

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期  
Vol.43 No.7

目次

|                                                                     |                                                     |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 .....                                     | 刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)                       |
| 基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 .....                            | 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)           |
| 基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 .....                                          | 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)               |
| 厦门港大气 PM <sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评价 .....                       | 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)               |
| 南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 .....                                       | 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)                       |
| 晋中盆地主要城市冬季 PM <sub>2.5</sub> 传输特征分析 .....                           | 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)                    |
| 鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 .....                                     | 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)                  |
| 济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP .....                                       | 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)                   |
| 长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 .....                                      | 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)              |
| 2019 年 7 月石家庄市 O <sub>3</sub> 生成敏感性控制策略解析 .....                     | 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)                           |
| 华北平原 AOD 时空演化与影响因素 .....                                            | 郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)                                  |
| 基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 .....                           | 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)                   |
| 基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 .....                                 | 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)              |
| 近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 .....                                         | 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)             |
| 高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 .....                                      | 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)              |
| 三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性 .....                                      | 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)              |
| 典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析 .....                                      | 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)                   |
| 骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 .....                                | 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)                    |
| 千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 .....                                      | 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)             |
| 泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 .....                                         | 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)                      |
| 降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 .....                                        | 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)          |
| 典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 .....                                        | 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)                    |
| 筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 .....                                  | 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)                         |
| 天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 .....                                    | 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)                   |
| 地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 .....                                    | 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)               |
| 北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 .....                                    | 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656) |
| 微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 .....                                      | 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)        |
| 不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 .....                                       | 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)                   |
| 微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd <sup>2+</sup> 吸附机制 .....                        | 马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)                            |
| 不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 .....                                            | 连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)                       |
| Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 .....                              | 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)             |
| 一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 .....           | 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)                    |
| 丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 .....                                        | 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)                 |
| 2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 .....                            | 徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)                       |
| 近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 .....                                 | 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)        |
| 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 .....                     | 何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)                             |
| 长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 .....                                         | 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)                         |
| 煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 .....                                        | 尚誉, 桑楠 (3773)                                       |
| 燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 .....                                        | 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)                |
| 广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性 .....                                         | 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)                    |
| 黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 .....                                         | 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)                  |
| 土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 .....                                          | 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)               |
| 添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 .....                                            | 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)    |
| 不同稻作系统土壤的 CH <sub>4</sub> 产生潜力与产生途径 .....                           | 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)                         |
| 东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 .....                                       | 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)                         |
| 同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 .....                               | 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)                        |
| 岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 .....                                    | 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)                       |
| 紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应 .....                                  | 王智慧, 蒋先军 (3876)                                     |
| 有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 .....                                     | 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)                     |
| 《环境科学》征订启事 (3403)      《环境科学》征稿简则 (3462)      信息 (3493, 3655, 3834) |                                                     |

# 基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系

郑玉蓉<sup>1,2,3</sup>, 王旭红<sup>1,2,3\*</sup>, 崔思颖<sup>1,2,3</sup>, 冯子豪<sup>1,2,3</sup>, 张秀<sup>1,2,3</sup>, 刘康<sup>1,2,3</sup>

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3. 陕西西安城市生态系统定位观测研究站, 西安 710127)

**摘要:** 气溶胶地基观测数据和颗粒物浓度数据的同步定量评估可为了解长安区大气污染的垂直分布特征, 制定合理的大气污染控制提供更有利的依据. 基于 CE-318 太阳光度计观测数据, 分析了 2018 年 10 月 ~ 2021 年 4 月西安市长安区月均和季均气溶胶光学特性分布和变化特征, 结合近地面颗粒物浓度数据, 分析了不同季节、不同污染程度下气溶胶光学厚度 (AOD) 对颗粒物浓度的响应. 结果表明: ①观测期间长安区 AOD 季节变化分明: 秋季 (1.02) > 冬季 (1.00) > 夏季 (0.63) > 春季 (0.47); AOD 月度、年际差异大, 2019 年 AOD (0.51) 略高于 2020 年 (0.48). ②整个观测期间长安区气溶胶主控模态存在明显的季节、月度差异, 从春季到冬季气溶胶主控模态逐渐从粗模态向细模态转变; 2019 年气溶胶主控模态的季节变化与整个观测时段类似, 2020 年各季节气溶胶 Angstrom 波长指数 (Angstrom) 分布稳定, 气溶胶粒子均以粗模态的形式存在; 整个观测时段来看长安区气溶胶类型以混合型气溶胶为主. ③AOD 和 Angstrom 的关系存在明显的季节差异, 春季大气污染以粗模态的气溶胶粒子为主导; 夏季的局部污染由粗、细模态的气溶胶粒子共同导致的, 明显污染时, 以细模态粒子为主导; 秋冬两季 AOD-Angstrom 特征分布类似, 局部污染时, 以粗模态的气溶胶粒子为主导, 明显污染时, 细模态的气溶胶粒子处于主导地位. ④长安区 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度的月度变化趋势一致, 最大值均出现在 1 月, 最小值均在夏季出现; PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度的季节变化明显, 冬季最高. ⑤不同季节、不同污染程度下 AOD 和颗粒物浓度均呈正相关关系, 但相关程度存在差异, AOD 与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的相关性大于与 PM<sub>10</sub> 浓度的相关性; 秋冬两季 AOD 与颗粒物浓度的相关性均大于春夏两季; 污染天气下 AOD 与颗粒物浓度的相关性更大; 颗粒物浓度是 AOD 变化最重要的决定因素, 其次为相对湿度, 是对长安区 AOD 变化解释率最高的气象因素, 即对 AOD 进行合理的湿度订正将有利于提高 AOD-颗粒物浓度的相关性.

**关键词:** 气溶胶光学厚度 (AOD); 太阳光度计; 颗粒物浓度; 时序变化; 长安区

中图分类号: X122; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3494-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109055

## Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an

ZHENG Yu-rong<sup>1,2,3</sup>, WANG Xu-hong<sup>1,2,3\*</sup>, CUI Si-ying<sup>1,2,3</sup>, FENG Zi-hao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xiu<sup>1,2,3</sup>, LIU Kang<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** The simultaneous quantitative investigation of aerosol ground observation data and particle concentration data is important for a better understanding of the vertical distribution characteristics of air pollution and formulating reasonable air pollution control measures in Chang'an, Xi'an. CE-318 measurements from October 2018 to April 2021 were systematically analyzed to reveal the seasonal and yearly variations in atmospheric aerosols in Chang'an. Then, the relationship between AOD and particle concentration in different seasons and different pollution degrees was explored. The obtained results were as follows: ① the seasonal variation in AOD in Chang'an was determined, whereby autumn (1.02) > winter (1.00) > summer (0.63) > spring (0.47). Distinct monthly and inter-annual differences in AOD were observed, showing that the annual average of AOD in 2019 was higher than that in 2020. ② Obvious seasonal and monthly differences in aerosol main control modes were observed; the dominant mode of aerosols gradually changed from coarse mode to fine mode from spring to winter. The seasonal variation in the main control mode of aerosols in 2019 was similar to that in the whole observation period. The seasonal aerosol Angstrom wavelength index (Angstrom) was evenly distributed in 2020, and aerosol particles existed in coarse mode form. Generally speaking, the aerosol type in Chang'an was mostly mixed aerosol throughout the whole observation period. ③ Significant seasonal variations in the relationship between AOD and Angstrom was shown, in which the air pollution in spring was dominated by coarse mode aerosol particles. The local pollution in summer was caused by coarse and fine mode aerosol particles, and the fine mode particles were dominant when the pollution was obvious. The characteristic distribution of Angstrom in autumn and winter was similar; in case of local pollution, the coarse mode aerosol particles were dominant, and in case of obvious pollution, the fine mode aerosol particles were dominant. ④ The monthly concentration variation trend of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Chang'an consistent with the maximum and minimum values appeared in January and summer, respectively. Seasonal variation in the concentration of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> was apparent, with the highest values in winter. ⑤ A positive correlation between AOD and particulate matter concentration in different seasons and pollution levels was obtained during the observation periods, but the correlation coefficient differed. The specific characteristics were as follows: the correlation between AOD and PM<sub>2.5</sub> concentration was greater than that with PM<sub>10</sub> concentration; the correlation between AOD and particle concentration in autumn and winter was greater than that in spring and summer; and the correlation between AOD and particulate matter concentration was greater in polluted weather. Particle

收稿日期: 2021-09-07; 修订日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971387, 41071271); 陕西省自然科学基金研究计划项目 (2020JM-430)

作者简介: 郑玉蓉 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市环境遥感, E-mail: zhengyurong@stumail.nwu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: jiqy\_wxh@nwu.edu.cn

concentration was the most important determinant of AOD change, followed by relative humidity, which was the meteorological factor with the highest interpretation rate of AOD change in Chang'an. This indicates that a higher correlation between AOD and particle concentration would benefit from a reasonable humidity correction of AOD.

**Key words:** aerosol optical depth (AOD); sun photometer; particle concentration; temporal variation; Chang'an

城市化和工业化进程的不断加速导致了诸多的城市环境问题,大气污染问题已成为备受关注的城市生态环境问题之一<sup>[1,2]</sup>. 大气气溶胶是悬浮在空气中的气态或固态颗粒物与气体载体组成的稳定的混合多相体系(如建筑扬尘、工厂废烟和花粉等),其尺度范围为  $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ <sup>[3~5]</sup>,复杂的物理化学属性和不均匀的时空分布使得其成为气候变化和气候强迫预测中最大的不确定因素<sup>[6~8]</sup>;同时,气溶胶对遥感定量监测、环境监测和人体健康有重要影响<sup>[9~11]</sup>. 气溶胶具有高度时空可变性,其物理光学特性随着时间、空间、气候条件、自然条件和能源结构等的变化而有所差异<sup>[12,13]</sup>,因此针对性地探索气溶胶浓度的时空分布特征对区域环境治理有重要意义.

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)是气溶胶粒子重要的光学参数之一,表征大气介质的消光系数在垂直方向的积分,用于描述气溶胶对光的消减作用<sup>[14,15]</sup>,与大气中悬浮的颗粒物浓度密切相关,可有效地反映大气的污染程度,预示着空气质量<sup>[5,9,12]</sup>;同时也是气溶胶气候效应和生态环境效应的关键因子,因而对其进行自动连续观测具有重要的理论和实践意义<sup>[12]</sup>. 地基遥感观测是最早的气溶胶特性观测手段,它可以提供持续观测的精准的气溶胶光学特性数据<sup>[4,16]</sup>. 基于地基观测仪器,国内外学者已经开展了广泛的气溶胶时空分布特征、气溶胶光学特性和城市气溶胶监测的研究<sup>[12,17~19]</sup>,为深入精准地研究区域大气环境变化特征提供了有力支撑.  $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 分别指空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 和 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物,主要通过可见光的消光而对大气能见度产生影响,组成成分复杂,空中悬浮时间长,降解难度大<sup>[20]</sup>. 快速的城镇化和工业化使得颗粒物变成大气污染的主要因素,污染物浓度不仅成为城市内部严重的环境污染问题,同时对区域和全球环境有重要影响<sup>[21,22]</sup>,此外PM在大气能见度、降雨和空气质量等方面也扮演着重要角色,对气候、环境和人体健康有重要影响<sup>[23]</sup>. 作为大气质量状况的又一重要指示,颗粒物浓度也可以很好地表征区域大气质量和污染状况.

对AOD和颗粒物浓度时空分布特征的同步监测可为了解不同垂直高度上大气污染状况提供依据;建立AOD与颗粒物浓度之间的关系,可以更加有效地监测区域大气污染物浓度变化,了解区域空

气质量状况,提供更加准确的空气质量信息,同时可以为区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的监测和预测提供依据. 目前针对AOD和颗粒物浓度的关系有相关研究<sup>[19,23,24]</sup>,但大多都是从整体上研究AOD和颗粒物浓度的关系,对不同污染程度下二者的关系以及气候因素控制下AOD对颗粒物浓度的响应研究不足,为此利用地基观测气溶胶光学特征数据和近地面颗粒物浓度数据从整个研究时段和不同污染程度两个角度出发,探析AOD与颗粒物浓度的关系以及颗粒物浓度对AOD时空变化的解释率,可以更加精确地了解区域污染程度,同时可以为基于卫星遥感的近地面颗粒物浓度预测提供参考.

长安区隶属于陕西省西安市,地处关中平原腹地,属于暖温带半湿润大陆性季风型气候. 地形条件复杂,南依秦岭,地势南高北低,东高西低. 其特殊的地理位置阻碍了大气污染物的扩散. 学者们已分别基于AOD和颗粒物浓度对西安市空气质量进行了大量的研究<sup>[25~28]</sup>,但对二者之间的关系研究较少. 为此本文基于地面遥感AOD观测数据展开研究: ①长安区AOD及颗粒物浓度变化特征分析; ②不同污染程度下AOD与颗粒物浓度的相关性分析以及气象因素控制下AOD对颗粒物浓度的响应关系. 以期综合了解长安区空气质量状况,针对性地加强长安区大气环境质量监测和生态环境建设提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 CE-318 观测数据

气溶胶地基观测数据来自西北大学城市与环境学院楼顶( $34.419^\circ\text{N}$ ,  $108.874^\circ\text{E}$ )的CE-318太阳光度计观测结果. CE-318型太阳光度计是一种自动跟踪扫描太阳辐射计. 该仪器在可见近红外波段有9个光谱通道,其自动跟踪扫描的太阳直射辐射测量数据可用来计算大气通透率,反演气溶胶光学和其他特性<sup>[12,29,30]</sup>. 本文基于观测数据主要对AOD和气溶胶Angstrom波长指数进行分析.

本站CE-318太阳光度计经定标后自2018年10月26日开始自动观测,观测时间间隔为15 min. 至2021年4月18日,共获得46867组观测数据. 考虑到数据观测的连续性,同时为使观测数据更具有代表性,按照AERONET的统一标准,将日观测数据不少于3个(仪器正常观测且太阳未完全被云层遮

盖)的观测日视为有效观测日<sup>[12]</sup>,累计得到有效观测日 593 d(表 1),以此来分析长安区 AOD 的时间变化特征.为保证数据的完整性和连续性,以每年 3

月~次年 2 月为一整年,将 3~5 月、6~8 月、9~11 月和 12~次年 2 月分别划分为春夏秋冬四季<sup>[31]</sup>.

表 1 有效观测日数量<sup>1)</sup>

Table 1 Number of valid AOD observation days

| 年度     | 季节 | 月份        | 各季节有效观测日数/d | 各月份有效观测日数/d |
|--------|----|-----------|-------------|-------------|
| 2018 年 | 秋  | 10 和 11   | 24          | 5 和 19      |
|        | 冬  | 12、1 和 2  | 57          | 19、22 和 16  |
| 2019 年 | 春  | 3、4 和 5   | 73          | 28、24 和 21  |
|        | 夏  | 6、7 和 8   | 63          | 19、24 和 20  |
|        | 秋  | 9、10 和 11 | 51          | 23、14 和 14  |
|        | 冬  | 12、1 和 2  | 65          | 26、16 和 23  |
| 2020 年 | 春  | 3、4 和 5   | 69          | 24、22 和 23  |
|        | 夏  | 6、7 和 8   | 50          | 15、19 和 16  |
|        | 秋  | 9、10 和 11 | 47          | 20、9 和 18   |
|        | 冬  | 12、1 和 2  | 65          | 19、26 和 20  |
| 2021 年 | 春  | 3 和 4     | 29          | 22 和 7      |

1) 2019 年和 2020 年四季观测数据完整,本文将其作为完整年度,分析气溶胶光学特性的四季变化特征

## 1.2 空气质量数据

长安区颗粒物浓度数据来源于中国空气质量在线监测分析平台历史数据(<https://www.aqistudy.cn/historydata/weixin.php>)和真气网(<https://www.zq12369.com/>)的长安区监测站点,该站点位于长安区中心城区,可以较好地体现长安区空气质量状况,同时,其位置上与西北大学长安校区比较靠近,可以减小空间匹配的误差.文中主要用来分析 AOD 与颗粒物浓度的关系以及颗粒物浓度对 AOD 变异的解释率.

## 1.3 气象数据

气象观测数据来自西北大学城市与环境学院气象观测站,观测仪器位于城市与环境学院楼顶.气象站观测时间周期为 1 min,观测数据包括相对湿度、气温、风速和风向等.获取与太阳光度计观测结果

同时段的气象资料,计算各气象数据的日均值,用以判别各因素对 AOD 的影响程度和 AOD 时间变化的主控因素.

## 2 结果与分析

### 2.1 AOD 变化特征分析

由观测时段 8 个波段 AOD 月均值时序图可以看出(图 1),所有波段 AOD 变化趋势基本一致,波长越长, AOD 值越小,且 AOD 值的变化幅度越小. 500 nm 处的 AOD 在数值上与整个短波谱段 AOD 的均值基本相当<sup>[18]</sup>,能够较好地反映全波段的 AOD 变化特征<sup>[4,12,13]</sup>,所以选择 500 nm 处的 AOD 地基观测值进行西安市长安区 AOD 分布特征的分析研究.

图 2 为观测期间长安区 AOD 季均值和月均值

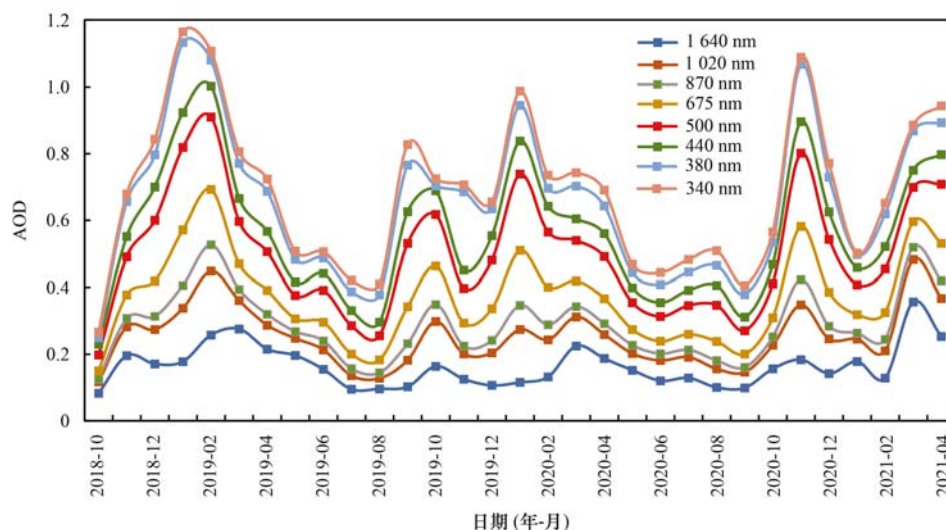


图 1 AOD 月度变化特征

Fig. 1 Variation in monthly means of AOD observations

对比. 由图 2(a) 可知, 观测时段 AOD 季均值为: 秋季 > 冬季 > 夏季 > 春季, 依次为: 1.02、1.00、0.63 和 0.47. 结合长安区气象、自然和生产生活状况, 分析其原因为: ①秋季 AOD 最高, 主要是缘于秋季长安区相对湿度较大 (平均值为 63.38%), 有利于气溶胶粒子吸湿增长, 且风速最低 (平均值为  $0.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 不利于气溶胶粒子的扩散, 整体而言, 秋季长安区处于一个低风速高湿度的有利于污染物堆积的大气环境中. ②冬季 AOD 高值主要受制于特殊的地形条件和气象条件, 冬季风速最高 (平均值为  $1.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 且盛行东风和东北风, 东风和东北风气流沿着渭河平原、关中盆地进入长安区, 大风将异地污染物传输到本地, 使得长安区成为异地气溶胶粒子的受体地区, 同时受秦岭山脉的阻隔, 造成大气污染物在本地堆积, 因而 AOD 值较高; 同时冬季长安区集中供暖燃煤会增加大气中颗粒物的浓度<sup>[26,31]</sup>. ③当相对湿度达到 60% 以后, 雾滴的存在将会加速细模态气溶胶粒子的沉降<sup>[32~34]</sup>, 结合图 3 可知夏季长安区以细模态的气溶胶粒子为主导 ( $\text{Angstrom} = 2.03$ ), 夏季大气相对湿度 (69.17%) 和气温 ( $25.81^\circ\text{C}$ ) 均最大, 丰沛的水分促进了细模态气溶胶粒子的沉降, 因而导致夏季 AOD 较低. ④长安区春季以干冷天气为主, 冷空气活动频繁, 风速较大 (平均值为  $1.73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 气温相对较低 (平均值为  $17.69^\circ\text{C}$ ), 相对

湿度较低 (平均值为 54.60%), 污染物不易堆积, 因而 AOD 较低. 2019 年除春季外, 其余季节 AOD 都高于 2019 年均水平. 2020 年春夏两季均值低于 2020 年均水平, 可能与 2020 年新冠疫情带来的人为污染排放源的减少有关.

比较 2019 年和 2020 年的季节均值. 2019 年 AOD 为: 秋季 ( $1.55 \pm 0.09$ ) > 夏季 ( $0.93 \pm 0.06$ ) > 冬季 ( $0.60 \pm 0.11$ ) > 春季 ( $0.49 \pm 0.06$ ); 2020 年 AOD 季均值为: 冬季 ( $1.41 \pm 0.06$ ) > 秋季 ( $0.49 \pm 0.22$ ) > 春季 ( $0.46 \pm 0.08$ ) > 夏季 ( $0.34 \pm 0.02$ ). ①相较于 2019 年春、夏和秋季, 2020 年春、夏和秋季的 AOD 分别下降 6.25%、64.05% 和 68.02%. 这可能是因为 2020 年初新冠疫情以来, 人类的生产生活活动大幅度减小, 人为性的气溶胶粒子来源减少. ②相比于 2019 年冬季, 2020 年冬季 AOD 上升 57.67%, 这一方面归因于逐步恢复的生产生活等经济活动, 另一方面说明冬季采暖燃煤对长安区 AOD 的贡献很大.

由图 2(b) 可知, 年内和年际 AOD 月均值波动都较大, 长安区月度 AOD 呈凹型变化特征, 观测期间 AOD 最大值出现在 2019 年 2 月 ( $0.91 \pm 0.54$ ), 最小值出现在 2019 年 8 月 ( $0.26 \pm 0.24$ ), 二者相差 3.56 倍, 表明长安区 AOD 逐月差异明显, 反映出长安区逐月生产生活状况、大气污染物排放以及气象条件的差异性和复杂性.

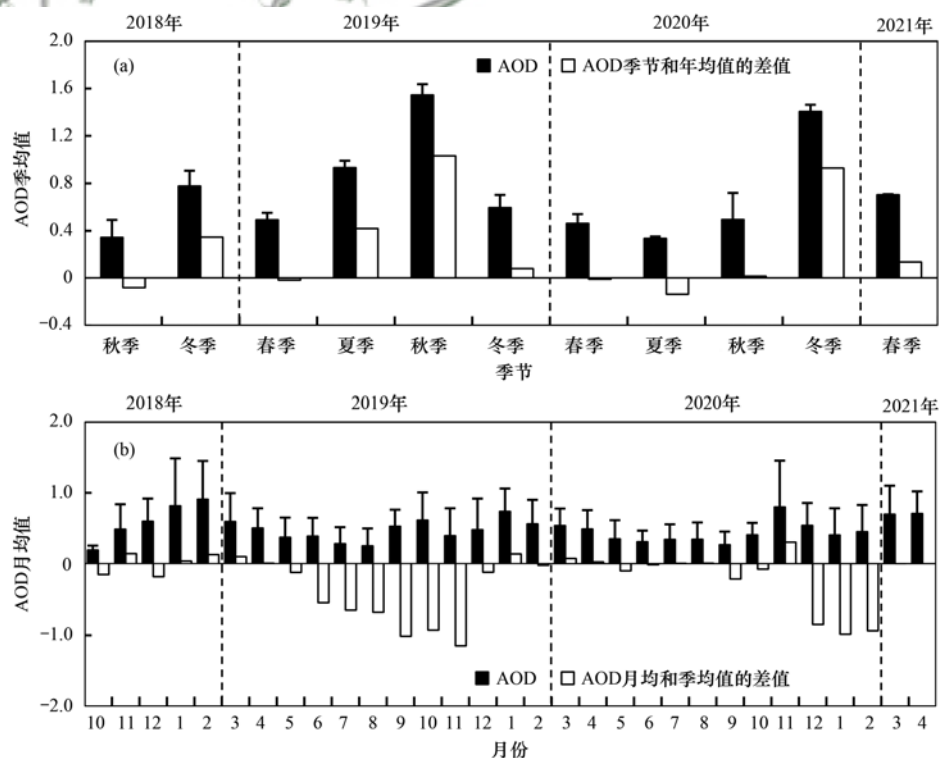


图 2 AOD 季节和月均值及其与年和季节均值的差值

Fig. 2 Seasonal and monthly AOD means and their differences from yearly and seasonal means

## 2.2 气溶胶 Angstrom 波长指数变化特征分析

气溶胶 Angstrom 波长指数 (Angstrom) 是气溶胶粒子的又一重要光学特性,其表示波长指数,表征 AOD 对波长的依赖关系和垂直气柱内气溶胶质粒的谱分布<sup>[13,25,35]</sup>,反映气溶胶粒子的尺度特征<sup>[29]</sup>,其值与气溶胶粒子的有效半径负相关,即 Angstrom 越大,气溶胶粒子的粒径越小. Angstrom 的范围一般为 0~2,学者们以 0.5 和 1 为节点,将 Angstrom 分为 3 种情况来表征气溶胶颗粒的大小:当 Angstrom > 1 时,气溶胶以细模态的形式存在,其中 Angstrom 接近 2 时,多以小粒径的烟雾粒子为主控粒子,当  $1.1 \leq \text{Angstrom} \leq 2.4$  时一般为城市工业-气溶胶,生物质气溶胶为  $1.2 \leq \text{Angstrom} \leq 2.3$ <sup>[36~38]</sup>;当 Angstrom < 1 时以粗模态的形式存在,当 Angstrom  $\leq 0.5$  时一般为沙尘气溶胶,Angstrom 接近 0 时,气溶胶主控粒子为大粒径的沙尘粒子<sup>[13,38]</sup>. 选用 440~870 nm 的 Angstrom 来分析西安市长安区气溶胶 Angstrom 波长指数分布特征.

长安区季均 Angstrom 存在明显的季节差异性 [图 3(a)],主要表现为:冬季(1.08) > 秋季(1.03) > 夏季(0.99) > 春季(0.82),依次为 1.08、1.03、0.99 和 0.82. 研究时段长安区 Angstrom 从春季到冬季逐渐增大,即从春季到冬季气溶胶粒子的粒径逐渐减小,表明主控粒子从春季到冬季逐渐从粗模态向细模态转变. 2019 年 Angstrom 变化特征和整个

研究时段变化特征相似,表现为:冬季( $1.20 \pm 0.06$ ) > 秋季( $1.13 \pm 0.28$ ) > 夏季( $0.99 \pm 0.11$ ) > 春季( $0.82 \pm 0.07$ ),从春季到秋季气溶胶粒子的粒径逐渐减小. 2020 年 Angstrom 较为稳定(0.86~0.98),2020 年气溶胶 Angstrom 除春季外均小于 2019 年,季均值由大到小依次为冬季( $0.98 \pm 0.13$ )、夏季( $0.94 \pm 0.12$ )、秋季( $0.94 \pm 0.021$ )和春季( $0.86 \pm 0.09$ ),表明 2020 年各季节气溶胶粒子均以粗模态的形式存在. 从图 3(b)可知,年内月均 Angstrom 波动较大,年际各月 Angstrom 均值变化不大. Angstrom 最大值出现在 2019 年 9 月( $1.51 \pm 0.18$ ),最小值出现在 2021 年 3 月( $0.58 \pm 0.30$ ).

## 2.3 AOD 和 Angstrom 频率分布特征

由图 4 可知,观测期间长安区 AOD 出现频率呈明显的单峰型分布特征,不同季节 AOD 高频分布区间存在差异,AOD 时序变化呈现复杂性和多样性. 以 AOD 最大出现频数的浓度范围为该地区大气气溶胶的本地浓度范围<sup>[13]</sup>,春季 AOD 出现频率最高区间为 0.4~0.5,占比为 18.02%;夏季 AOD 出现频率最高区间为 0.1~0.2,样本占比为 29.29%;秋季 AOD 出现频率最高区间为 0.2~0.3,占比为 27.12%;冬季 AOD 出现频率最高区间为 0.1~0.2,占样本的 18.16%. 各季节的 AOD 环境本底浓度都明显低于 AOD 季节平均值,观测时段秋季 AOD 的本底浓度和平均浓度都较高.

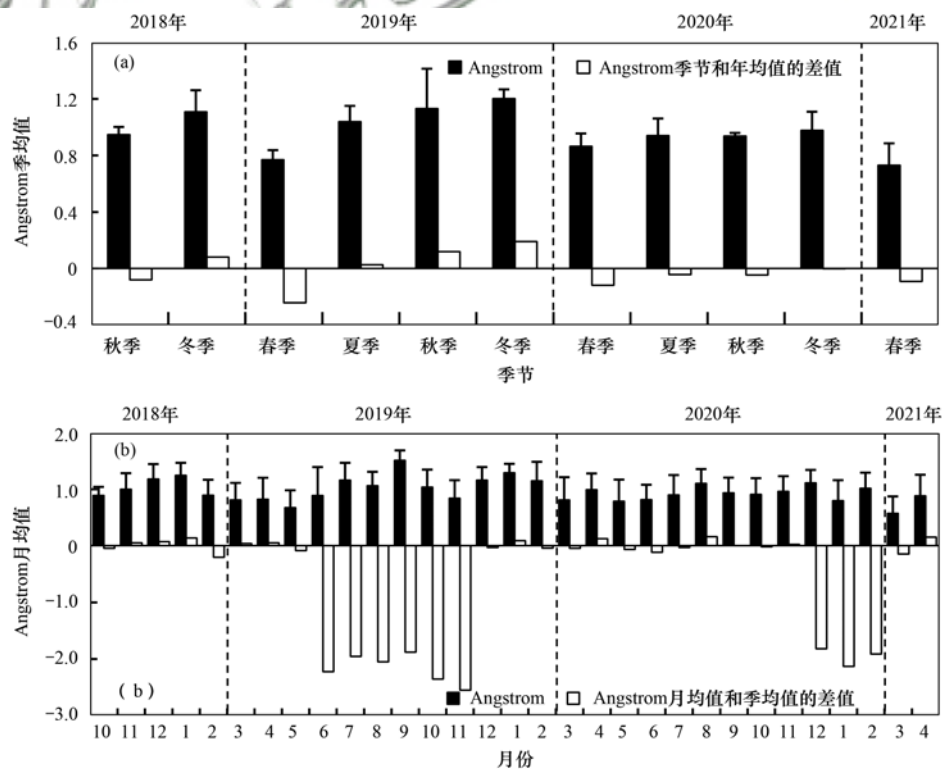


图3 Angstrom 季节和月均值及其与年和季节均值的差值

Fig. 3 Seasonal and monthly Angstrom means and their differences from yearly and seasonal means

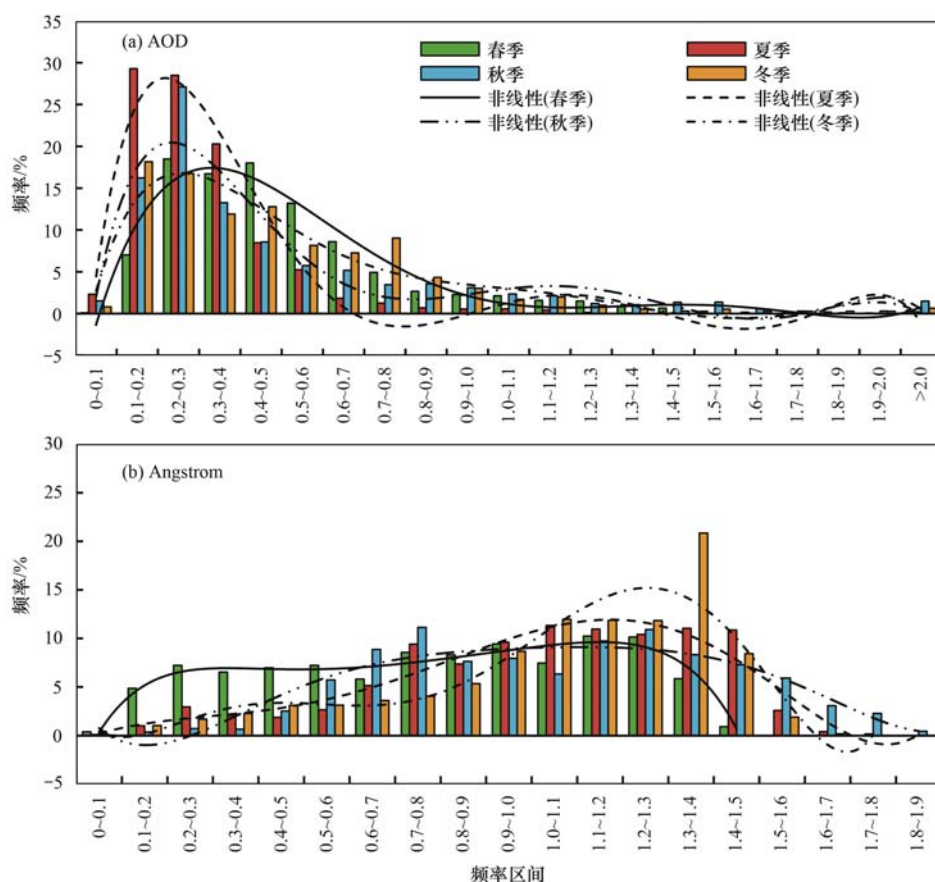


图4 AOD 和 Angstrom 频率分布特征

Fig. 4 Frequency distribution of the AOD and Angstrom

相比于 AOD 的频数分布特征, Angstrom 的频率分布更为均匀,但仍呈单峰分布,且具有明显的季节性差异. 春季 Angstrom 的最高出现频率区间为 1.1 ~ 1.3, 占比约为 20.39%; 夏季 Angstrom 出现频率最高区间为 1.0 ~ 1.1, 次高频率区间为 1.3 ~ 1.4, 分别占比为 11.35% 和 11.04%; 秋季 Angstrom 出现的最高和次高频率区间分别为 0.7 ~ 0.8 和 1.2 ~ 1.3, 分别占比 11.14% 和 10.91%; 夏、秋两季 Angstrom 的频率分布范围更加均匀,但相较而言秋季 Angstrom 的分布更复杂; 冬季最高出现频率范围为 1.3 ~ 1.4, 占比为 20.85%. 春季、夏季和冬季 Angstrom 的最高出现频率范围大于 1.0, 表明长安区气溶胶粒子的主控粒子以细模态粒子为主,但不同时间气溶胶粒子的粒径存在差异,属于城市-工业型气溶胶或者生物质燃烧气溶胶型,其主要来源于局地人为活动并非远距离的沙尘传输. 秋季不同时间段气溶胶粒子主控模态存在较大差异,粗模态气溶胶粒子和生物质燃烧/城市工业型气溶胶类型同时存在或交替出现. 由上述分析可知,长安区气溶胶正逐渐向着城市工业型转变. 采用 Pace 等<sup>[39]</sup>和 Kang 等<sup>[40]</sup>的方法进一步分析长安区气溶胶的类型(图 5),将观测时段长安区的气溶胶类型分为清洁

大陆型(continent clean, CC 型)、海洋型(marine, MA 型)、生物质燃烧/城市工业型(biomass burning/urban industrial, BB/UI 型)、沙尘型(desert dust, DD 型)和混合型(mixed, MX 型).

长安区气溶胶类型主要以 MX 型和 BB/UI 型为主,结合统计数据可知两种气溶胶类型累计占比为 75.05%,其中 MX 型占比最高,为 44.72%,反映了长安区气溶胶主控粒子的复杂性和多样性;其次为 BB/UI 型,占比为 30.33,表明长安区上空存在较多的细模态的气溶胶粒子,具有明显的城市工业型气溶胶特征. 虽然 DD 型占比较低,但一定程度上也表明了外源沙尘气溶胶的输送对本地的空气质量的影响. CC 型占比最少,反映出长安区空气质量仍处于较浑浊的状态,需得到相关部门进一步的关注和治理.

## 2.4 AOD 和 Angstrom 的关系

有研究表明,当 AOD < 0.02 时,城市上空呈现出干净状态, AOD < 0.2 时,表现出局部污染的状况,当 AOD > 0.4 时呈现出明显的大气污染状况<sup>[19,41]</sup>.

图 6 为长安区不同季节 AOD 和 Angstrom 的相关分布,进一步对其统计得到:春季局部污染状况

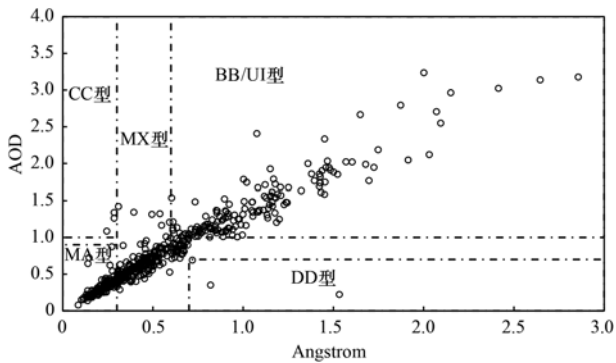


图5 气溶胶分类

Fig. 5 Classifications of the aerosols

下, Angstrom 小于 1 的占比为 92.4%, 即局部污染状况下以粗模态粒子为主导; 大气处于明显污染状态时, 粗模态和细模态粒子占比分别为 54.6% 和 45.4%, 其中当 AOD > 1 时, Angstrom 小于 1 的比例明显地增加(63.5%), 由此可见春季长安区大气污染主要由粗模态的气溶胶粒子导致. 夏季局部污染状况下, Angstrom 小于 1 和大于 1 的比例分别为 49.6% 和 50.4%, 说明在局部污染的状况下长安区夏季的大气污染是由粗模态和细模态的气溶胶粒子共同导致的; 在大气明显污染的状态下, Angstrom 大于 1 的部分明显增多(76.8%), 即细模态的气溶胶颗粒物明显增加, 表明人为源产生的污染物粒子

对夏季空气质量有明显的影响. 秋季, 局部污染状况下粗模态粒子占比(85%)约为细模态粒子(15%)的 5.73 倍, 在明显污染的大气状况下, 细模态粒子的占比明显增加, 约为 85.1%, 即秋季在局部污染情况下以粗模态的气溶胶粒子为主导, 而在明显污染状况下, 细模态的气溶胶粒子处于主导地位. 冬季与秋季的分布状况类似, 局部污染状况下, 以粗模态粒子为主导(56.5%), 明显污染状况下, 细模态粒子占比明显增加(82.6%).

## 2.5 AOD 与颗粒物浓度的关系

### 2.5.1 空气质量指数(AQI)和颗粒物浓度变化特征

观测时段内长安区 AQI、PM<sub>2.5</sub> 浓度和 PM<sub>10</sub> 浓度呈现出比较一致的月度变化趋势(图 7), 这可能与不同的颗粒物具有共同的排放源有关, 整体变化呈波浪形变化. 颗粒物浓度的月度分布很不均匀, 以呈单核分布为主, 部分月份呈现出双核分布特征. AQI 有 25%~75% 的区间分布在 50~150, 颗粒物浓度月度分布差异较大, 冬春两季数值较大且分布离散, 夏秋两季颗粒物浓度值小且数据分布较为集中. 2019~2020 年, AQI、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度的最高值都出现在每年的 1 月, 主要受冬季采暖以及春节假期期间人为污染物(如机动车排放等)的影响,

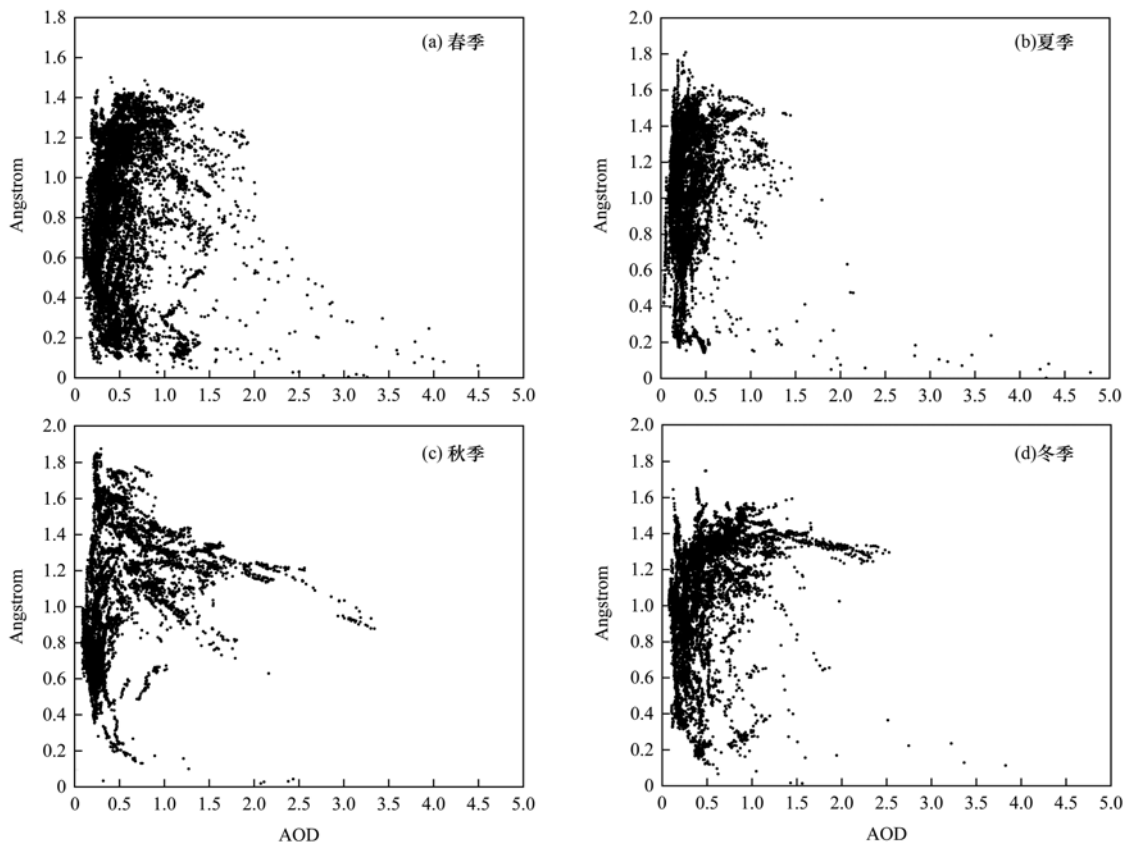
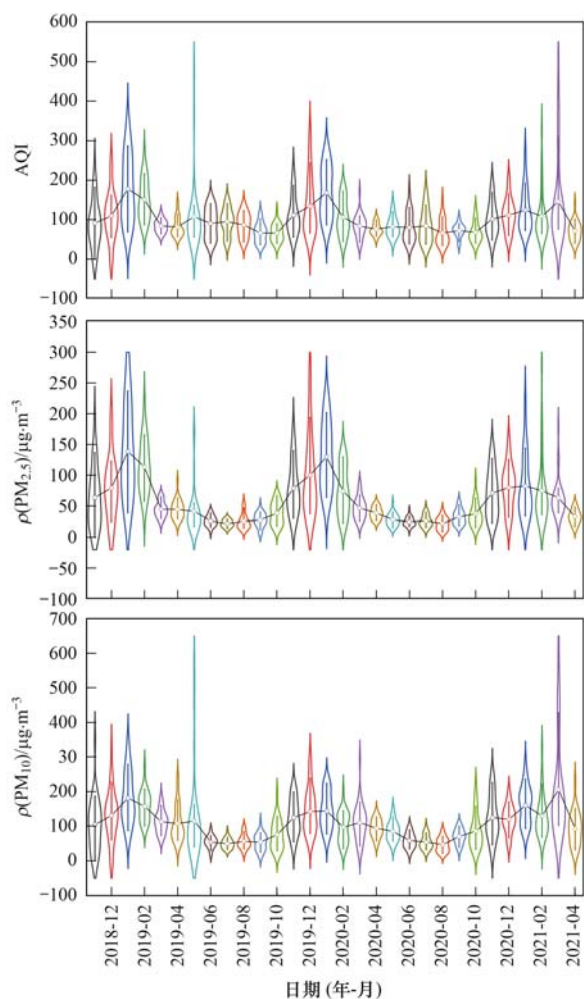


图6 AOD 和 Angstrom 的关系

Fig. 6 Relationship between AOD and Angstrom

2019 年和 2020 年 AQI 最低值均为 66, 分别出现在 10 月和 8 月. 2019 年  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  的最低值均出现在 7 月, 分别为  $22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 2019 年  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  和  $\rho(\text{PM}_{10})$  的最低值均出现在 8 月, 分别为  $22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 3~5 月多出现一个污染物浓度小高峰, 可能受春季频繁沙尘天气的影响.



外部框线的宽度和长度分别表示数据的分布频率和范围, 中间的彩色空心圆和彩色实线分别表示中值和标准差, 黑色的实线表示各指标的平均值的连线

图 7 长安区 AQI、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  月度浓度变化特征

Fig. 7 Monthly trend of AQI,  $\text{PM}_{2.5}$ , and  $\text{PM}_{10}$  concentration in Chang'an

观测时段内颗粒物的日均浓度波动范围较大的月份为 11 月~次年 2 月, 影响颗粒物浓度变化的因素具有多样性和排放源多点性, 局地人为污染源的排放、异地沙尘颗粒物的扩散和传输以及不利的气象、地形条件等都可能对颗粒物的浓度产生影响, 具体原因有待进一步分析研究. 以  $\text{PM}_{2.5}$  为例, 长安区颗粒物出现高浓度峰值较多的月份集中在冬季,  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  最高的月份达到  $139 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其浓度为最小月份的 6 倍. 夏季颗粒物浓度较低且月内范围波

动较小,  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  范围为  $22 \sim 28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 明显低于冬季, 污染程度明显低于冬季.

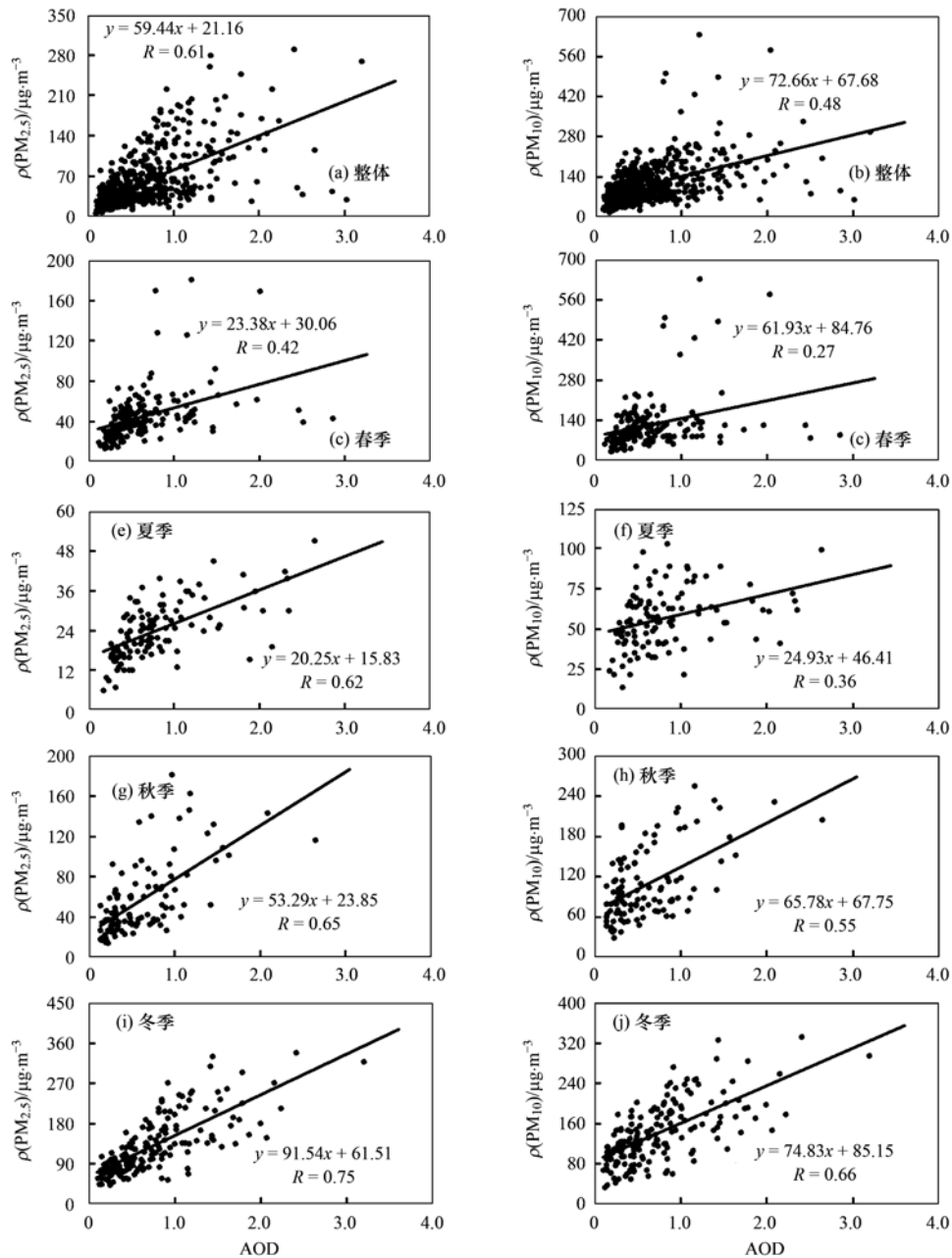
## 2.5.2 AOD 与颗粒物浓度相关性分析

从全年和季度两个尺度出发, 分析了 AOD 与  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度的相关性(图 8). 由图 8 可知, AOD 与所有颗粒物浓度都呈正相关关系, 但与不同颗粒物浓度的相关性存在差别. AOD 与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的相关关系要强于 AOD 与  $\text{PM}_{10}$  的浓度, 主要因为 AOD 是消光系数的积分, 气溶胶的消光主要来源于细粒子的消光, 粗粒子对气溶胶粒子消光作用的贡献相对较低<sup>[19,42]</sup>, 相较于  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$  中粗颗粒所占的比例更大<sup>[19]</sup>, 因此对气溶胶的消光作用的贡献也相对降低. 观测时段内全年 AOD 与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度呈正相关, 相关系数为 0.61. 通过对全年和各个季节中 AOD 与颗粒物浓度的相关性分析结果可以看出, 在 AOD 值较低时, AOD 与颗粒物浓度分布更密集, 颗粒物浓度与 AOD 所占比例更多, 同时,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度与 AOD 的相关性更大, 表明在 AOD 值较低时粒径较细颗粒物消光作用更强.

AOD 与颗粒物浓度的相关性存在季节差异性. 不同季节 AOD 与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的相关性排序为: 冬季 (0.75) > 秋季 (0.65) > 夏季 (0.62) > 春季 (0.42); AOD 与  $\text{PM}_{10}$  浓度的相关性排序为: 冬季 (0.66) > 秋季 (0.55) > 夏季 (0.36) > 春季 (0.27). 这种相关性的差异反映出了不同季节气溶胶粒子的浓度和理化性质的差异, 以及气象条件的差异对 AOD 与颗粒物浓度关系的影响. 由图 1 和图 2 可知, 9 月之后 AOD 均在一定程度上增加, 与颗粒物浓度呈现出相似的变化趋势, 均出现一个小高峰. AOD 和颗粒物浓度的相关性在秋冬两季较好, 一方面说明秋季、冬季气溶胶粒子的消光作用主要来源于颗粒物, 另一方面可能缘于秋冬季逆温、高湿和多雾天气的影响<sup>[10]</sup>. AOD 与浓度的相关性在春夏两季较差, 这主要与二者量化方式的差异, 气溶胶粒子的理化性质和夏季气候特点有关: 夏季随着温度 (平均值为  $25.81^\circ\text{C}$ ) 和湿度 (平均值为 69.17%) 的不断升高, “气-粒”转化加剧加速, 同时, 夏季太阳辐射强, 气溶胶粒子经过光化学反应已生成二次气溶胶, 从而导致 AOD 的升高<sup>[43]</sup>; 颗粒物测量的则是干气溶胶粒子的浓度, 风速的扩散, 雨水的冲刷等都会使得干粒子的浓度减小<sup>[44]</sup>, 物理意义和量化方式上的差异导致二者数值上的差异, 从而导致夏季二者相关性较差.

## 2.5.3 不同污染程度下 AOD 对颗粒物浓度的响应

根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中发布的标准, 将观测时段分为非污染天气 (清洁天

图8 AOD与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 浓度的关系Fig. 8 Correlation between AOD and the concentration of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$ 

气)和污染天气(轻度污染、中度污染和重度污染).由表2可知,非污染和污染天气情况下,AOD的平均值分别为0.46和0.77,污染天气下AOD是非污染天气时的1.67倍,污染天气和非污染天气条件下Angstrom分别为1.07和0.65,污染天气下Angstrom约为非污染天气时的1.65倍,即相较于非污染天气条件,污染天气时气溶胶粒子的主控模态为粒子粒径相对更小的细模态粒子.对观测时段颗粒物浓度的分析发现: $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别为 $55.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $101.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,非污染天气下, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别为 $37.78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $77.28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,污染天气下, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别为

$89.89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $162.95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .整个观测时段, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 范围为0.14~1.02,非污染天气的 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 为0.46,污染天气的 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 为0.55,轻度、中度和重度污染条件下 $\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{PM}_{10})$ 分别为0.48、0.68和0.75.污染天气下细颗粒物的富集程度高于非污染天气条件下,说明污染天气条件下大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 存在更为稳定的浓度变化关系.

通过对长安区不同污染条件下AOD与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 浓度的相关性分析发现,非污染天气和污染天气AOD与颗粒物浓度都呈正相关关系.非污染天气下,AOD与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 $\text{PM}_{10}$ 浓度的相关

性分别为 0.38 和 0.27,污染天气下 AOD 与颗粒物浓度的相关性比非污染天气下更大,分别 0.61 和 0.46. 非污染天气下, AOD 与  $PM_{2.5}$  浓度相关性更高,即非污染天气下  $PM_{2.5}$  对大气的消光作用更大,但气溶胶粒子的消光作用并不完全缘于颗粒物,气象因素的周期性变化,人为活动的周期性开展以及突发的偶然因素等也会对 AOD 和颗粒物浓度的相关性产生一定的影响<sup>[19]</sup>. 污染天气时,

表 2 不同污染程度下 AOD、气溶胶 Angstrom 指数、AQI、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度的分布特征

| Table 2 Distribution characteristics of AOD, Angstrom, AQI, and the concentration of $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$ under different pollution levels |      |          |        |                                     |                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|--------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 污染程度                                                                                                                                           | AOD  | Angstrom | AQI    | $\rho(PM_{2.5})/\mu g \cdot m^{-3}$ | $\rho(PM_{10})/\mu g \cdot m^{-3}$ |
| 非污染天气                                                                                                                                          | 0.46 | 0.65     | 69.61  | 35.78                               | 77.28                              |
| 污染天气                                                                                                                                           | 0.77 | 1.07     | 153.45 | 89.89                               | 162.95                             |
| 轻度污染                                                                                                                                           | 0.61 | 0.86     | 120.08 | 63.78                               | 132.92                             |
| 中度污染                                                                                                                                           | 1.11 | 1.52     | 170.89 | 112.32                              | 165.36                             |
| 重度污染                                                                                                                                           | 1.07 | 1.46     | 235.53 | 170.63                              | 228.89                             |

2.5.4 气象因素控制下 AOD 对颗粒物浓度的响应

综合颗粒物浓度和气温、相对湿度、风速等气象因素,利用逐步回归分析方法判定不同污染程度下各因素对 AOD 变化的综合解释能力(表 3).  $R^2$  表示除该影响因子之外的其他因子对 AOD 进行逐步回归的决定系数,其值越小说明该因子对 AOD 变化的解释能力越强.  $\Delta R^2$  表示在其他影响因子的基础上加入该因子时回归方程决定系数的增量,其大小表示着该影响因子在回归方程中的重要程度<sup>[45]</sup>.

非污染天气条件下,5 个因子对长安区 AOD 变化的综合解释能力为 39.9%,其中  $PM_{2.5}$  浓度的影响最大,其  $R^2$  为 0.148,表明在不考虑  $PM_{2.5}$  浓度时,其他影响因子仅能解释 AOD 变化的 14.8%,  $\Delta R^2$

AOD 与  $PM_{2.5}$  浓度和  $PM_{10}$  浓度的相关系数明显增大,表明了污染天气下颗粒物对大气消光作用增强,同时污染天气条件下,细颗粒物的富集程度更高,进一步说明了粒径更小的颗粒物成为大气污染的主要物质. 此外,污染天气过程多产生于静稳的天气条件下,逆温层的存在抑制了污染物的垂直运动和湍流交换,这也是污染天气下 AOD 和颗粒物相关性更大的又一原因.

最大,为 0.251,表明加入  $PM_{2.5}$  浓度时回归方程对 AOD 变化的解释能力增加 25.1%,其次为相对湿度、风速和  $PM_{10}$  浓度,分别能使回归方程的解释率增加 7.2%, 2.3% 和 0.6%. 相较非污染条件下,污染天气条件下 5 个因子对 AOD 时间变异的综合解释率增大,为 45.8%, $PM_{2.5}$  浓度的影响仍最大,当将其引入到回归方程时,可使得回归方程的解释能力增加 8.1%,污染天气时, $PM_{10}$  浓度对 AOD 变化的解释能力较非污染情况下有所增加,能使得方程的解释率增加 0.7%. 由此可见,气溶胶的消光主要来源于细粒子的消光贡献,粗粒子的消光贡献相对较低,不同天气条件下气象因子对 AOD 变化的影响的叠加会使颗粒物浓度对 AOD 的解释能力发生变化.

表 3 颗粒物和气象因素对 AOD 变异的逐步回归分析结果

| Table 3 Stepwise regression analysis of particulate matter and climatic factors contributing to variability in AOD |       |              |               |       |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|---------------|-------|--------------|
| 非污染天气                                                                                                              |       |              | 污染天气          |       |              |
| 影响因子                                                                                                               | $R^2$ | $\Delta R^2$ | 影响因子          | $R^2$ | $\Delta R^2$ |
| $PM_{2.5}$ 浓度                                                                                                      | 0.148 | 0.251        | $PM_{2.5}$ 浓度 | 0.377 | 0.081        |
| 相对湿度                                                                                                               | 0.327 | 0.072        | 相对湿度          | 0.425 | 0.033        |
| 风速                                                                                                                 | 0.377 | 0.023        | $PM_{10}$ 浓度  | 0.451 | 0.007        |
| $PM_{10}$ 浓度                                                                                                       | 0.393 | 0.006        | 风速            | 0.456 | 0.002        |
| 气温                                                                                                                 | 0.399 | 0.001        | 气温            | 0.458 | 0.001        |

通过对比不同污染程度下各影响因子对 AOD 的逐步回归结果可知(表 4),轻度污染情况下,5 个因子对长安区 AOD 变化的综合解释能力为 29.5%, $PM_{2.5}$  浓度的影响最大,其决定系数最小( $R^2 = 0.232$ ),说明在不考虑  $PM_{2.5}$  浓度的情况下,剩余所有因子对 AOD 变化的解释能力只有 23.2%, $PM_{2.5}$  浓度的  $\Delta R^2$  最大(0.063),表明当加入  $PM_{2.5}$  浓度时将使回归方程的解释能力增加 6.3%,其次为相对湿度、 $PM_{10}$  浓度和气温,分别使得回归方程的解释能

力增加 3.9%, 0.4% 和 0.3%. 当大气状况为中度污染时,所有因子的综合解释能力为 60.8%,此时, $PM_{10}$  浓度的影响最大,将其引入回归方程对 AOD 变化的解释能力将增加 11.4%,其次为相对湿度、风速和  $PM_{2.5}$  浓度,分别能增加 7.4%, 6.9% 和 6.2%. 重度污染时 5 个因子对 AOD 时间变异的综合解释能力为 38.3%, $PM_{2.5}$  浓度的影响最大,其  $R^2$  最小(0.070),即在不考虑  $PM_{2.5}$  浓度的情况下,其他所有因子对 AOD 变化的解释能力仅有

7%,  $\Delta R^2$  最大(0.313),即将  $PM_{2.5}$  浓度加入回归方程时,能够使得回归方程对 AOD 变异的解释能力增加 31.3%,相对湿度、气温和风速将使得解释能力分别增加 23.7%, 19.8% 和 1.3%。由上述分析可知,不同污染程度下  $PM_{2.5}$  浓度和  $PM_{10}$  浓度均对 AOD 的变化有较大的解释能力,但在气象因子的综合影响下,解释能力并不完全等同。相对湿度

在所有情况下对 AOD 的变异均有相对较大的解释能力,对 AOD 与颗粒物浓度的关系有较大影响,可能主要是缘于高湿的条件会促使气溶胶粒子的增长,特别在高温高湿的条件下,活跃的光化学反应会促进二次气溶胶的形成<sup>[19]</sup>。此外,风的扩散和传输作用,雨水的冲刷作用等也会对二者的关系产生影响。

表 4 不同污染程度下颗粒物和气象因素对 AOD 变异的逐步回归分析结果

| Table 4 Stepwise regression analysis of particulate matter and climatic factors contributing to variability in AOD under different pollution levels |       |              |               |       |              |               |       |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|---------------|-------|--------------|---------------|-------|--------------|
| 轻度污染                                                                                                                                                |       |              | 中度污染          |       |              | 重度污染          |       |              |
| 影响因子                                                                                                                                                | $R^2$ | $\Delta R^2$ | 影响因子          | $R^2$ | $\Delta R^2$ | 影响因子          | $R^2$ | $\Delta R^2$ |
| $PM_{2.5}$ 浓度                                                                                                                                       | 0.232 | 0.063        | $PM_{10}$ 浓度  | 0.494 | 0.114        | $PM_{2.5}$ 浓度 | 0.070 | 0.313        |
| 相对湿度                                                                                                                                                | 0.256 | 0.039        | 相对湿度          | 0.534 | 0.074        | 相对湿度          | 0.146 | 0.237        |
| $PM_{10}$ 浓度                                                                                                                                        | 0.290 | 0.004        | 风速            | 0.539 | 0.069        | 气温            | 0.185 | 0.198        |
| 气温                                                                                                                                                  | 0.292 | 0.003        | $PM_{2.5}$ 浓度 | 0.546 | 0.062        | 风速            | 0.371 | 0.013        |
| 风速                                                                                                                                                  | 0.295 | 0.001        | 气温            | 0.608 | 0.001        | $PM_{10}$ 浓度  | 0.383 | 0.001        |

3 讨论

3.1 AOD 与颗粒物浓度的关系

利用相关分析方法探讨了长安区 AOD 与颗粒物浓度的关系。整体上长安区 AOD 与  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度均呈正相关关系,但并不完全等同,即颗粒物浓度并不能完全代表大气气溶胶消光程度,颗粒物浓度对 AOD 变化的解释能力最大,但气溶胶粒子的消光能力仅仅是部分缘自于颗粒物,且不同季节,不同污染程度下,二者的相关性及 AOD 对颗粒物浓度的响应存在差别。针对这一结果可能的原因包括:①AOD和颗粒物浓度量化方式的差异,AOD、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度都是空气质量状况的量化参数,但 AOD 表示的是整层大气的污染程度,而颗粒物浓度表征的是近地表大气污染物的浓度<sup>[46]</sup>,大气层中污染物的垂直分布存在差异,不同高度气溶胶粒子的分布存在差异性,后续关于二者关系的探究将会得益于对 AOD 合理的高度订正。②长安区气溶胶粒子浓度及其理化性质差异的影响,不同天气、不同季节由于气象条件、社会活动强度、生产生活方式等的差异所导致的气溶胶粒子浓度的差异,气溶胶粒子排放源的不同所产生的气溶胶粒子的理化性质也会存在差异等,外部环境以及自身物理性质等差异都对 AOD-颗粒物浓度的相关性分析结果产生差异。③AOD和颗粒物时空匹配误差也会对二者之间的关系产生影响,太阳光度计的观测时间间隔为 15 min,文中以日内观测均值来代替该天的 AOD 值,而颗粒物浓度则为地面观测的日均值,二者在时间上难以匹配<sup>[19]</sup>,同时太阳光度计的观测是在无云的晴空,而颗粒物浓度是所有天气条件下观测结果的平均值,这进一步导致二者关系的不确定性;此外太阳

光度计和颗粒物观测站点都位于长安区,位置上比较靠近,但并不完全重合,周围环境仍存在一定的差异。⑤太阳光度计仪器误差、测量误差的存在。

为提高 AOD-颗粒物浓度之间的相关性,一些学者们会对 AOD 进行湿度和标高订正。相关研究表明进行订正后二者的相关性有明显的提高,后续的研究将得益于合理准确的湿度和标高订正。

3.2 AOD 与 AQI 的关系

不同季节和不同污染条件下,AOD 和 AQI 均呈正相关关系,非污染和污染天气下二者的相关系数分别为 0.15 和 0.40,污染天气时相关系数稍大于非污染天气。整体而言,AOD 与 AQI 的相关系数为 0.49,小于 AOD 与颗粒物浓度之间的相关性。AOD 与 AQI 相关性的季节变化为:冬季(0.75) > 秋季(0.55) > 春季(0.26) > 夏季(0.09)。除了冬季外,其他所有情况下,AOD 和 AQI 之间的相关性均低于 AOD 与颗粒物浓度的相关性。这主要是因为对 AQI 的评价除了大气总悬浮颗粒物外,还包括  $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $O_3$  等,而对 AOD 消光有影响的主要是  $PM_{2.5}$ <sup>[24,40]</sup>,因而导致这二者之间的相关性较弱。其次,二者观测方式的差异以及时空匹配上的误差等都会对二者的相关性产生影响。

4 展望

本文基于太阳光度计观测数据和近地面污染物浓度数据,初步揭示了长安区气溶胶光学特性、颗粒物浓度的基本分布和变化特征,后续基于太阳光度计更长时间的观测和综合分析及其与遥感影像数据、环境监测数据、大气排放清单数据等的结合分析将会为长安区空气质量监测和管控提供更加有效的理论和实践依据;分析了不同季节和不同污染条

件下 AOD 和颗粒物浓度的关系以及 AOD 对颗粒物浓度的响应,进一步对 AOD 进行湿度、标高订正将会有利于分析二者的关系。同时,基于简单线性方法和线性回归分析方法探究二者之间的关系,非线性方法的应用以及引入其他环境和地表参量的多元线性分析方法,可以更加准确地表征二者之间的相关性,亦可为基于遥感观测 AOD 的近地表  $\text{PM}_{2.5}$  浓度估算提供科学依据。结合卫星遥感观测等多源观测数据,进一步分析 AOD 时间变化的影响因素,将会为长安区空气质量科学治理提供科学依据。此外,本文仅仅基于两年的观测数据以长安区为靶区进行分析,更长时间尺度上 AOD-颗粒物浓度的关系以及不同气候区两者关系的时空异质性仍需进一步研究。

## 5 结论

(1) 长安区上空 AOD 四季变化明显: 秋季 (1.02) > 冬季 (1.00) > 夏季 (0.63) > 春季 (0.47)。2019 年 AOD 年均值高于 2020 年 (分别为 0.51 和 0.48); 除冬季外, 2019 年其余季节 AOD 均低于 2020 年。AOD 年内和年际变化差异都较大, 观测期间 AOD 最大值为  $0.91 \pm 0.54$ , 出现在 2019 年 2 月, 最小值为  $0.26 \pm 0.24$ , 出现在 2019 年 8 月。

(2) AOD 的主控模态存在明显的季节性差异: AOD 从春季到冬季依次增大, 依次为 1.08, 1.03, 0.99 和 0.82, 表明观测期间主控粒子从春季到冬季逐渐从粗模态向细模态转变。2019 年 AOD 变化特征和整个研究时段变化特征相似。2020 年 AOD 较为稳定 (0.86 ~ 0.98), 各季节气溶胶粒子均以粗模态的形式存在。AOD 月度变化差异大, 最大值出现在 2019 年 9 月, 为 1.51, 最小值出现在 2021 年 3 月, 为 0.58。从整个观测时段来看, 长安区气溶胶类型多为混合型气溶胶, 即长安区空气质量处于较浑浊状态。

(3) 观测期间不同季节 AOD 和 Angstrom 的关系存在差异。春季局部和明显污染状况下均以粗模态粒子为主导; 夏季局部污染的状况下长安区夏季的大气污染是由粗模态和细模态的气溶胶粒子共同导致的, 在大气明显污染的状态下, 细模态的气溶胶粒子明显增加 (86.8%); 秋冬两季局部污染状况下, 以粗模态的气溶胶粒子为主导, 粗模态粒子占比分别为 85% 和 56.5%, 明显污染时, 细模态粒子的占比明显增加, 分别为 85.1% 和 82.6%。

(4) 观测时段内, 长安区  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度月度变化趋势一致, 都存在明显的季节分布差异: 冬春两季数值较大且分布离散, 夏秋两季颗粒物浓度值小且数据分布较为集中。AOD 与所有颗粒物浓度均呈

正相关关系, 秋冬两季 AOD 与颗粒物浓度的相关性均大于春夏两季, 但与不同颗粒物浓度相关性存在差别, AOD 与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的相关系数要大于 AOD 与  $\text{PM}_{10}$  浓度。不同天气条件下 AOD 与颗粒物浓度都存在正相关关系, 但相关性存在差异, 污染天气下 AOD 与颗粒物浓度的相关性更大。不同污染程度下颗粒物浓度对 AOD 变化的解释率均最大, 此外 AOD 变化还受到气象因素的影响, 其中相对湿度的影响最大, 即对 AOD 进行合理的湿度订正将有利于提高 AOD-颗粒物浓度的相关性。

## 参考文献:

- [1] Zhang S H, Worrell E, Crijns-Graus W. Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry[J]. *Applied Energy*, 2015, **147**: 192-213.
- [2] Ding S, He J H, Liu D F, *et al.* The spatially heterogeneous response of aerosol properties to anthropogenic activities and meteorology changes in China during 1980-2018 based on the singular value decomposition method[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138135.
- [3] 姜晓晨, 邓正栋, 王大庆, 等. 基于 Landsat8 OLI 可见光波段反演陆地气溶胶光学厚度[J]. *红外技术*, 2019, **41**(6): 527-534.
- [4] Jiang X C, Deng Z D, Wang D Q, *et al.* Aerosol optical depth retrieval over land based on Landsat 8 OLI visible bands imagery[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(6): 527-534.
- [5] 王贺, 曹念文, 王鹏, 等. 南京地区大气气溶胶综合观测与对比分析[J]. *遥感学报*, 2017, **21**(1): 125-135.
- [6] Wang H, Cao N W, Wang P, *et al.* Aerosol comprehensive observation and analysis in Nanjing area[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, **21**(1): 125-135.
- [7] Xue Y, He X W, de Leeuw G, *et al.* Long-time series aerosol optical depth retrieval from AVHRR data over land in North China and Central Europe[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **198**: 471-489.
- [8] Meng F, Cao C Y, Shao X. Spatio-temporal variability of Suomi-NPP VIIRS-derived aerosol optical thickness over China in 2013[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **163**: 61-69.
- [9] Yang J, Hu M G. Filling the missing data gaps of daily MODIS AOD using spatiotemporal interpolation[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 677-683.
- [10] Li X K, Zhang C R, Zhang B, *et al.* A comparative time series analysis and modeling of aerosols in the contiguous United States and China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**: 799-811.
- [11] Scott C E, Arnold S R, Monks S A, *et al.* Substantial large-scale feedbacks between natural aerosols and climate[J]. *Nature Geoscience*, 2018, **11**(1): 44-48.
- [12] 田信鹏, 孙林, 刘强, 等. 北京地区 Landsat 8 OLI 高空间分辨率气溶胶光学厚度反演[J]. *遥感学报*, 2018, **22**(1): 55-63.
- [13] Tian X P, Sun L, Liu Q, *et al.* Retrieval of high-resolution aerosol optical depth using Landsat 8 OLI data over Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(1): 51-63.
- [14] Wang C H, Wang C Y, Myint S W, *et al.* Landscape determinants of spatio-temporal patterns of aerosol optical depth in the two most polluted metropolises in the United States[J].

- Science of the Total Environment, 2017, **609**: 1556-1565.
- [12] 吴立新, 吕鑫, 秦凯, 等. 基于太阳光度计地基观测的徐州气溶胶光学特性变化分析[J]. 科学通报, 2016, **61**(20): 2287-2298.  
Wu L X, Lü X, Qin K, *et al.* Analysis to Xuzhou aerosol optical characteristics with ground-based measurements by sun photometer[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, **61**(20): 2287-2298.
- [13] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰. 艾比湖地区气溶胶光学特性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3484-3491.  
Zhang Z, Ding J L, Wang J J. Aerosol optical properties over the Ebinur Region[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3484-3491.
- [14] 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 等. 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2699-2712.  
Zheng Y R, Wang X H, Zhang X, *et al.* Spatiotemporal distribution of aerosol optical depth based on Landsat data in the hinterland of the Guanzhong Basin and its relationship with urbanization[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2699-2712.
- [15] 顾吉林, 汤宏山, 刘森, 等. 大连市大气污染物质量浓度与气溶胶光学厚度的相关性分析[J]. 地理科学, 2019, **39**(3): 516-523.  
Gu J L, Tang H S, Liu M, *et al.* Correlation analysis between the concentration of atmospheric pollutant and aerosol optical depth in Dalian City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, **39**(3): 516-523.
- [16] 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 等. 1990~2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2572-2581.  
Liu Y, Lin A W, Qin W M, *et al.* Spatial-temporal distribution of aerosol optical depth and its main influence types in China during 1990-2017[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2572-2581.
- [17] 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.
- [18] 李海龙, 张自力, 李正泉, 等. 基于 CE318 数据的杭州市气溶胶光学特征研究[J]. 科技通报, 2018, **34**(6): 46-53.  
Li H L, Zhang Z L, Li Z Q, *et al.* Aerosol optical properties in Hangzhou Based on CE318 data[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, **34**(6): 46-53.
- [19] 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 等. 北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1067-1077.  
Zeng W, Hao Q J, Zhao Z J, *et al.* Characteristics of aerosol optical depth in the urban area of Beibei and its correlation with particle concentration[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1067-1077.
- [20] 庾雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2284-2293.  
Tuo X, Yang L X, Zhang W, *et al.* Characteristics and sources analysis of PM<sub>2.5</sub> in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- [21] Tiwari S, Hopke P K, Pipl A S, *et al.* Intra-urban variability of particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) and its relationship with optical properties of aerosols over Delhi, India[J]. Atmospheric Research, 2015, **166**: 223-232.
- [22] Obaidullah M, Dyakov I V, Peeters L, *et al.* Measurements of particle concentrations and size distributions in three parking garages[J]. International Journal of Energy and Environment, 2012, **6**(5): 508-515.
- [23] 吴炜, 丛春华, 郑怡. 山东气溶胶光学厚度时空分布及其与地面大气污染物质量浓度的相关性分析[J]. 海洋气象学报, 2021, **41**(1): 58-67.  
Wu W, Cong C H, Zheng Y. Study on spatial and temporal distribution of AOT and its correlation with mass concentrations of ground-level atmospheric pollutants in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, **41**(1): 58-67.
- [24] 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 826-834.  
Lin H F, Xin J Y, Zhang W Y, *et al.* Comparison of atmospheric particulate matter and aerosol optical depth in Beijing City[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 826-834.
- [25] 董自鹏, 李星敏, 杜川利, 等. 西安地区气溶胶光学特性研究[J]. 高原气象, 2013, **32**(3): 856-864.  
Dong Z P, Li X M, Du C L, *et al.* Study on aerosol optical property in Xi'an Region[J]. Plateau Meteorology, 2013, **32**(3): 856-864.
- [26] 刘晶晶, 王国英, 徐梓翔, 等. 太阳光度计定标方法和西安地区气溶胶光学特征的研究[J]. 红外与激光工程, 2020, **49**(6): 257-263.  
Liu J J, Wang G Y, Xu Z X, *et al.* Study on calibration method of sky radiometer and aerosol optical properties in Xi'an region[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, **49**(6): 257-263.
- [27] 董娅玮, 杜新黎, 李扬扬, 等. 西安市区大气中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度污染特征[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(5): 45-49.  
Dong Y W, Du X L, Li Y Y, *et al.* Pollution characteristics of mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Xi'an City[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(5): 45-49.
- [28] 郭庆元, 杨晓春, 吴其重, 等. 基于数值模拟对西安地区冬季一次重污染过程 PM<sub>2.5</sub> 区域来源解析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(9): 3103-3111.  
Guo Q Y, Yang X C, Wu Q Z, *et al.* An analysis of PM<sub>2.5</sub> regional sources from heavy pollution in the winter of Xi'an based on numerical simulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(9): 3103-3111.
- [29] 刘慧, 余晔, 夏敦胜, 等. 基于太阳光度计的兰州市秋季气溶胶光学特性[J]. 高原气象, 2020, **39**(1): 204-211.  
Liu H, Yu Y, Xia D S, *et al.* Analysis on autumn aerosol optical characteristics at Lanzhou with sun-photometer[J]. Plateau Meteorology, 2020, **39**(1): 204-211.
- [30] 沈晓晶, 张海龙, 程锐, 等. 黄渤海海上空气溶胶类型判别及其成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(5): 1649-1655.  
Shen X J, Zhang H L, Cheng R, *et al.* Classification of aerosols types over the Yellow and Bohai Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(5): 1649-1655.
- [31] Dong Z P, Yu X, Li X M, *et al.* Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(35): 4486-4496.
- [32] 郎凤玲, 闫伟奇, 张泉, 等. 北京大气颗粒物数浓度粒径分布特征及与气象条件的关联性[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1153-1159.

- Lang F L, Yan W Q, Zhang Q, *et al.* Size distribution of atmospheric particle number in Beijing and association with meteorological conditions [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(7): 1153-1159.
- [33] 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析[J]. *气象与环境学报*, 2009, **25**(1): 1-5.
- Liu J, Liu W, Li Y, *et al.* Relationship between meteorological conditions and particle size distribution of atmospheric aerosols [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2009, **25**(1): 1-5.
- [34] 景悦, 孙艳玲, 付宏臣, 等. 2010-2016 年京津冀 AOD 时空变化及其影响因子分析[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(8): 104-113.
- Jing Y, Sun Y L, Fu H C, *et al.* Temporal and spatial variation of aerosol optical depth and analysis of influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2016 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(8): 104-113.
- [35] 张瑞芳, 刘偲嘉, 于兴娜, 等. 西北地区气溶胶光学特性的时空变化特征[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(2): 334-342.
- Zhang R F, Liu S J, Yu X N, *et al.* Spatio-temporal distribution and variation characteristics of aerosol optical properties over the Northwest of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(2): 334-342.
- [36] 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.
- [37] Tanré D, Kaufman Y J, Holben B N, *et al.* Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D16): 18205-18217.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Allen W H. Dictionary of technical terms for aerospace use[R]. Washington, DC: NASA, 1965.
- [42] Pillai P S, Babu S S, Moorthy K K. A study of PM, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentration at a tropical coastal station[J]. *Atmospheric Research*, 2002, **61**(2): 149-167.
- [43] 赵胡笏, 马雁军, 王扬锋, 等. 沈阳大气气溶胶光学特性及其影响因子[J]. *气象与环境学报*, 2015, **31**(3): 43-49.
- Zhao H J, Ma Y J, Wang Y F, *et al.* Aerosol optical characteristics and its influencing factor over Shenyang [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, **31**(3): 43-49.
- [44] 于彩霞, 邓学良, 石春娥, 等. 降水和风对大气 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的清除作用分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(12): 4620-4629.
- Yu C X, Deng X L, Shi C E, *et al.* The scavenging effect of precipitation and wind on PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(12): 4620-4629.
- [45] 钟聪, 李小洁, 何园燕, 等. 广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J]. *地理科学*, 2020, **40**(3): 478-485.
- Zhong C, Li X J, He Y Y, *et al.* Spatial variation of soil organic matter and its influencing factors in Guangxi, China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(3): 478-485.
- [46] He Q Q, Gu Y F, Zhang M. Spatiotemporal patterns of aerosol optical depth throughout China from 2003 to 2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **653**: 23-35.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                 |                                                               |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------|
| Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China .....                                                                                    | LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>      | (3375) |
| Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....                                                                  | PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>                | (3386) |
| Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method .....                                                                                                                    | WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>              | (3396) |
| Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Xiamen Port .....                                                                                                           | XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>             | (3404) |
| Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....                                                       | ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>       | (3416) |
| Analysis of PM <sub>2.5</sub> Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter .....                                                                                                     | WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>          | (3423) |
| Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....                                                                                                | KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i> | (3439) |
| Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan .....                                                                                                                                        | WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>            | (3451) |
| Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area .....                                                                                          | LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>          | (3463) |
| Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 .....                                                                                                                         | ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>        | (3473) |
| Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain .....                                                                                                                          | GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang                              | (3483) |
| Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....                                                         | ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>       | (3494) |
| Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....                                                   | WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>   | (3508) |
| Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze .....                                                                                                                    | CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>      | (3523) |
| Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors .....                                                                                               | YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>           | (3532) |
| Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....                                                           | Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>         | (3543) |
| Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region .....                                                                          | NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>              | (3552) |
| Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake .....                                                                                    | HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>          | (3562) |
| Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake .....                                                                                        | WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>              | (3575) |
| Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River .....                                                                                                                       | ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>     | (3587) |
| Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff .....                                                                                                         | ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>           | (3597) |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems .....                                                                                                      | CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>            | (3608) |
| Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....                                                           | WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>        | (3623) |
| Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin .....                                                                             | LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>          | (3635) |
| Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water .....                                                                                       | PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>         | (3645) |
| Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing .....                                                                                                          | MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>                    | (3656) |
| Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition .....                                                                                                          | HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>              | (3664) |
| Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment .....                                                                           | REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>               | (3672) |
| Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> .....                                                                                          | MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>              | (3682) |
| Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors .....                                                                                                              | LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>         | (3692) |
| Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater .....                                                                                       | YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>      | (3699) |
| Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process ..... | LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>                 | (3708) |
| Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge .....                                                                                                                       | GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>         | (3718) |
| Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 .....                                                                                   | XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>          | (3730) |
| Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years .....                                                                                     | CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>    | (3741) |
| Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....                                                             | HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>                  | (3752) |
| Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt .....                                                                                                              | ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>                  | (3763) |
| Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area .....                                                                                              | SHANG Yu, SANG Nan                                            | (3773) |
| Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area .....                                                                                                         | LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>             | (3781) |
| Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China .....                                                                                                        | WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>      | (3789) |
| Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....                                                                   | XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>           | (3799) |
| Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility .....                                                                                                                                  | ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>        | (3811) |
| Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan .....                                                                                                              | LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>                | (3825) |
| Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems .....                                                                                         | SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>              | (3835) |
| Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas .....                                                                                                | MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>            | (3844) |
| Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....                                                   | LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>             | (3854) |
| Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas .....                                                                              | XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>        | (3865) |
| Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils .....                                                                                               | WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun                                  | (3876) |
| Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....                                                       | XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>                  | (3884) |