

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



**2020**

Vol.41 No.6  
第41卷 第6期

目次

|                                                            |                                                                |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源 .....                        | 林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)                               |
| 南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析 .....                             | 杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)                                       |
| 西安市PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化特征 .....                   | 黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)                                      |
| 新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响 .....                         | 刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536) |
| 长秋季生物物质燃烧对PM <sub>2.5</sub> 中WSOC吸光性的影响 .....              | 孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)                                  |
| 2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源 .....                       | 王倩 (2555)                                                      |
| 南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 .....                             | 曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)                                           |
| 郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析 .....                         | 任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)                       |
| 上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献 .....                            | 韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)                              |
| 北京市餐饮业大气污染物排放特征 .....                                      | 孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)               |
| 北京市农业机械排放因子与排放清单 .....                                     | 王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)                                            |
| 北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化 .....                                     | 李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)                                 |
| 基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析 .....               | 张颖蕾, 崔希民 (2617)                                                |
| 环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟 .....                             | 张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)                                |
| 岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析 .....                        | 周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)           |
| “河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析 .....                                 | 李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)                                           |
| 伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价 .....                            | 姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)                                  |
| 典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析 .....                                   | 赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)                               |
| 沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响 .....                       | 陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)                      |
| 丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素 .....                           | 李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)                          |
| 胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用 .....                                | 王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)                         |
| 不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较 .....                           | 桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)                              |
| 过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用 .....                               | 张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)                    |
| 基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例 .....                     | 王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)                                       |
| 不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径 .....                             | 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)                                    |
| 高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5 .....                     | 李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)                               |
| Fe-cyclam/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 体系催化降解罗丹明B机制 ..... | 余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)                                  |
| 微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO <sub>2</sub> -NTs为光阳极 .....       | 卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)                         |
| 缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性 .....                            | 陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)                          |
| HRT对改良式A <sup>2</sup> /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响 .....               | 赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)                            |
| 重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化 .....                      | 孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)                                   |
| 异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响 .....                        | 王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)                                   |
| 火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替 .....                       | 薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)                   |
| 游离胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响 .....                                 | 沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)                                            |
| 死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰 .....                      | 苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)                              |
| 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价 .....                                 | 陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)                                        |
| 土壤环境质量预警体系构建与应用 .....                                      | 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)                             |
| 不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系 .....                   | 毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)                                   |
| 长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征 .....                            | 宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)                        |
| 生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响 .....                        | 黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)                                             |
| 基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价 .....                        | 肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)                    |
| 重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素 .....                               | 胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)                          |
| 新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果 .....                               | 陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)                  |
| 三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征 .....                        | 李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)                                 |
| 滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布 .....                                | 张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)                  |
| 模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响 .....                                   | 王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)                        |
| 水肥气耦合对温室番茄土壤N <sub>2</sub> O排放及番茄产量的影响 .....               | 商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)                          |
| 矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用 .....                               | 尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)                                    |
| 海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价 .....                   | 汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)                                  |
| 春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析 .....                           | 贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)                                  |
| 热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估 .....                            | 蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)                                  |
| 长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年) .....                       | 蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)                                 |
| 《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)     |                                                                |

# 基于 MODIS\_C061 的长三角地区 AOD 与 Angström 指数时空变化分析

张颖蕾, 崔希民\*

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 以长三角为研究区, 利用 AERONET 地基观测的气溶胶光学厚度(AOD)数据, 验证了基于 MODIS\_C061 深蓝算法(DB)的 AOD 产品适用于长三角地区. 并利用 2000~2018 年 MOD04\_L2 产品, 分析研究区 AOD 和 Angström 指数(AE)的时空变化特征. 结果表明, 长三角地区 AOD 呈现东部和北部平原地区高、南部和西部山区低的空间分布, AE 呈现南部地区高北部地区低的空间分布. 2003~2007 年, AOD 年均值增长显著, 增长率为 23%, 2011 年以后逐渐下降; 2001~2003 年, AE 年均值增长迅速, 2012 年以后逐渐下降. AOD 在长三角地区呈现夏季最高、冬季最低的显著季节性变化, 月均值 6 月最高达 0.84, 8 月最低为 0.40; AE 呈现秋季最高, 春季最低的季节性变化, 月均值 9 月最高达 1.47, 3 月最低为 1.08. 根据 AOD 与 AE 的关系, 对长三角地区气溶胶类型进行了研究, 结果表明人为产生的城市工业气溶胶是该地区主要的气溶胶类型, 其次为混合型和清洁大陆型.

**关键词:** 长江三角洲; MODIS\_C061; 气溶胶光学厚度(AOD); 深蓝算法; 时空分布; Angström 指数(AE)

**中图分类号:** X513; X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2020)06-2617-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201909273

## Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS\_C061

ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min\*

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Considering the Yangtze River Delta as the research region, the applicability of the Terra-MODIS C061 deep blue algorithm (DB) AOD products was evaluated using Aerosol Robotic Network (AERONET) ground-based observations. The results demonstrated that the correlation between Terra-MODIS C061 deep blue algorithm (DB) aerosol optical depth (AOD) and AERONET AOD was high (0.95). Characteristics of spatial distribution and temporal variation of AOD and Angström exponent (AE) from 2000 to 2018 in the study area were analyzed using MOD04\_L2 products from 2000 to 2018. The results showed that the AOD in the Yangtze River Delta was distributed as “eastern and northern plains high and southern and western mountains low”. The AE showed a “northern low and south high” pattern. In terms of temporal distribution, from 2003 to 2007, the annual average AOD increased significantly, with a growth rate of 23%. After 2011, the AOD showed a downward trend. From 2001 to 2003, the annual average of AE rapidly increased, while after 2012, the AE decreased gradually. The AOD showed obvious seasonal changes in the Yangtze River Delta region, with high values in summer and low values in winter. The highest AOD was observed in June (0.84) in all monthly averages, while the lowest was observed in August (0.40). The seasonal average AE was high in autumn and low in spring. The highest AE of 1.47 was observed in September in all monthly averages, and the lowest of 1.08 was observed in March. Aerosol types in the Yangtze River Delta region were investigated according to the relationship between AOD and AE. The results suggested that the urban industrial aerosol was the main aerosol type in the region, followed by mixed type and clean continental aerosols.

**Key words:** Yangtze River Delta; MODIS\_C061; aerosol optical depth (AOD); deep blue; spatial and temporal distribution; Angström exponent (AE)

大气气溶胶通过吸收和散射太阳辐射以及与云相互作用进而影响云的微物理特性等方式直接或间接影响全球气候变化<sup>[1~3]</sup>. 气溶胶也是影响空气质量的关键因素, 短期或长期接触 PM<sub>2.5</sub> 会对人体健康产生不同程度的不良影响<sup>[4, 5]</sup>. 气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)和 Angström 指数(AE)是表征大气光学特性的两个基本参量, 是估算气溶胶直接辐射效应的重要参数<sup>[6, 7]</sup>. 研究气溶胶对环境和气候的影响在很大程度上取决于对其时空分布的了解<sup>[8]</sup>, 因此, 为了探讨气溶胶对区域气候和空

气质量的影响, 需要对 AOD 和 AE 的时空分布进行长期系统地估计.

中国作为世界上最大的发展中国家, 经济发展迅速. 气溶胶粒子是造成我国大部分城市空气质量差的主要有害污染物. 长三角为中国的沿海地区, 近年来, 工业发展和城市化进程加快, 大气污染日益严

收稿日期: 2019-09-30; 修订日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474217); 中央高校基本科研业务费专项(2010YD08)

作者简介: 张颖蕾(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气遥感, E-mail: 1367837326@qq.com

\* 通信作者, E-mail: cxm@cumt.edu.cn

重. 针对长三角地区气溶胶光学特性, 已有学者进行了大量的研究. Kang 等<sup>[9]</sup> 利用 2002 ~ 2014 年 MODIS C051 二级数据和 MISR 获取的气溶胶数据对南京地区的时空分布进行了分析. Li 等<sup>[10]</sup> 对 2011 年 4 月到 2012 年 4 月南京鼓楼站的气溶胶光学特性进行了研究. Kumar 等<sup>[11]</sup> 利用 2004 ~ 2015 年 MODIS\_C051 暗目标法获取长三角地区的 AOD 和 AE 并进行分析. Wang 等<sup>[12]</sup> 利用 2005 ~ 2015 年 MODIS C006 深蓝算法获取长三角地区的 AOD 和 AE 并进行分析. 高嵩等<sup>[13]</sup> 使用空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  MODIS 气溶胶产品分析了近 10 年以来长三角地区气溶胶特性的时空变化. 肖钟湧等<sup>[14]</sup> 利用太阳分光光度计 (CE-318) 对杭州市地面的气溶胶光学特性进行观测, 并基于 CE-318 地基数据对 MODIS 反演的气溶胶产品进行验证.

最新发布的 MODIS\_C061 大气产品改进了 MODIS\_C006 Level 2 和 Level 3 大气产品存在的问题, 并解决了 MODIS\_C006 大气产品中存在的搜索问题<sup>[15]</sup>. 本文利用 AERONET AOD 地基数据对长三角地区分辨率为 10 km 的 MODIS C061 DB AOD 产品进行适用性验证, 对 2000 ~ 2018 年长三角地区 MODIS C061 DB AOD 以及 AE 的时空分布进行分析, 并讨论两种光学参数的相关性, 通过得到该地区大气污染程度和污染类型, 以期政府部门治理环境提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域为位于中国东部沿海的长江三角洲地区, 包括安徽省、江苏省、上海市和浙江省, 研究区域及站点分布情况如图 1 所示. 近年来, 由于经济快速增长, 长三角地区的空气污染加剧, 使得该地区成为中国境内需要对气溶胶研究进行探索的热点地区之一.

### 1.2 数据来源

Terra(1999) 卫星上的 MODIS 仪器提供 0.405 ~ 14.385  $\mu\text{m}$  之间 36 个光谱波段的陆地、大气和海洋标准产品, 可见光通道 1 (660 nm) 和通道 2 (860 nm) 具有 250 m 星下点的空间分辨率, 3 ~ 7 通道具有 500 m 的空间分辨率, 其他通道的空间分辨率为 1 000 km<sup>[16]</sup>. Terra-MODIS 在近极地太阳同步圆轨道上飞行了近 20 年, 白天穿越赤道的时间为 10:30, 扫描宽度为 2 330 km, 每天提供近全球覆盖.

MODIS DB 算法以 1 km 的分辨率进行反演, 然后将像元聚合到 10 km 的反演框中. DB 算法期望误

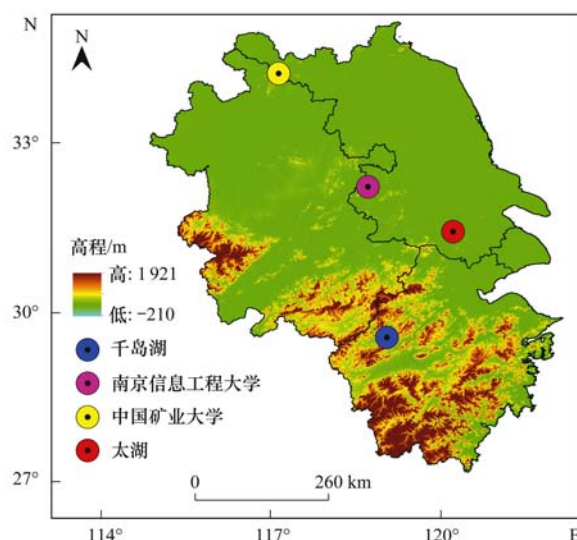


图 1 长三角地区 AERONET 站点位置分布示意

Fig. 1 Location of the aerosol ground sites over Yangtze River Delta

差 (EE) 约为  $\pm (0.05 + 20\% \cdot \text{AERONET AOD})$ <sup>[17]</sup>. 与 MODIS\_C006 DB 相比, C061 DB 算法在气溶胶模型、期望误差 (EE) 等各种因素上进行了改进<sup>[18]</sup>. 与 MODIS\_C061 DT 产品相比, C061 DB AOD 产品覆盖缺失部分少<sup>[19]</sup>. 本文选取 2000-03-01 ~ 2018-12-31 的 MODIS C061 “Deep\_Blue\_Aerosol\_Optical\_Depth\_550\_Land\_Best\_Estimate” 数据集对长三角地区 AOD 的时空分布进行分析. Angström 指数 (AE) 利用以下公式<sup>[20,21]</sup> 计算得出.

$$\text{AE} = -\ln\left(\frac{\text{AOD}_{470}}{\text{AOD}_{660}}\right) / \ln\left(\frac{470}{660}\right)$$

AERONET AOD 地基数据提供了气溶胶长期、连续和高精度的光谱特性<sup>[22]</sup>, 因此被用于验证 MODIS\_C061 DB AOD 产品在长三角地区的适用性. 从 AERONET 网站获取 3.0 版的太湖、千岛湖、中国矿业大学和南京信息工程大学这 4 个站点的日平均 AOD 数据, 与 2.0 版相比, 3.0 版 AERONET 处理算法在传感器特性和云检测算法等方面进行了改进<sup>[23]</sup>. AERONET 的 AOD 数据分为 3 级: L1.0 没有云过滤和质量验证; L1.5 完成了去云处理但没有质量验证; L2.0 完成了去云处理和质量验证. 由于太湖、中国矿业大学和南京信息工程大学这 3 个站点缺少部分或者全部的 L2.0 数据, 因而采用 L1.5 的数据进行验证, 具体数据情况见表 1.

### 1.3 数据处理

对 MODIS\_C061 DB AOD 和 AERONET AOD 数据作如下处理: 以 AERONET 站点为中心, 选取其周围 25 km 半径范围内 MODIS AOD 数据并取平均值. 与卫星过境时刻前后 30 min 内 AERONET 站的 AOD 数据的平均值相匹配<sup>[24]</sup>.

表 1 本文所用的 AERONET 站点数据  
Table 1 Data of AERONET sites in this study

| 站点       | 经度(E)/(°) | 纬度(N)/(°) | 海拔/m | 时间范围(年-月-日)             | 数据等级 |
|----------|-----------|-----------|------|-------------------------|------|
| 太湖       | 120.215   | 31.421    | 20   | 2005-01-01 ~ 2018-12-31 | L1.5 |
| 千岛湖      | 119.053   | 29.556    | 133  | 2007-01-01 ~ 2008-12-31 | L2.0 |
| 中国矿业大学   | 117.142   | 34.217    | 59.7 | 2013-01-01 ~ 2018-12-31 | L1.5 |
| 南京信息工程大学 | 118.717   | 32.206    | 62   | 2007-01-01 ~ 2010-12-31 | L1.5 |

2 结果与讨论

2.1 MODIS\_C061 DB AOD 与 AERONET AOD 的对比分析

如图 2 所示,MODIS\_C061 DB AOD(MYD04\_DB AOD)和 AERONET AOD 值之间具有良好的-一致性.在 0 ~ 4 的 AOD 范围内,MODIS\_C061 DB AOD 与 AERONET AOD 匹配的样本数为 1401 个.落在期望误差(EE)范围内的样本数百分比为 68.17%,MODIS\_C061 DB AOD 与 AERONET AOD 的相关系数  $R$  为 0.88,均方根误差(RMSE)为 0.22,表明该地区的 MODIS\_C061 DB AOD 与 AERONET AOD 有很好的相关性.验证结果表明,MODIS\_C061 DB AOD 适合描述长三角地区 AOD 的长期变化.

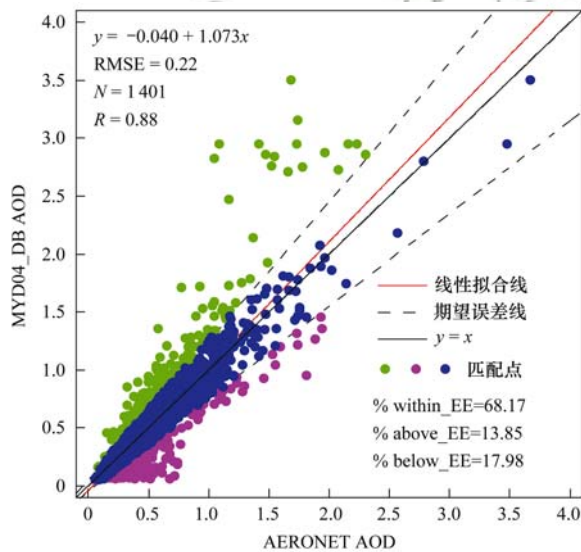


图 2 MODIS DB AOD 卫星数据与 AERONET 地基数据对比验证

Fig. 2 Validation of MODIS DB AOD product and AERONET AOD product

2.2 AOD 和 Angström 指数的空间分布特征

本文季节划分如下:春季(3 ~ 5 月)、夏季(6 ~ 8 月)、秋季(9 ~ 11 月)和冬季(12 月 ~ 次年 2 月).图 3 给出了长三角地区 2001 ~ 2018 年 AOD 季平均及年平均的空间分布.作为人口密集、工业发达且城市化程度较高的地区,长三角具有气溶胶排放高的特点.但由于地理位置、地形、气候和人类活动等因素的影响,不同区域又有所差异.年平均分布中高值区集中在东部和北部,这与人为产生的细粒子密切相关,也与自然产生粗粒子有关<sup>[25]</sup>. AOD 低值

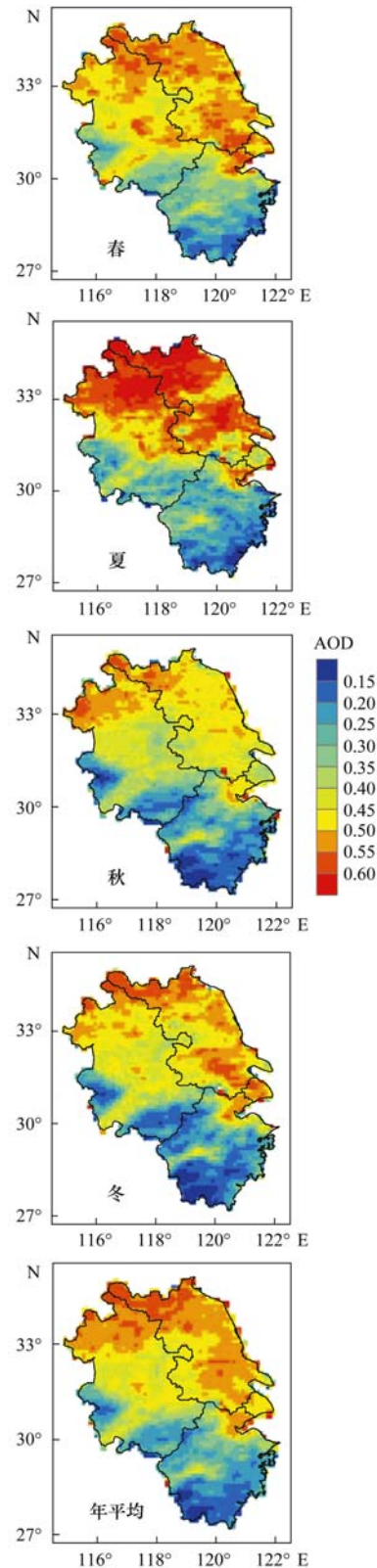


图 3 2001 ~ 2018 年季平均及年平均 AOD 的空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of seasonal and average AOD during 2001-2018

区为南部和西部的丘陵地区,主要原因可能是受地形因素的影响.此外,长三角的东部和北部地区也受到来自黄海、东海和渤海的海盐气溶胶的影响,使东部和北部气溶胶光学特性更加复杂<sup>[26]</sup>.春、夏两季的 AOD 值都明显高于秋、冬两季.夏季 AOD 值最高,平均值为  $0.57 \pm 0.13$ ,冬季 AOD 值最低,平均值为  $0.43 \pm 0.07$ .春季,大量的沙尘颗粒从西北方向输送到长江三角洲,导致长三角 AOD 值偏高.生物量燃烧的增加和人为活动的增强是导致夏季 AOD 升高的主要原因.秋冬季节由于大气中水汽条件较低导致气溶胶粒子的生成机制较弱,因而观测到的 AOD 值低<sup>[27]</sup>.与 C006 MOD04\_L2 DB AOD 的年平均空间分布<sup>[12]</sup>相比,空间分布大致相似,但北部地区 AOD > 0.8 的面

积减小.与 C006 MOD04\_L2 DB AOD 的季平均空间分布<sup>[12]</sup>相比,四季的季平均分布中,长三角南部地区 AOD > 0.4 的面积均减小.

图 4 是长三角地区 2001 ~ 2018 年 AE 季平均及年平均的空间分布.年平均空间分布中,长三角 AE 的高值区为中部和南部.季平均分布中,春季,长三角北部地区 AE 处低值区,浙江南部 AE 为高值区,这是由于长江中下游地区地势平坦,易于中国西北沙漠地区的沙尘气溶胶的输送与扩散.而浙江以南地区以山脉和丘陵地形为主,沙尘气溶胶粒子扩散受阻使得对当地气溶胶空间分布的影响没有长江北部强<sup>[28]</sup>.夏、秋和冬三季,较春季相比 AE 高值区面积增大,高 AE 值表明了大气中由生物量燃烧和化石燃料燃烧引起的人为细气溶胶增加<sup>[10]</sup>.

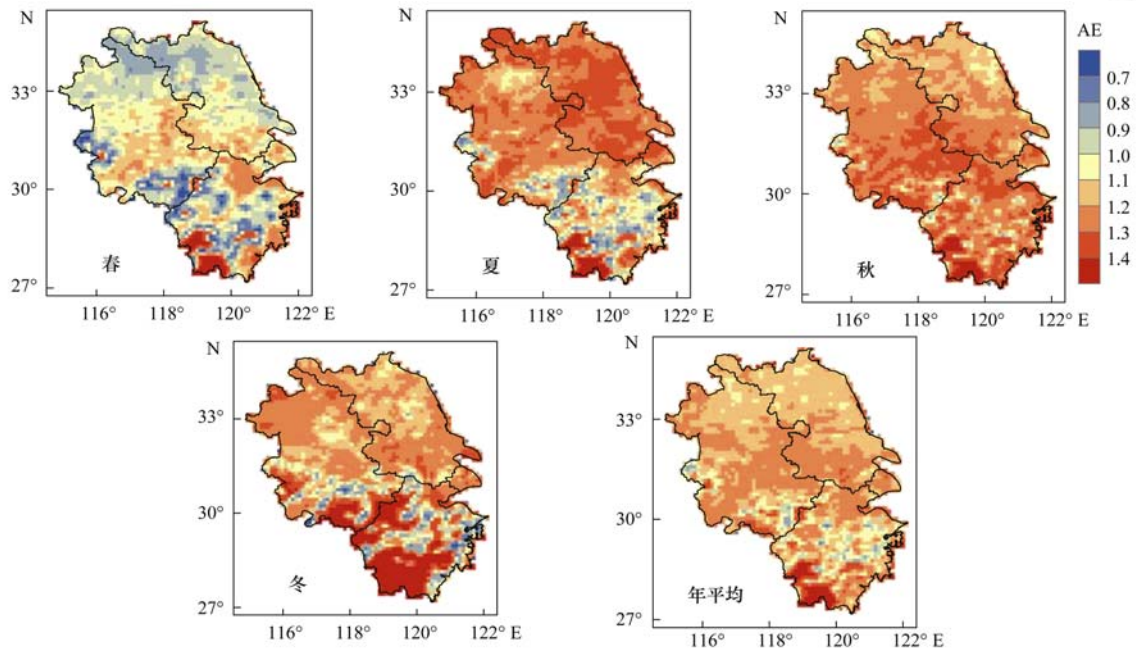


图 4 2001 ~ 2018 年季平均及年平均 AE 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of seasonal and annual average AE during 2001-2018

## 2.3 AOD 和 Angström 指数的时间变化

### 2.3.1 AOD 和 AE 以及经济发展指标 (GDP) 的年际变化

图 5 反映了 AOD 和 AE、GDP 的年际变化.2001 ~ 2018 年 AOD 的年均值在 0.40 ~ 0.67 之间,研究区近 18 年的 AOD 年均值为 0.55,2011 年最高,2018 年最低.2003 ~ 2007 年,AOD 增长显著,增长率为 23%,主要是由于经济的快速发展导致的<sup>[29]</sup>.2008 ~ 2009 年,AOD 的下降可能与 2008 年北京奥运会有关,当时中国的空气污染问题已被媒体关注,因此政府实施了一系列的减排措施,除此之外还可能与 2008 年全球经济危机有关<sup>[30]</sup>.2011 年以后,AOD 逐渐下降,环保政策的实施效果日益显著.AE 的年均值的范围 1.04 ~ 1.43,研究区近 18

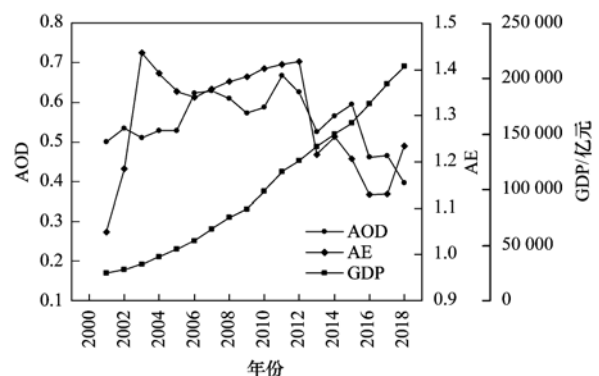


图 5 2001 ~ 2018 长三角地区 AOD、AE 和 GDP 的年际变化

Fig. 5 Annual changes of AOD, AE, and GDP in the Yangtze River Delta Region during 2001-2018

年的 AE 年均值为 1.29,2003 年最高,2001 年最低.2001 ~ 2003 年,AE 增长迅速,增长率为 37%,经

济发展使人为产生的气溶胶增多. 2012 年以后, AE 逐渐下降, 绿色生态发展使空气中的人为气溶胶减少.

2.3.2 AOD 和 AE 的季变化和月变化

图 6 中 AOD 和 AE 有明显的月变化, 表明不同来源区域的气溶胶类型和颗粒大小存在差异. 在整个研究期中, AOD 月平均值最高为 6 月, 月平均值为 0.84, 可能是由于华北平原处于秸秆焚烧的高峰期以及人类活动强度增强造成的<sup>[31,32]</sup>. 而 8 月的月均值最低, 为 0.40, 可能是由于夏季雨量充沛, 将浑浊的空气进行了冲刷<sup>[33]</sup>. 2、3 月的 AOD 月均值较高, 7~9 月的月平均较低, 而从图 7 中可以看出, 春

夏两季的 AOD 季均值高, 而冬季的 AOD 季均值低, 这可能是由于每月样本的选择与样本数不同造成的. AE 月平均最高值出现在 9 月, 为 1.47, 可能由于秸秆焚烧等人类活动产生的人为气溶胶增多造成的, 最低值在 3 月为 1.08, 可能是受到春季沙尘天气的影响. 从图 7 关于 AE 的季节变化得出, 秋季 AE 值最高, 平均值为  $1.35 \pm 0.13$ , 春季 AE 值最低, 平均值为  $1.18 \pm 0.16$ .

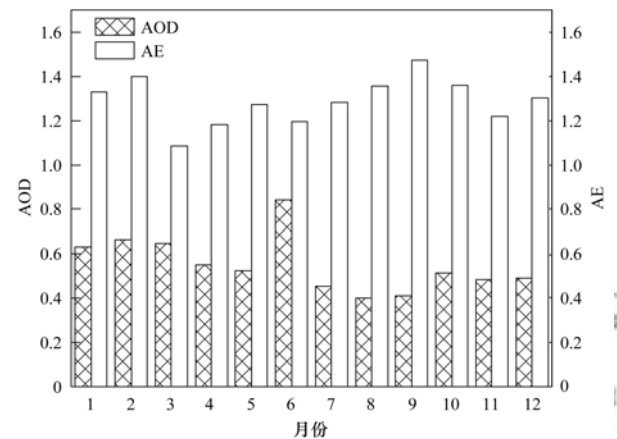


图 6 2000 ~ 2018 年长三角 AOD 和 AE 的月均值变化  
Fig. 6 Monthly mean distribution of AOD and AE in Yangtze River Delta during 2000-2018

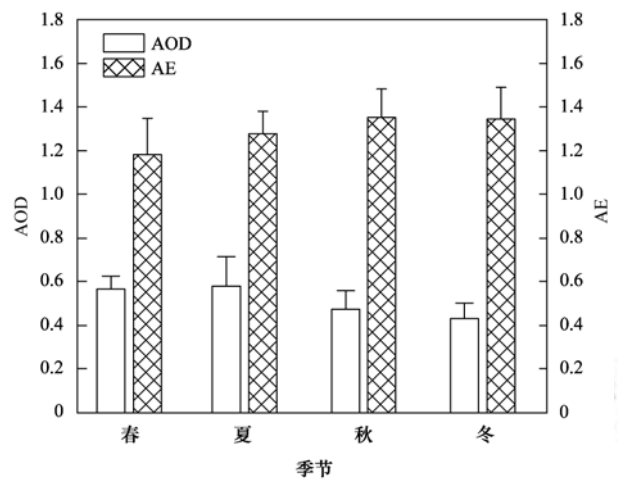


图 7 2001 ~ 2018 年长三角 AOD 和 AE 的季均值变化  
Fig. 7 Seasonal mean distribution of AOD and AE in the Yangtze River Delta during 2001-2018

2.4 AOD 和 AE 日均值的频率

图 8 是基于 AOD 和 AE 日均值得出的频率. 结果发现, 有效数据天数中, 50% 的天数  $AOD < 0.3$ ,

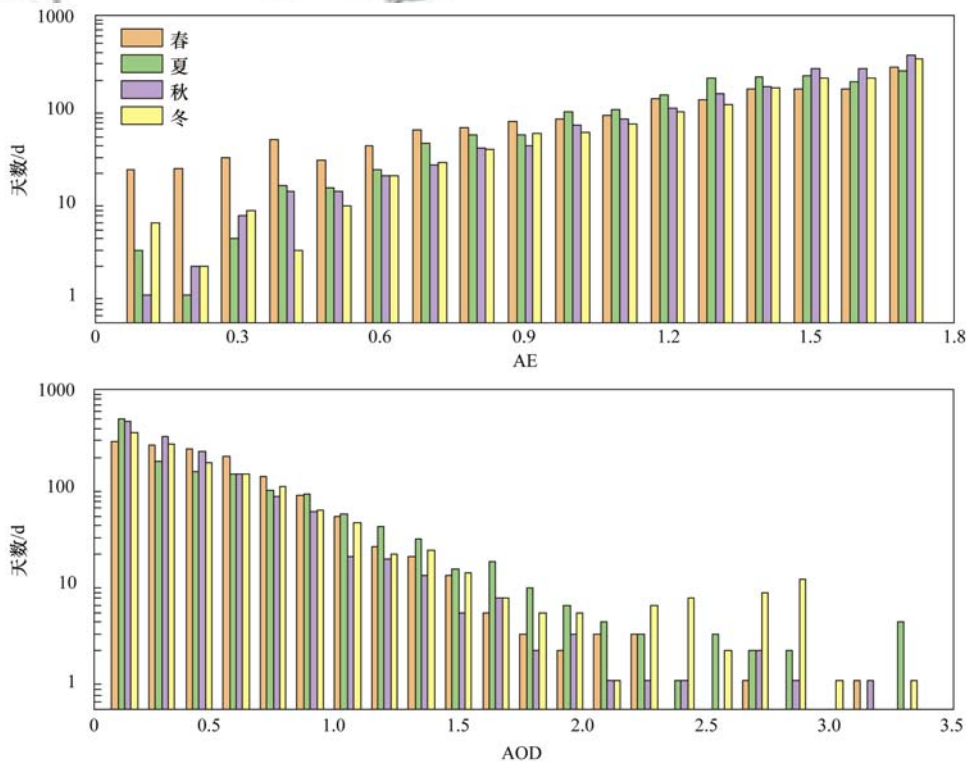


图 8 2000 ~ 2018 年每日 AOD 和 AE 的频率  
Fig. 8 Daily AOD and AE frequencies during 2000-2018

大气比较清洁, 34% 的天数  $AOD > 0.5$ , 大气污染较为严重. 四季均有数天  $AOD > 2.0$ . Angström 指数是衡量气溶胶粒子大小的一个重要光学参数. AE 的值越小, 说明大气中气溶胶粗粒子增加, AE 的值越大, 说明大气中污染物以细粒子为主<sup>[34]</sup>. 47% 的天数  $AE > 1.3$ , 说明影响长三角地区大气气溶胶的主要是细粒子.

## 2.5 基于 AOD 和 AE 的关系分析气溶胶类型

了解气溶胶的各种类型在长三角地区的变化有助于对气溶胶模型进行微调, 以减少气溶胶辐射强迫效应和气候效应的不确定性. 为了有效地对气溶胶类型进行分类, 采用了 AOD 和 AE 的日均值. 依据国内外学者对气溶胶的分类方法<sup>[11, 35]</sup>, 将气溶胶类型主要分为清洁海洋型 ( $AOD < 0.2$  和  $AE < 0.9$ )、清洁大陆型 ( $AOD < 0.2$  和  $AE > 1.0$ )、城市工

业型 ( $AOD > 0.3$  和  $AE > 1.0$ )、沙漠粉尘型 ( $AOD > 0.5$  和  $AE < 0.7$ ) 和不属于这些类型的混合型 5 种类型. 从图 9 中可以看出, 研究区域内存在各种类型的气溶胶. 在整个研究期间, 城市工业型所占比重最大, 说明与改革开放以来长三角地区经济持续快速增长密切相关. 其次为混合型, 可能与长三角地区气溶胶来源的复杂性相关. 而在利用 MODIS C5.1 暗目标法对长三角地区气溶胶分类的结果中, 混合气溶胶占比最大, 城市工业型其次<sup>[11]</sup>. 四季气溶胶类型分类中, 城市工业型所占比重都为最大, 春季中, 沙漠粉尘型气溶胶占比较其他季节大, 可能是受北方沙尘粒子远距离输送的影响<sup>[36]</sup>, 夏季城市清洁型气溶胶占比较其他季节大, 可能与夏季雨水充沛有关. 秋冬两季混合型其次, 接着为清洁大陆型, 其他类型占比较小.

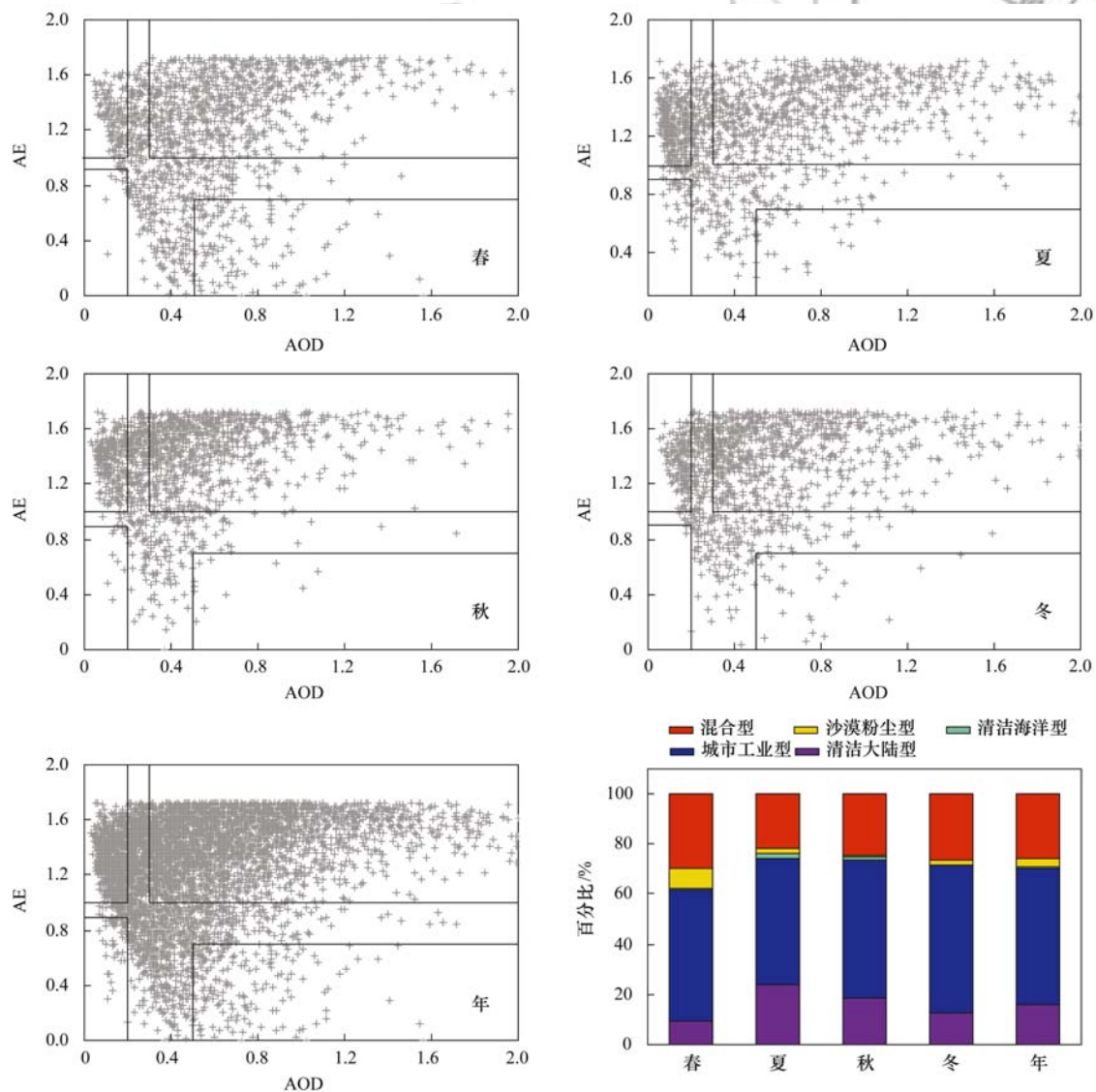


图9 2000~2018年主要气溶胶类型的四季日值分类和年度累计日值分类及其贡献百分比

Fig. 9 Seasonal and annual cumulative classification of major aerosol types based on daily data and their contribution percentage during 2000-2018

### 3 结论

(1) Terra-MODIS C061 DB AOD 与 AERONET AOD 的一致性较高, 相关系数  $R$  为 0.88, 均方根误差 (RMSE) 为 0.22, 且落在期望误差 (EE) 范围内的样本数百分比为 68.17%, 说明 C061 DB 算法适用于长三角地区。

(2) 本研究期间, 长江三角洲 AOD 的空间分布为北部和东部地区高, 南部和西部地区低, 时间分布上, AOD 季均值中夏季和春季数值高, 冬季数值低。月平均 AOD 值显示, AOD 月均值 6 月最高, 8 月最低。AE 的空间分布为南部地区高北部地区低, 时间分布上, AE 季均值秋季最高, 春季最低; AE 月均值 9 月最高, 3 月最低。

(3) 在 21 世纪初, 长三角地区 AOD 值逐渐增长, AE 增长迅速, 主要与该地区经济的增长有关。而近三年的 AOD 年均值较往年偏低, 这表明该地区贯彻绿色生态可持续发展理念, 环境整治初见成效。

(4) 长三角地区气溶胶类型分类中, 城市工业型气溶胶类型较其他类型所占比例最大, 其次为混合型 and 清洁大陆型, 其他类型占比较小。城市工业型气溶胶类型在 4 个季节气溶胶类型分类中所占比例都为最大, 春季沙漠粉尘型占比较大其他季节大, 夏季清洁大陆型占比较大其他季节大, 秋冬两季混合型其次, 接着为清洁大陆型, 其他类型占比较小。

#### 参考文献:

- [1] Stevens B. Rethinking the lower bound on aerosol radiative forcing[J]. *Journal of Climate*, 2015, **28**(12): 4794-4819.
- [2] Christopher S A. Satellite remote sensing methods for estimating clear sky shortwave top of atmosphere fluxes used for aerosol studies over the global oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(12): 3002-3006.
- [3] 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.
- [4] Di Q, Kloog I, Koutrakis P, *et al.* Assessing PM<sub>2.5</sub> exposures with high spatiotemporal resolution across the continental United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(9): 4712-4721.
- [5] 徐建辉, 江洪. 长江三角洲 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度遥感估算与时空分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3119-3127.  
Xu J H, Jiang H. Estimation of PM<sub>2.5</sub> concentration over the Yangtze Delta using remote sensing: Analysis of spatial and temporal variations[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3119-3127.
- [6] Yu X N, Kumar K R, Lü R, *et al.* Changes in column aerosol optical properties during extreme haze-fog episodes in January 2013 over urban Beijing[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **210**: 217-226.
- [7] 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-site measurements [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2158-2164.
- [8] 张勇, 银燕, 刘蕴芳, 等. 北京秋季大气气溶胶光学厚度与 Angström 指数观测研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1380-1389.  
Zhang Y, Yin Y, Liu Y F, *et al.* A observational study of aerosol optical depth and angstrom wavelength exponent over Beijing in autumn [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1380-1389.
- [9] Kang N, Kumar K R, Hu K, *et al.* Long-term (2002-2014) evolution and trend in collection 5.1 Level-2 aerosol products derived from the MODIS and MISR sensors over the Chinese Yangtze River Delta [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **181**: 29-43.
- [10] 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.
- [11] Kumar K R, Kang N, Yin Y. Classification of key aerosol types and their frequency distributions based on satellite remote sensing data at an industrially polluted city in the Yangtze River Delta, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, **38**(1): 320-336.
- [12] Wang X Y, Guo Z Y, Wang Y Y, *et al.* Monitoring temporal-spatial variations of AOD over the Yangtze River Delta, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, **32**(9): 2619-2632.
- [13] 高嵩, 许满锋, 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.
- [14] 肖钟湧, 江洪, 陈健, 等. 杭州市大气气溶胶光学特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(8): 1758-1767.  
Xiao Z Y, Jiang H, Chen J, *et al.* Monitoring the aerosol optical properties over Hangzhou using remote sensing data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1758-1767.
- [15] Filonchyk M, Yan H W, Zhang Z R. Analysis of spatial and temporal variability of aerosol optical depth over China using MODIS combined dark target and deep blue product [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **137**(3-4): 2271-2288.
- [16] 张云, 肖钟湧. 云南省气溶胶光学厚度时空变化特征的遥感研究[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(2): 127-133.  
Zhang Y, Xiao Z Y. Temporal-spatial variations characteristics of aerosol optical thickness using satellite remote sensing over Yunnan province, China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(2): 127-133.
- [17] Tian X P, Liu Q, Li X H, *et al.* Validation and comparison of MODIS C6.1 and C6 aerosol products over Beijing, China [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(12): 2021.
- [18] Sayer A M, Hsu N C, Lee J, *et al.* Validation, stability, and consistency of MODIS collection 6.1 and VIIRS version 1 deep blue aerosol data over land [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(8): 4658-4688.

- [19] Wang Y, Yuan Q Q, Li T W, *et al.* Evaluation and comparison of MODIS collection 6.1 aerosol optical depth against AERONET over regions in China with multifarious underlying surfaces[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **200**: 280-301.
- [20] Rupakheti D, Kang S C, Bilal M, *et al.* Aerosol optical depth climatology over Central Asian countries based on Aqua-MODIS collection 6.1 data: aerosol variations and sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **207**: 205-214.
- [21] Remer L A, Kleidman R G, Levy R C, *et al.* Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113** (D14): D14S07.
- [22] Mhawish A, Banerjee T, Broday D M, *et al.* Evaluation of MODIS collection 6 aerosol retrieval algorithms over Indo-Gangetic Plain: Implications of aerosols types and mass loading [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **201**: 297-313.
- [23] Giles D M, Sinyuk A, Sorokin M G, *et al.* Advancements in the aerosol robotic network (AERONET) version 3 database-automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**(1): 169-209.
- [24] Petrenko M, Ichoku C, Leptoukh G. Multi-sensor aerosol products sampling system (MAPSS) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, **5**(5): 913-926.
- [25] Luo Y X, Zheng X B, Zhao T L, *et al.* A climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, **34** (3): 863-870.
- [26] Deng X L, Shi C N, Wu B W, *et al.* Analysis of aerosol characteristics and their relationships with meteorological parameters over Anhui province in China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **109-110**: 52-63.
- [27] 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.
- [28] Yu X N, Lü R, Kumar K R, *et al.* Dust aerosol properties and radiative forcing observed in spring during 2001-2014 over urban Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(15): 15432-15442.
- [29] Qin W M, Liu Y, Wang L C, *et al.* Characteristic and driving factors of aerosol optical depth over mainland China during 1980-2017[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(7): 1064.
- [30] He Q Q, Zhang M, Huang B. Spatio-temporal variation and impact factors analysis of satellite-based aerosol optical depth over China from 2002 to 2015[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **129**: 79-90.
- [31] 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.
- [32] 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 等. 上海夏季 PM<sub>2.5</sub> 中有机物的组分特征、空间分布和来源 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (5): 1978-1986.
- Gao Y Q, Wang H L, Jing S A, *et al.* Chemical characterization, spatial distribution, and source identification of organic matter in PM<sub>2.5</sub> in summertime Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 1978-1986.
- [33] 李莹, 朱益民, 夏淋淋, 等. 长江流域夏季不同强度降水日数的时空变化特征[J]. *气象科学*, 2017, **37**(6): 808-815.
- Li Y, Zhu Y M, Xia L L, *et al.* Spatiotemporal variation of different intensity rainfall in the Changjiang River Basin in summer[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2017, **37** (6): 808-815.
- [34] 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.
- [35] Boiyo R, Kumar K R, Zhao T L. Spatial variations and trends in AOD climatology over East Africa during 2002-2016: a comparative study using three satellite data sets[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, **38**(1): e1221-e1240.
- [36] 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 等. 基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1604-1612.
- Qi B, Che H Z, Xu T T, *et al.* Column-integrated aerosol optical properties determined using ground-based sun photometry measurements in the Hangzhou region [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1604-1612.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                 |                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....                                               | LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)                 |
| Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China .....                                                                 | YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)         |
| Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Xi'an .....                                                                                                                    | HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)   |
| Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area .....                | LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536) |
| Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun .....                                               | MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)        |
| Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019 .....                                              | WANG Qian (2555)                                                  |
| Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn .....                                                                                     | CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)                    |
| Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou .....                                                                 | REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)    |
| Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China .....                                                                                | HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)       |
| Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing .....                                                                                                                              | SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)         |
| Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation .....                                                                                   | WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)                         |
| Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing .....                                                                                                                         | LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)        |
| Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061 .....                                                                          | ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)                                 |
| Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model .....                                                                                                   | ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)            |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir .....                  | ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)        |
| Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System .....                                                                            | LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)                   |
| Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area .....                                                                                  | JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)     |
| Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin .....                                                                                                                    | ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)        |
| Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu .....                                                   | CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)                   |
| Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting .....                                | LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)         |
| Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp. ....                                                                           | WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)    |
| Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels .....                                                         | SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)         |
| Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment .....                                                                                      | ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)        |
| Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed .....                                                  | WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)           |
| Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese .....                        | ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)           |
| Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate .....                                                                                                 | LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)            |
| Mechanisms of Fe-cyclam/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B .....                                                                                    | YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)     |
| Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO <sub>2</sub> -NTs as a Photoanode .....                                                                            | LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)         |
| Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR .....                                                                                      | CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)             |
| Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A <sup>2</sup> /O-BAF .....                                                                                           | ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)      |
| Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics .....                                                                                                                  | SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)               |
| Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity .....                                                             | WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)          |
| Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter .....                                                                   | XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)  |
| Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria .....                                                                                                    | SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)                   |
| Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge .....                                                        | SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)          |
| Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China .....                                                                                | CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)           |
| Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality .....                                                                                                       | LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)  |
| Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials .....                             | MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)      |
| Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management .....                                                                  | NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)       |
| Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops .....                                                        | HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)                            |
| Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale .....                                                                | XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)          |
| Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors .....                                                                                                 | HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)          |
| Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) .....               | CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)       |
| Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir .....                                          | LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)    |
| Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake .....                                                                            | ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)            |
| Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield .....                                                                                                                   | WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)   |
| Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N <sub>2</sub> O Emission and Yield in Greenhouse Tomato .....                                                                                  | SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)        |
| Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley ( <i>Hordeum vulgare</i> ) .....                                                                               | SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)          |
| Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province ..... | WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)     |
| Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring .....                                                     | HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)               |
| Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk .....                                | CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)      |
| Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016) .....                                                                          | JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972) |