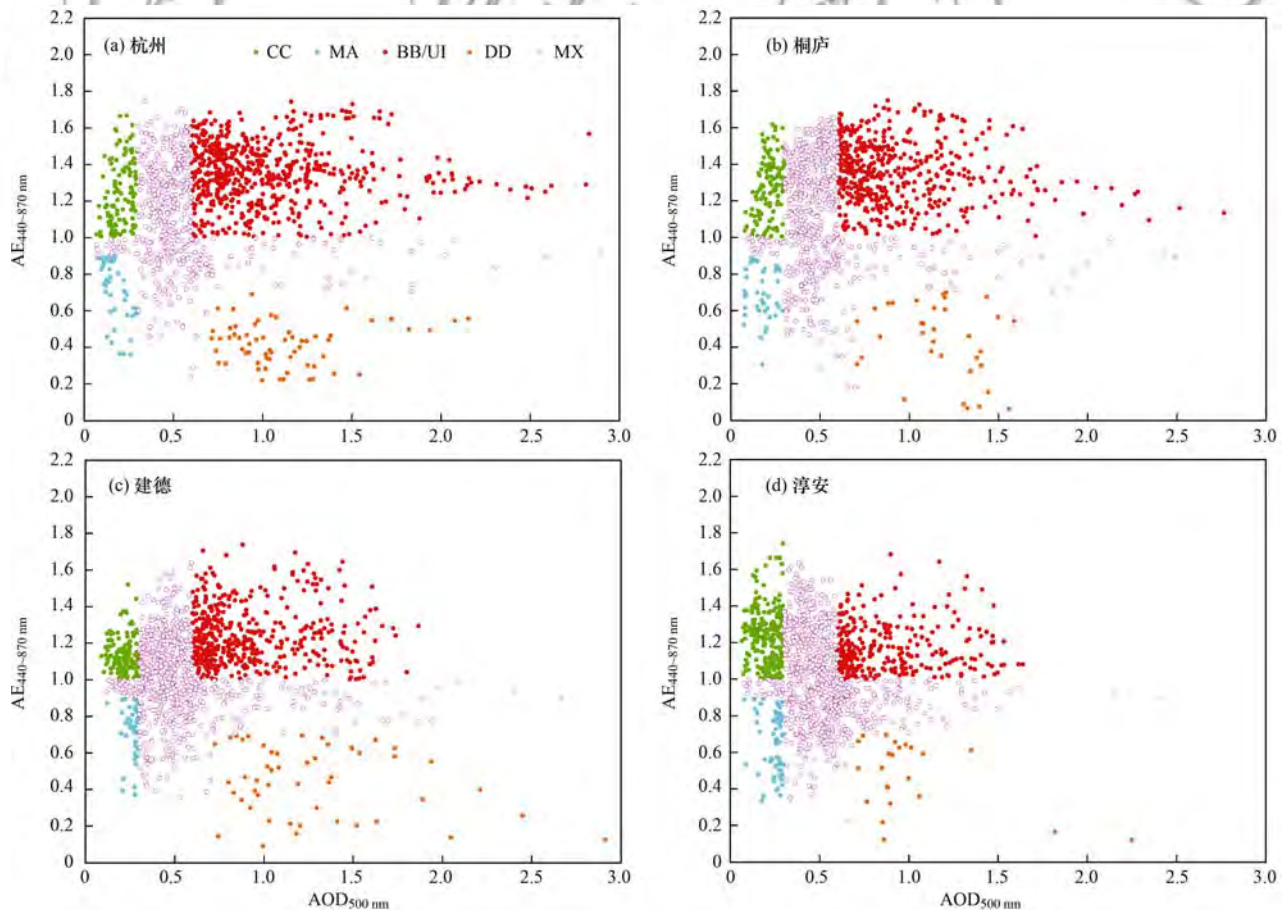


图9 气溶胶分类散点图

Fig. 9 Scatter diagram of the identified aerosol types

图9为各站点气溶胶类型散点图. 表1为各站点气溶胶类型占比, 从中可见, 杭州、桐庐、建德和淳安气溶胶类型主要以BB/UI和MX为主, 两种气溶胶类型累积占比分别为83.1%、85.1%、83.9%和76.5%. 其中杭州BB/UI占比最高, 接近50%, 表明杭州上空存在更多的细模态气溶胶, 具有明显的城市工业型气溶胶特征. 类似的特征在南京^[47]也被发现. 而桐庐和建德BB/UI比

例较杭州下降~10%及以上, MX占比升高至50%左右, 说明城乡区域存在更多的混合型气溶胶. 淳安BB/UI下降至20%以下, 而MX占比接近60%; 此外CC在淳安占比为17.3%, 约为其他地区的2倍, 反映出乡村地区上空洁净时期要明显高于城市和城乡地区. 虽然各地DD占比都较低(<5%), 但一定程度上体现出沙尘气溶胶输送对本区域产生了影响.

表1 不同气溶胶类型所占的比例

Table 1 Percentages of the aerosol types

地区	不同气溶胶类型所占的比例/%				
	CC	MA	BB/UI	DD	MX
杭州	8.9	3.4	45.5	4.6	37.6
桐庐	9.1	3.1	37.4	2.7	47.7
建德	9.3	3.1	32.5	3.7	51.4
淳安	17.3	4.6	19.4	1.6	57.1

3 结论

(1)2012年杭州、桐庐、建德、淳安AOD_{440nm}年均值分别为 0.94 ± 0.16 、 0.84 ± 0.17 、 0.82 ± 0.22 、 0.71 ± 0.20 , 呈现出至东北向西南逐渐下降的变化趋势. 由于观测站点所覆盖的区域常受同一个天气系统控制, 因此AOD呈现较为一致的月变化规律. 大量的人为和工业活动导致城市上空气溶胶负载要明显高于城乡和乡村地区, 但城市和城乡间气溶胶负载差异正在逐渐变小.

(2)2012年杭州、桐庐、建德、淳安AE_{440-870nm}年均值均大于1.0, 说明杭州地区主要以半径较小的气溶胶粒子为主. 春季的3~4月AE出现相对低值, 与北方带来的沙尘粒子远距离输送影响有关.

(3)杭州地区细模态粒子峰值半径春季、秋季和冬季均在 $0.15 \mu\text{m}$ 左右, 夏季在 $0.19 \sim 0.25 \mu\text{m}$ 左右, 这与高湿条件导致的气溶胶粒子吸湿增长有关. 不同地区夏季细模态粒子体积浓度是粗模态粒子的2.2~2.8倍; 杭州、桐庐和建德春季粗模态粒子体积浓度约为细模态粒子的1.2~1.4倍.

(4)2012年杭州、桐庐、建德、淳安SSA_{440nm}年均值 $0.91 \sim 0.93$, 说明该区域气溶胶粒子为中等强度吸收性气溶胶. 乡村地区SSA要高于城市地区, 说明吸收性气溶胶在城市地区比乡村地区占有更高比例. 杭州气溶胶类型表现为生物质燃烧/城市工业型, 而桐庐、建德和淳安以混合型为主; 淳安清洁大陆型气溶胶类型是其他地区的2倍.

参考文献:

- [1] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102** (D6): 6831-6864.
- [2] Che H, Zhang X Y, Xia X, *et al.* Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China

aerosol remote sensing network (CARSNET) 2002-2013[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (13): 7619-7652.

- [3] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 55.
- [4] Myhre G. Consistency between satellite-derived and modeled estimates of the direct aerosol effect[J]. *Science*, 2009, **325** (5937): 187-190.
- [5] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. *Nature*, 2001, **409** (6821): 695-697.
- [6] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, **297** (5590): 2250-2253.
- [7] Raizenne M, Neas L M, Damokosh A I, *et al.* Health effects of acid aerosols on North American children: pulmonary function[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1996, **104** (5): 506-514.
- [8] Holben B N, Tanré D, Smirnov T F, *et al.* An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106** (D11): 12067-12097.
- [9] Kleidman R G, O'Neill N T, Remer L A, *et al.* Comparison of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and aerosol robotic network (AERONET) remote-sensing retrievals of aerosol fine mode fraction over ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110** (D25): D22205.
- [10] Remer L A, Kaufman Y J, Tanre D, *et al.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, **62** (4): 947-973.
- [11] 施禅臻, 于兴娜, 周斌, 等. 北京不同污染事件期间气溶胶光学特性[J]. *环境科学*, 2013, **34** (11): 4139-4145.
Shi C Z, Yu X N, Zhou B, *et al.* Aerosol optical properties during different air-pollution episodes over Beijing [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (11): 4139-4145.
- [12] Xia X G, Chen H B, Goloub P, *et al.* Climatological aspects of aerosol optical properties in North China Plain based on ground and satellite remote-sensing data[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, **127**: 12-23.

- [13] Cheng T T, Xu C, Duan J Y, *et al.* Seasonal variation and difference of aerosol optical properties in columnar and surface atmospheres over Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 315-326.
- [14] Wang L C, Gong W, Xia X A, *et al.* Long-term observations of aerosol optical properties at Wuhan, an urban site in central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **101**: 94-102.
- [15] Zhao H J, Che H Z, Ma Y J, *et al.* Temporal variability of the visibility, particulate matter mass concentration and aerosol optical properties over an urban site in Northeast China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **166**: 204-212.
- [16] Zhuang B L, Wang T J, Li S, *et al.* Optical properties and radiative forcing of urban aerosols in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **83**: 43-52.
- [17] He Q S, Li C C, Geng F H, *et al.* Aerosol optical properties retrieved from sun photometer measurements over Shanghai, China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(D16): D16204.
- [18] Zhuang B L, Wang T J, Liu J, *et al.* The optical properties, physical properties and direct radiative forcing of urban columnar aerosols in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(2): 1419-1436.
- [19] Qi B, Hu D Y, Che H Z, *et al.* Seasonal variation of aerosol optical properties in an urban site of the Yangtze Delta Region of China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(11): 2884-2896.
- [20] 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 等. 太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2158-2164.
Rao J W, Ma R H, Duan H T, *et al.* Aerosol optical thickness of the atmospheric aerosol over Taihu lake and its features: results of in-situ measurements [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2158-2164.
- [21] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, *et al.* Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China aerosol remote sensing network [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D3): D03206.
- [22] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D16): 20673-20696.
- [23] Dubovik O, Holben B, Eck T F, *et al.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, **59**(3): 590-608.
- [24] Dubovik O, Sinyuk A, Lapyonok T, *et al.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(D11): D11208.
- [25] Li S, Wang T J, Xie M, *et al.* Observed aerosol optical depth and angstrom exponent in urban area of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 350-356.
- [26] Su X L, Cao J J, Li Z Q, *et al.* Multi-Year analyses of columnar aerosol optical and microphysical properties in Xi'an, a megacity in northwestern China [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(8): 1169.
- [27] Pan L, Che H Z, Geng F H, *et al.* Aerosol optical properties based on ground measurements over the Chinese Yangtze Delta Region [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(21-22): 2587-2596.
- [28] Yu X N, Lü R, Liu C, *et al.* Seasonal variation of columnar aerosol optical properties and radiative forcing over Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **166**: 340-350.
- [29] Zhang M, Ma Y Y, Gong W, *et al.* Aerosol optical properties and radiative effects: Assessment of urban aerosols in central China using 10-year observations[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **182**: 275-285.
- [30] Xia X G, Li Z Q, Holben B, *et al.* Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta Region of China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D22): D22S12.
- [31] 谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(6): 1146-1155.
Tan H B, Wu D, Deng X J, *et al.* Observation of aerosol optical depth over the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(6): 1146-1155.
- [32] Sun T Z, Che H Z, Qi B, *et al.* Aerosol optical characteristics and their vertical distributions under enhanced haze pollution events: effect of the regional transport of different aerosol types over eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(4): 2949-2971.
- [33] Tie X X, Cao J J. Aerosol pollution in China: present and future impact on environment [J]. *Particulogy*, 2009, **7**(6): 426-431.
- [34] Fu X, Wang S X, Cheng Z, *et al.* Source, transport and impacts of a heavy dust event in the Yangtze River Delta, China, in 2011 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(3): 1239-1254.
- [35] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, *et al.* Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 2. model simulation and validation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D9): 4262.
- [36] Eck T F, Holben B N, Dubovik O, *et al.* Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(D6): D06202.
- [37] 齐冰, 杜荣光, 于之锋, 等. 杭州市大气气溶胶光学厚度研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 588-595.
Qi B, Du R G, Yu Z F, *et al.* Aerosol optical depth in urban site of Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 588-595.
- [38] Fan X H, Chen H B, Xia X G, *et al.* Aerosol optical properties from the atmospheric radiation measurement mobile facility at Shouxian, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(D7): D00K33.
- [39] Wang Z Z, Liu D, Wang Z E, *et al.* Seasonal characteristics of aerosol optical properties at the SKYNET Hefei site (31.90°N, 117.17°E) from 2007 to 2013 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, **119**(10): 6128-6139.
- [40] Reid J S, Kinney J E, Westphal D L, *et al.* Analysis of measurements of Saharan dust by airborne and ground-based remote sensing methods during the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D19): 8586.
- [41] Cheng T T, Liu Y, Lu D R, *et al.* Aerosol properties and radiative forcing in Hunshan Lake desert, northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(12): 2169-2179.
- [42] Giles D M, Holben B N, Eck T F, *et al.* An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(D17): D17203.
- [43] Alam K, Trautmann T, Blaschke T, *et al.* Aerosol optical and radiative properties during summer and winter seasons over Lahore

- and Karachi [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 234-245.
- [44] Kumar K R, Sivakumar V, Reddy R, *et al.* Identification and classification of different aerosol types over a subtropical rural site in Mpumalanga, South Africa: seasonal variations as retrieved from the AERONET sunphotometer[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(1): 108-123.
- [45] Xia X, Che H, Zhu J, *et al.* Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 243-251.
- [46] Pace G, Di Sarra A, Meloni D, *et al.* Aerosol optical properties at Lampedusa (central Mediterranean). 1. Influence of transport and identification of different aerosol types [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(3): 697-713.
- [47] Kang N, Kumar K R, Yu X N, *et al.* Column-integrated aerosol optical properties and direct radiative forcing over the urban-industrial megacity Nanjing in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(17): 17532-17552.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): *Environmental Sciences*;剑桥科学文摘(CSA): *Pollution Abstracts*;剑桥科学文摘(CAS): *Life Sciences Abstracts* 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)