

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期  
Vol.42 No.5

目 次

北京冬季 PM<sub>2.5</sub> 中有机气溶胶的化学特征和来源解析 ..... 徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)

北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析 ..... 尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)

北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 ..... 廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)

青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 ..... 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)

太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 ..... 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)

西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 ..... 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)

超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 ..... 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)

合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 ..... 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)

郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 ..... 董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳侯, 张瑞芹 (2179)

2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 ..... 钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)

天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 ..... 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 ..... 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)

太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 ..... 李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)

松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 ..... 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)

会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 ..... 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)

京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 ..... 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)

次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 ..... 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)

碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 ..... 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)

冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 ..... 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)

城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析:以京津冀北运河为例 ..... 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰若, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)

太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 ..... 赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)

三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)

铁硫改性生物炭去除水中的磷 ..... 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)

钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析 ..... 罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)

BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 ..... 王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)

Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 ..... 高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)

可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A ..... 张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)

铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物 ..... 张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)

硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制 ..... 屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)

电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制 ..... 曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)

缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 ..... 李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)

反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 ..... 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)

基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 ..... 薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)

活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 ..... 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)

6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制 ..... 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)

中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 ..... 李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)

不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征 ..... 刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)

青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析:以祁连山和藏东南地区为例 ..... 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)

基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 ..... 胡梦瑶, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)

长期施用化肥和有有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 ..... 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)

川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 ..... 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)

宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 ..... 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)

重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 ..... 鹿发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾亮, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)

典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 ..... 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱挥华, 朱奇宏 (2512)

油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 ..... 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)

土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响 ..... 徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)

渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 ..... 程森, 路平, 冯启言 (2541)

3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 ..... 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)

污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 ..... 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)

《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)

# 天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征

张喆<sup>1,2,3</sup>, 丁建丽<sup>2,3\*</sup>, 王瑾杰<sup>2,3</sup>, 陈香月<sup>2,3</sup>, 刘兴涛<sup>2</sup>, 阿提干·吾斯曼<sup>2</sup>

(1. 新疆大学地理学科博士后科研流动站, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学资源与环境科学学院, 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 为探究天山北坡城市群大气气溶胶光学特性时空分布特征, 本文利用卫星遥感 MCD19-A2 气溶胶产品分析了 2000 ~ 2019 年研究区气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 时空分布特征及变化趋势, 针对 AOD 较为稳定的 2016 ~ 2019 年, 利用多波段太阳光度计地基遥感技术, 对 AOD 及 Angström 波长指数 ( $\alpha$ ) 等参数进行特征分析. 结果表明: ①空间上, 研究区 AOD 空间分布与地形呈现较好的一致性, 高值现象主要分布在低海拔地区; AOD 空间分布表现出较强烈季节变化, 春季 ( $0.15 \pm 0.03$ ) > 秋季 ( $0.14 \pm 0.03$ ) > 夏季 ( $0.14 \pm 0.02$ ); ②时间上, 2000 ~ 2019 年间研究区 AOD 年均值为 0.12, 年增幅 1.03%, 整体呈现增加趋势; AOD 月均值的年际变化表现为双峰型, 5 月和 11 月为第一峰值和第二峰值, 自然尘源粉尘的释放和传输以及人类社会燃煤供暖是造成 AOD 增加的主要原因; ③受沙尘天气的影响, 春季 AOD 的变化幅度较为剧烈, 气溶胶主控粒子粒径及变化幅度均大于夏季; 研究区 AOD 高值主要受粗模态粒子气溶胶的影响, 细模态粒子吸湿增长会引起 AOD 的波动, 但不易导致 AOD 高值.

**关键词:** 气溶胶光学厚度; 太阳光度计; Angström 波长指数; 天山北坡城市群; 中分辨率成像光谱仪

**中图分类号:** X122; X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2021)05-2202-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202009083

## Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains

ZHANG Zhe<sup>1,2,3</sup>, DING Jian-li<sup>2,3\*</sup>, WANG Jin-jie<sup>2,3</sup>, CHEN Xiang-yue<sup>2,3</sup>, LIU Xing-tao<sup>2</sup>, Atican Osman<sup>2</sup>

(1. Geography Postdoctoral Research Station, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecosystem, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** In order to explore the temporal and spatial distribution characteristics of atmospheric aerosol optical depth (AOD) in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains, the temporal and spatial distribution characteristics and trends of changes in the AOD in the study area from 2000 to 2019 were analyzed by MODIS aerosol products (MCD19-A2). For 2016-2019, when the AOD was relatively stable, the parameters such as the AOD and Angström wavelength index ( $\alpha$ ) were analyzed using multi-band sun photometer ground-based remote sensing technology. The results showed that ① the spatial distribution of AOD in the study area was consistent with the topography, and high values were mainly distributed in the low altitude area. The spatial distribution of AOD in the four seasons showed a strong seasonal change from spring ( $0.15 \pm 0.03$ ) > autumn ( $0.14 \pm 0.03$ ) > summer ( $0.14 \pm 0.02$ ). ② In terms of time, the annual average AOD value of the study area was 0.12 from 2000 to 2019 with an annual growth rate of 1.03%, thereby showing an overall increasing trend. The annual variation in the monthly mean value of AOD was bimodal; the first and second peaks were in May and November. The main reason for the increase in AOD was the release and transmission of dust from natural sources and heating. ③ Under the influence of dust weather, the AOD changed sharply in spring, and the size and change range of aerosol particles were larger than those in summer. The high value of AOD in the study area was mainly affected by coarse mode particles. The moisture absorption growth of fine mode particles caused a fluctuation in the AOD, but it was not the cause of the high value of AOD.

**Key words:** aerosol optical depth; sun photometer; Angström wavelength exponent; urban agglomerations on north slope of Tianshan mountains; moderate-resolution imaging spectroradiometer

气溶胶是大气重要组成成分之一, 其可通过吸收和散射太阳辐射, 改变地-气系统辐射平衡<sup>[1]</sup>, 又可作为云凝结核, 参与云微物理过程, 从而影响区域降水<sup>[2,3]</sup>, 在全球和区域气候变化中扮演十分重要的角色. 多波段光度计遥感 AOD 是气溶胶地基遥感中最准确的方法, 依靠 AERONET、CARSNET 和 CSHNET 等联合观测网络提供数据支持, 国内外诸多学者针对 AOD 和 Angström 波长指数 ( $\alpha$ )、浑浊系数、粒子尺度谱分布和单次散射反照率等气溶胶光

学特性参数的变化特征, 讨论各地区大气气溶胶光学特性及其时空分布状况, 揭示各参数长时间序列的变化规律<sup>[4-8]</sup>. 尤其是兰州大学半干旱气候与环

收稿日期: 2020-09-08; 修订日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771470, 42061066); 自治区高校科研计划项目 (XJEDU2019Y014); 自治区自然科学基金项目 (2018D01C035); 自治区教育厅天池博士计划项目 (2018-282); 新疆大学博士科研启动基金项目 (BS180248)

作者简介: 张喆 (1988 ~), 女, 博士, 主要研究方向为干旱区环境遥感, E-mail: zhangzhe\_0110@yeah.net

\* 通信作者, E-mail: watarid@xju.edu.cn

境观测站的设立,为中国西北地区开展针对大气云和气溶胶的生态环境长期连续观测研究具有重要意义<sup>[9-11]</sup>.

地基遥感只能在有限的地面站点进行布设,具有一定的空间局限性.与地基遥感相比,卫星遥感不受空间覆盖的限制,参数获取和数据传输也更为连续和便捷,方便及时获取大区域范围内的大气气溶胶变化,弥补了地基观测空间代表性不足的缺陷.搭载在 EOS 系列卫星上的中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 自 2000 年来开展大气 AOD 反演业务,已广泛应用于气溶胶时空分布、环境污染动态变化分析和空气质量监测研究中<sup>[12-18]</sup>.尤其是 2014 年发布的 MODIS Collection 6 版气溶胶产品,其包含二代深蓝算法、暗像元算法和数据融合产品,适用于沙漠和干旱半干旱等高亮地区,被广泛应用于西北干旱地区 AOD 时空变化特征分析中<sup>[19-22]</sup>.但受其 10 km 的空间分辨率所限,相关研究大多针对大区域尺度开展,中、小尺度的研究缺乏细节的展示.最新发布的高分辨率气溶胶产品 MCD19A2 有效弥补了这一缺陷,其采用多角度辅助大气校正算法,可提供全球尺度 1 km 空间分辨率的 AOD 数据集.该数据集良好的时空分辨率使得表征局部尺度气溶胶光学特性,尤其是针对城市等气溶胶空间变化剧烈的局部地区的大气污染状况研究提供了可能.但受地基观测资料限制,针对该产品在西北干旱区的反演精度的验证研究相对较少.

天山北坡经济带是新疆建设丝绸之路经济带核心区的重要支撑和载体,也是自治区优先发展的重点区域,及时掌握该地区大气气溶胶环境现状,提高大气污染物扩散的科学认识水平,是保障西部地区生态安全与“一带一路”国家重大战略成功实施的重要基础<sup>[23]</sup>.卫星和地基遥感相结合开展该地区气

溶胶光学特性调查研究,既有助于大气气溶胶状况的宏观把握,又可深入分析局地气溶胶光学特性,为实现区域大气气溶胶环境的准确评估提供科学技术支持.本文首先利用天山北坡重点城市群设立的气溶胶地基观测资料,对 MODIS 的 AOD 产品 (MCD19-A2) 精度进行验证;在此基础上,讨论 2000~2019 年天山北坡经济带地区 AOD 时空分布特征;利用地基遥感太阳光度计资料,反演获得 AOD 和  $\alpha$  等重要光学参数,讨论其季节性差异.卫星和地基遥感相结合实现天山北坡城市群上空大气气溶胶时空分布的了解和光学特性的准确估算,以期为该地区气溶胶光学特性及其气候效应研究提供参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

天山北坡经济带是国家二级重点经济开发带,也是新疆维吾尔自治区经济发展中心.区域范围包括以乌鲁木齐市为核心的乌-昌城镇经济区、以石河子为中心的石-玛-沙城镇经济区、奎屯-乌苏-克拉玛依三角区和伊宁-博乐双核心城镇经济区,共计 27 个县(市),地形地貌复杂,地势高差悬殊,气候类型多样<sup>[24,25]</sup>.综合下垫面状况、城市发展水平和粉尘自然源等多重因素,本研究以乌鲁木齐市、石河子市、克拉玛依市和博乐为轴心选取经济带的重点城市,包括昌吉市、阜康市、奎屯市、乌苏市、博乐市、精河县、沙湾县、玛纳斯县和呼图壁县共 8 市 4 县为研究区(图 1).一方面,在丝绸之路经济带建设背景下,该城市群面临经济、工业的快速发展和城市化进程的推进,大气污染物排放量剧增,空气质量不断恶化,严重威胁人体健康和生态环境,另一方面,其北部的古尔班通古特沙漠,西部上风向的艾比湖干涸湖底作为稳定的自然尘源,提供了丰富的沙尘和盐

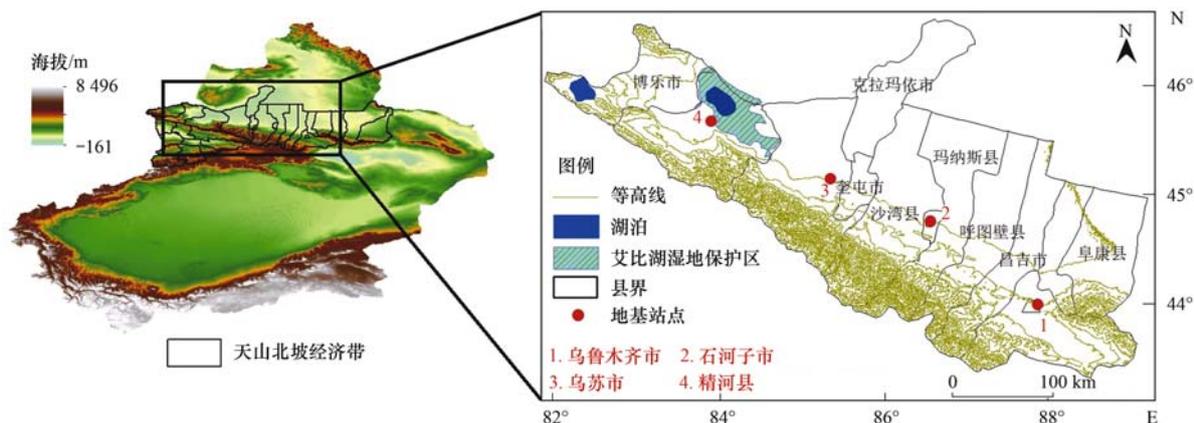


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

尘,使得该地区面临严重的沙尘和盐尘威胁.

## 1.2 资料来源

### 1.2.1 地基遥感数据

太阳光度计遥感 AOD 尽管在空间代表性上有一定缺陷,但其丰富的信息含量,相对比较成熟的反演理论,使其在气溶胶研究中具有不可替代的作用.本文地基观测数据来自精河县、乌苏市、石河子市和乌鲁木齐市设立气溶胶观测地基站点,站点分布如图 1 所示.为避免矿石燃烧导致的人为气溶胶的影响,观测时间主要集中在非供暖期 4~10 月.

Microtops II 太阳光度计是一款用于 AOD 精确测量的 5 通道手持式太阳光度计,其拥有其他大型昂贵仪器一样的精确度,手持式的采样方式为野外测量提供了方便,可计算 440、675、870、936 和 1 020 nm 等 5 个波段的 AOD<sup>[26]</sup>.在精河县、乌苏市、石河子市和乌鲁木齐市进行观测时,观测点定位于城市上风向的开阔地带,周围无明显工业大气污染源.观测时段为 08:00~21:00,采样间隔 0.50 h.每次观测连续测量 5 组读数,如果 5 组读数出现的波动超过 0.03,则认为此时存在瞄准偏差或者有云遮挡太阳.

CE318 太阳光度计为法国 CIMEL 公司生产的一种自动跟踪扫描的太阳光度计,是当今应用最广、权威性最高的太阳光度计仪器,广泛应用于美国全球 AERONET、法国 PHOTONS、加拿大 AEROCAN、西班牙 RIMA、中国气象局、中华人民共和国环境保护部和中国海洋局等各类气溶胶监测网平台.其可通过观测太阳、天空和地面的反射等信息来反映大气的光学特性<sup>[27]</sup>.该仪器架设于精河县气象局楼顶,周围无密集建筑物阻挡,视野开阔.该仪器在可见近红外波段有 9 个光谱通道,可获取 340、380、440、500、675、870、936、1 020 和 1 640 nm 的 AOD 值.太阳光度计数据处理结果包括 2 个质量等级:1.5 级数据为没有做去云处理的数据,2.0 级数据为经过去云处理的数据,本研究选用的是 2.0 级反演数据.

根据 Angström 波长指数的计算方法:

$$\alpha = - \frac{\ln[AOD(\lambda_1)/AOD(\lambda_2)]}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (1)$$

式中, $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别代表不同波长(nm); AOD( $\lambda$ ) 为某一波长下的 AOD;  $\alpha$  代表 Angström 波长指数,其主要反映出气溶胶组成中大小粒子的比例,取值范围一般在 0~2.  $\alpha$  值越小表示气溶胶分布中大粒子占优势, $\alpha$  值越大则表示气溶胶分布中小粒子占优势.当  $\alpha \geq 1$ ,气溶胶以细模态形式存在,此时大气气溶胶主要类型为人为源气溶胶;当  $\alpha < 1$ ,表示气溶

胶主要以粗模态形式存在.沙尘气溶胶一般为  $\alpha \leq 0.50$ ,  $0.50 < \alpha < 1$  则被认为受沙尘源与人为源气溶胶混合影响<sup>[28]</sup>.

Gobbi 等<sup>[29]</sup>提出的气溶胶分类图解法,主要是基于不同波长计算得到 AOD 和  $\alpha$ ,在获取细模态气溶胶对总 AOD 的贡献和细模态粒子的尺度的同时,还可以分离出 AOD 的增加是由于细模态粒子的吸湿性增长引起还是由于粗模态粒子增加引起的.利用 440、675 和 870 nm 波段的数据进行计算,得到  $\alpha_{(440-675)}$ 、 $\alpha_{(440-870)}$  和  $\alpha_{(675-870)}$ ,进而得到  $\delta\alpha = \alpha_{(440-675)} - \alpha_{(675-870)}$ ,将其描绘在气溶胶分类上,即可得到细模态气溶胶对总 AOD 的贡献  $\eta$  和细模态粒子的尺度  $R_p$ .气溶胶细粒子亲水特性会同时导致气溶胶的粒径和  $\eta$  的增加,而云干扰仅仅会导致  $\eta$  的增加,气溶胶细粒子的粒径保值不变.

### 1.2.2 卫星遥感数据

利用卫星遥感技术仅能获取有限的气溶胶光学特性参数,但有效克服了地基观测的地域限制问题,为及时了解大区域范围内的大气气溶胶状况进行宏观分析提供了可能.MCD19A2 是 MODIS 官方发布的气溶胶产品,使用多角度大气校正算法中的气溶胶算法产生,空间分辨率为 1 km.其反演范围广,有效弥补了暗像元和深蓝算法的缺陷,针对亮地表精度优于深蓝算法,适用于西北干旱区<sup>[30,31]</sup>.该产品采用的是正弦曲线投影,处理时需提前转换坐标系.

受相对湿度、风速、风向、降雨和沙尘天气等多重气象条件影响,AOD 时空分布及变化趋势存在一定的随机性,选取长时间序列、多年均值的 AOD 数据在一定程度上可减少气象条件等随机因素的影响.本文选择 2000 年 2 月~2020 年 2 月的 AOD 月均值数据作为数据源,对该产品进行投影-重采样-拼接-裁剪等预处理,通过月平均 AOD 数据计算年平均 AOD 值和季节平均 AOD 值,获取 AOD 空间分布变化信息,揭示研究区 2000~2019 年大气环境总体特征及变化趋势.

通过最小二乘法拟合研究区逐像元 AOD 年际变化趋势,能够描述每个栅格累计观测年内 AOD 总体变化趋势,综合反映 AOD 时空变化,计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中,slope 为 2000~2019 年 AOD 变化趋势斜率, $n$  为时长(以年为单位  $n=20$ ), $i$  为年序号,取值范围 1~ $n$ , $x_i$  为第  $i$  年 AOD.  $\text{slope} > 0$  表示研究时段 AOD 呈增加趋势; $\text{slope} < 0$  表示研究时段内 AOD

呈减小趋势, slope = 0 则表示研究时段内 AOD 基本保持不变.

### 1.2.3 MODIS AOD 的验证

基于卫星遥感技术获取的 AOD 数据是 550 nm 处的 AOD,而太阳光度计不直接提供 550 nm 处的 AOD 值. 为了与卫星遥感数据相匹配,使用 Angström 指数算法,利用受水汽影响较小的 440 nm 和 870 nm 波段的数据进行计算,得到 550 nm 波段的 AOD. 为确保卫星遥感数据的准确性,本文以地基观测站点为中心,空间窗口 30 km × 30 km<sup>[31]</sup>,匹配时间窗口 ± 30 min<sup>[32,33]</sup>的 AOD<sub>地基</sub>数据均值,选取相关系数 (R)、决定系数 (R<sup>2</sup>) 和均方根误差 (RMSE) 作为评价气溶胶产品的指标.

期望误差 (EE) 内的样本点量也可反映 MODIS AOD 产品的质量,本文采用 EE = ± (0.05 + 0.02AOD<sub>地基</sub>). 当 MODIS 反演得到的 AOD 满足 AOD<sub>地基</sub> - |EE| ≤ AOD<sub>MODIS</sub> ≤ AOD<sub>地基</sub> + |EE| 时,说明 AOD<sub>MODIS</sub> 反演结果较好. 由于观测时间有限,可匹配的样本较少,评价仅作为初步参考,若要得到更可靠的精度评价,则需更长时间序列的地基观测数据.

由图 2 可知, AOD<sub>MODIS</sub> 与 AOD<sub>地基</sub> 二者之间存在一定差异,但整体趋势较为一致. R (0.81) 和 R<sup>2</sup> (0.66) 较高, RMSE (0.06) 较低,说明利用该数据源进行 AOD 时空分布分析较为可信. 在匹配的样本中, 65.82% 在期望误差范围内, 9.49% 的样本超出期望误差上限, 24.68% 的样本超出期望误差下限, 表明研究区内 AOD<sub>MODIS</sub> 质量较好, 但存在一定程度的低估, 可以通过拟合线的截距对其进行订正. 整体而言, MCD19A2 的 AOD<sub>MODIS</sub> 产品在本文研究区内具

有良好的适用性,可成为适用于干旱区气溶胶遥感研究的优选数据源.

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于卫星遥感的 AOD 时空分布特征

#### 2.1.1 AOD 空间分布特征分析

基于 AOD<sub>MODIS</sub> 数据集进行计算, 获取研究区 2000 ~ 2019 年平均 AOD 空间分布 (图 3). 如图 3 所示, 该地区多年平均 AOD 空间分布与地形基本一致, 海拔在小于 500 m、500 ~ 1 000 m、1 000 ~ 2 000 m 和大于 2 000 m 高度范围所对应的 AOD 均值分别为 0.12、0.11、0.10 和 0.05, 随着海拔的增加, AOD 呈现减小趋势, 与相关学者<sup>[18,34]</sup>的既得成果相对比, 整体结论较为符合. 气溶胶主要集中在低海拔地区, 受天山山脉阻挡, 随气团沿北坡山脉走向, 向西-南和东-南方向扩散; 另一方面, 人类生产/生活产生的油烟、道路扬尘、工业废气及化石燃料排放的烟尘等都会受到高山阻挡而在低海拔地区积聚, 所以加剧气溶胶聚集程度; AOD 低值 (< 0.05) 区域主要分布在高海拔山区, 天山北坡中段较高的天然林覆盖也是导致该地区气溶胶浓度偏低的原因之一.

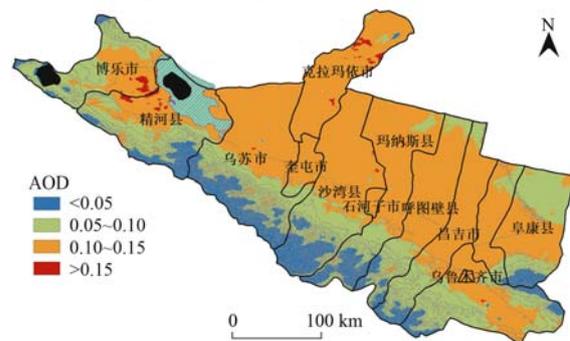
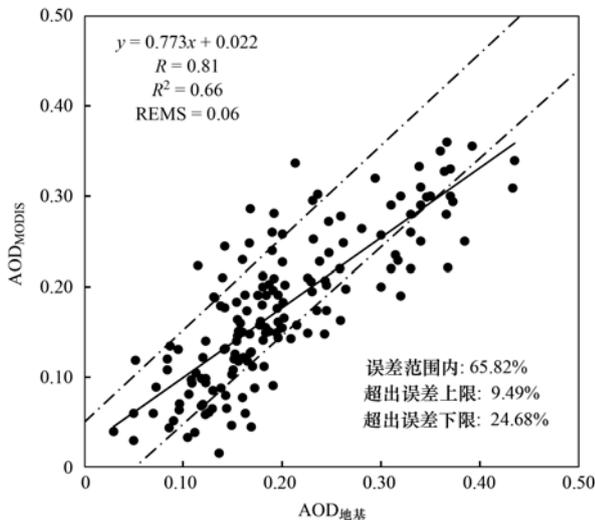


图 3 2000 ~ 2019 年多年平均 AOD 时空分布

Fig. 3 Spatial distribution of AOD during 2000-2019



虚线和实线分别代表期望误差线和线性拟合线

图 2 AOD<sub>MODIS</sub> 与 AOD<sub>地基</sub> 对比

Fig. 2 Comparison between AOD<sub>MODIS</sub> and AOD<sub>sunphotometer</sub>

图 4 为 2000 ~ 2019 年研究区所包含的 8 市 4 县 AOD 均值统计, 为了避免高海拔地区 AOD 低值的影响, 仅对海拔 < 2 000 m 高度范围内地区的 AOD 进行统计分析. 从中可知, 除克拉玛依市和乌鲁木齐市 AOD 偏高外, AOD 整体以石河子市、奎屯市和沙湾县 (0.12 ± 0.01) 为中心, 往东-南和西-北方向依次降低. 造成克拉玛依市和乌鲁木齐市 AOD 高值的原因是: 克拉玛依市是一个以石油工业为主的小型城市, 与研究区其他城市所属的天山北坡气候带相比, 该地区属于戈壁荒漠气候带, 降水少, 蒸发大, 气候十分干燥. 其东部与古尔班通古特沙漠接壤, 地处沙漠边缘, 多平坦的戈壁荒漠, 地表植被稀少, 且气候干旱少雨多大风天气, 所以外来沙尘和地面扬尘

是造成该地 AOD 高值的主要原因;乌鲁木齐市东、南、西三面环绕天山,地势东南高、西北低,从北向南逐渐收缩,形成细长的条状峡谷,其独特的地形和复杂的气象条件,不利于大气污染物的扩散,在加上该地区全疆政治、经济和文化中心,人口密集,故加剧了该地区 AOD 的聚集.

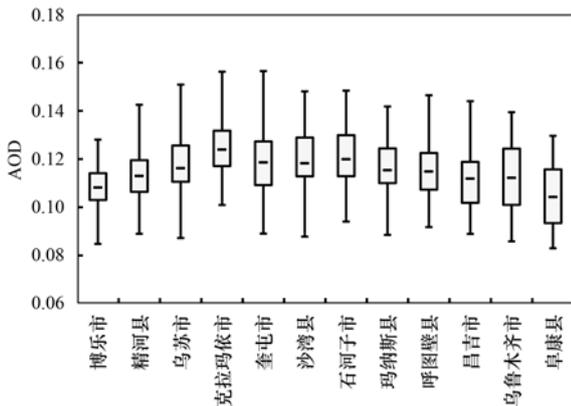


图 4 研究区各城镇 AOD 均值

Fig. 4 AOD mean value of each town in the study area

图 5 和图 6 表现出 2000 ~ 2019 年多年月平均 AOD(3 ~ 11 月)的时空分布变化特征. 1、2 月和 12 月由于季节下降雪,影响冬季 AOD 空间分布的判读,故主要针对 AOD 数据质量较好的 3 ~ 11 月进行分析. 整体而言,AOD 月均值空间分布与年均值空间分布特征保持一致,AOD 高值仍主要集中在低海拔地区,随着海拔的增加,AOD 呈现减小趋势. 3 月的 AOD > 0.15 的高值区范围较小且分散,主要集中在艾比湖周边的精河县和乌苏市,以及昌吉市和乌

鲁木齐市; 4 ~ 5 月的 AOD > 0.15 的高值区范围扩散至全区 51.61% 的面积,AOD 开始增长并达到峰值( $0.14 \pm 0.07$ ),这主要是因为春季是粉尘释放和输送的高峰,AOD 峰值的出现与该地区春季沙尘天气频发有关,此时的 AOD 呈现北高南低的区域分布特征,低值区域仍位于海拔较高的天山山脉,高值区分布较为集中; 进入夏天后,AOD 区域分布特征与春季相比有所改变. 温度的回升和降水的增多,使得 AOD 高值集聚现象逐渐瓦解. 随着大气对流活动的增加,水平输送能力增强,经济带城市群地区 AOD 开始降低,AOD 高值区域延伸至克拉玛依市中部和东北部,低值区域范围开始缩小,集中在天山北坡中段地区; 6 ~ 10 月 AOD 在 0.11 ~ 0.13 范围内,时空变化不明显; 11 月,AOD 再现峰值( $0.13 \pm 0.06$ ),主要由于该地区自 10 月下旬开始冬季供暖,与燃烧量增加有密切关系. 整体而言,本地区 AOD 存在明显的季节性差异,表现为 AOD 春季( $0.15 \pm 0.03$ ) > 秋季( $0.14 \pm 0.03$ ) > 夏季( $0.14 \pm 0.02$ ).

2.1.2 AOD 年际变化特征分析

利用线性趋势分析方法对 20 年间 AOD 变化趋势进行分析发现(图 7),AOD 变化趋势的空间分布与年均 AOD 空间分布大致相同,大部分低海拔地区 AOD 呈现增长趋势,仅高海拔山地呈小幅度减少. 全区呈现增长、下降和不变的比例分别为 58.87%、7.63% 和 33.50%,其中,乌苏市、克拉玛依市和沙湾县等地增长趋势较为明显,年增幅为 1.57%. 整体而言,2000 ~ 2019 年间研究区 AOD 年均值为 0.12,

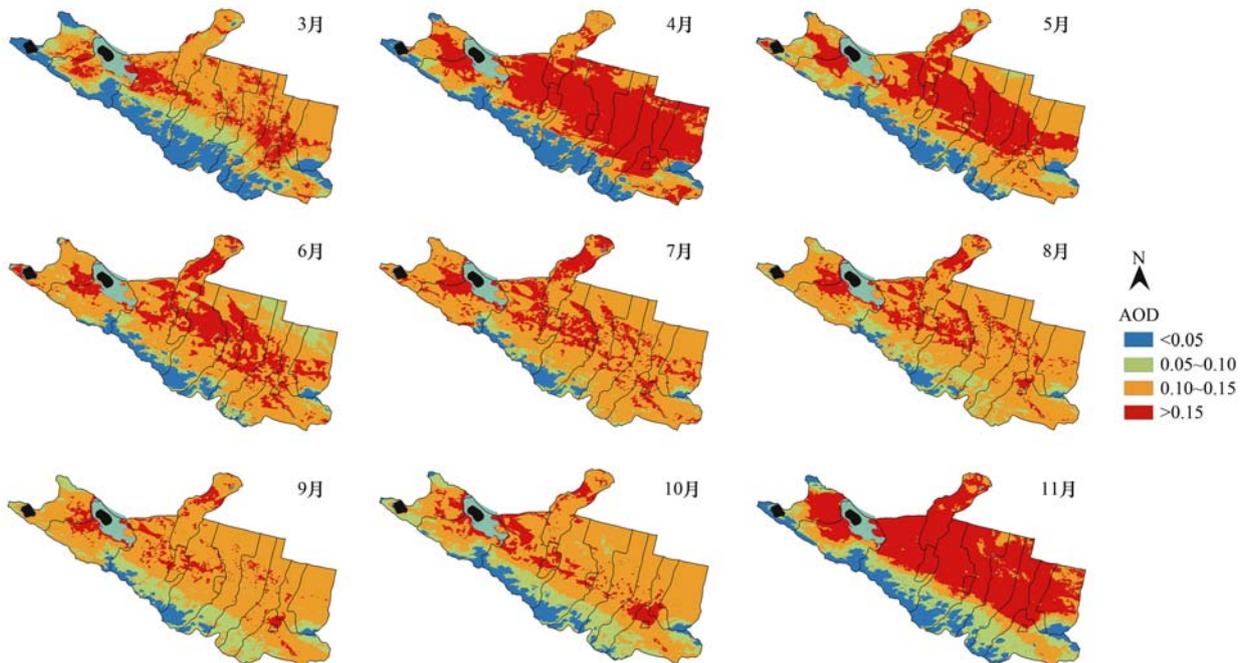


图 5 2000 ~ 2019 年研究区逐月平均 AOD 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the monthly average AOD during 2000-2019

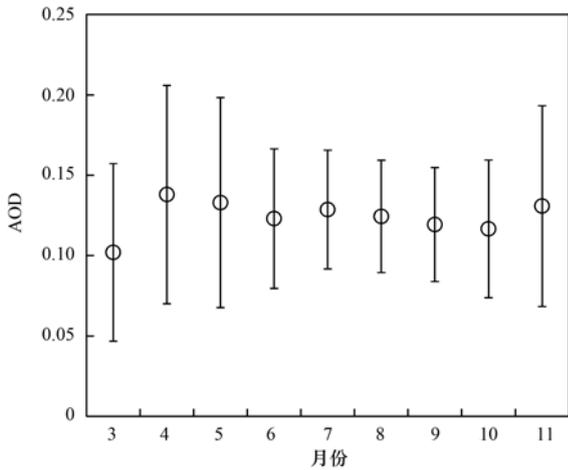


图6 2000~2019年逐月平均AOD年内分布  
Fig. 6 Annual distribution of the monthly average AOD during 2000-2019

年增幅 1.03%, 20 年间存在多次波动, 2013 年前后表现为先增大后减小, 整体呈增加趋势. 其中, 2008 年和 2013 年为两个峰值, AOD 年均值分别为 0.12 和 0.13, 自 2016 年后, AOD 较为平稳(图 8).

图 9 和图 10 表示出 20 年间 AOD 月均值(3~11 月)变化趋势空间分布及年内变化, 整体而言, 该地区 AOD 月均值的年际变化表现为双峰型, 5 月和 10 月为第一峰值和第二峰值, 分别为 2.05% 和 2.58%, 3 月最低为 0.18%, 除 4 月外, 其他月份 19 年间均呈现增加趋势. 从空间分布上来看, 该地区 AOD 月均值的年际变化空间分布差异较大, 其中, 5

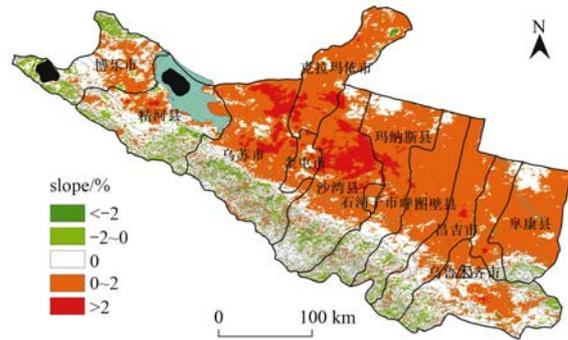


图7 2000~2019年AOD变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial changes in AOD based on inter-annual trends during 2000-2019

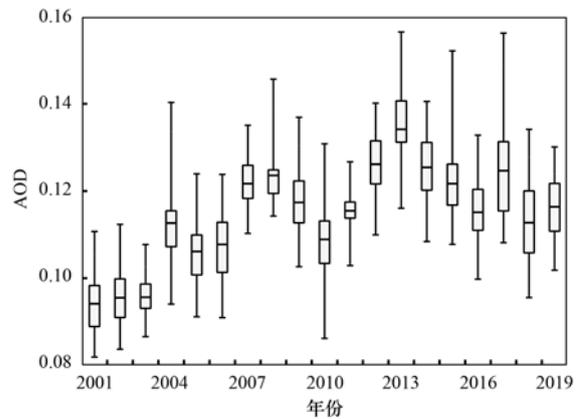


图8 2000~2019年AOD年际变化

Fig. 8 Annual changes in AOD during 2000-2019

月呈现较为明显的增加趋势, 尤其是精河、乌苏和沙

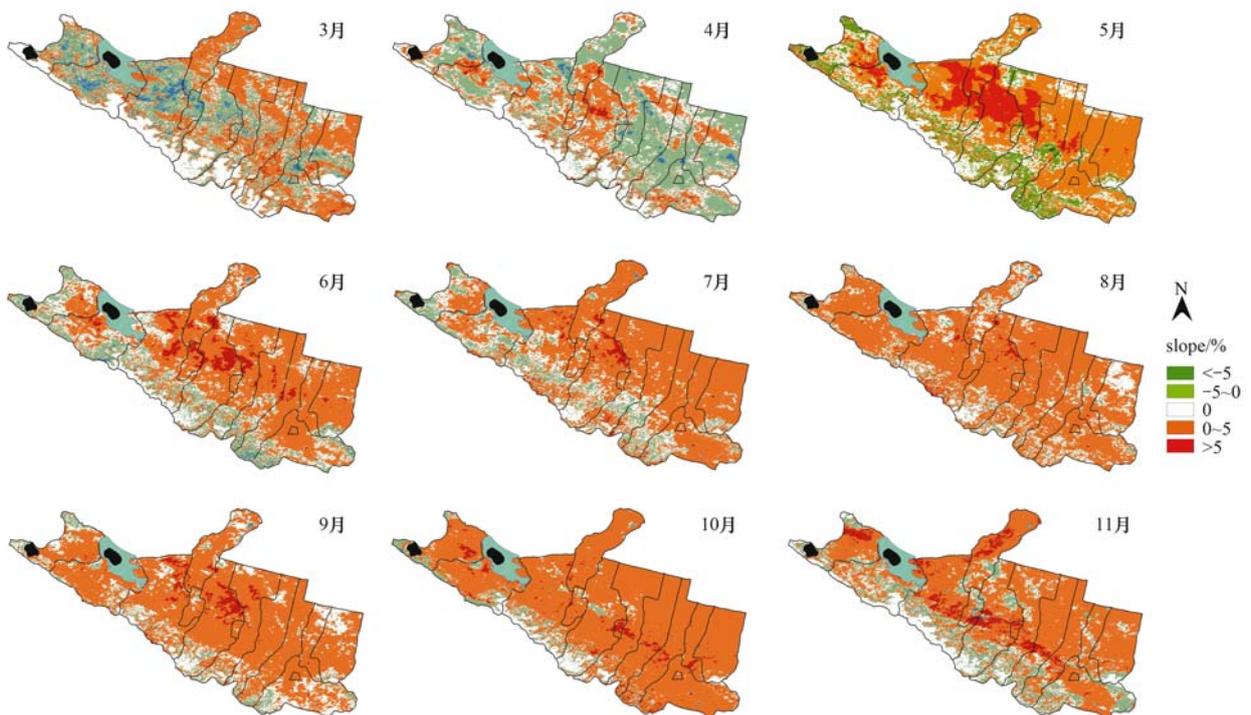


图9 2000~2019年研究区AOD年际变化趋势空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the trends of interannual variation in AOD during 2000-2019

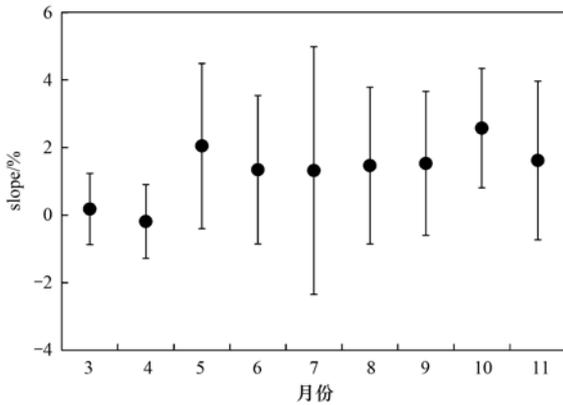


图 10 2000 ~ 2019 年月平均 AOD 变化趋年内分布

Fig. 10 Annual distribution of the changes in the monthly AOD during 2000-2019

湾等地,年增幅为 3.77%.

## 2.2 基于地基遥感的气溶胶光学特性分析

综合上述分析,选取 AOD 高值及年际变化较大的典型地区及时段设立地基观测站点,以便针对天山北坡经济带重点城市群大气环境状况进行讨论.地基观测站点设立于精河县、乌苏市、石河子市和乌鲁木齐市,空间分布较为合理.

精河县、乌苏市、石河子市和乌鲁木齐市 AOD<sub>MODIS</sub> 多年均值分别为 0.11、0.12、0.12 和 0.11,年增幅分别为 0.37%、3.11%、1.32% 和 0.21%,20 年间除乌苏地区持续增长外,精河、石河

子和乌鲁木齐市 AOD 均以 2013 年为节点呈现先增大后减小的变化趋势(图 11),符合研究区全区 AOD 变化特征,也与前人的研究结果相一致<sup>[22]</sup>. 2016 ~ 2019 年全区 AOD 较为平稳,故以此时段利用地基遥感技术所获取的气溶胶信息,作为近 4 年间研究区大气环境评价的依据较为可信.受地基观测时段限制,仅针对春季(4 ~ 5 月)和夏季(6 ~ 7 月)讨论城市群气溶胶光学特性.

### 2.2.1 AOD 和 $\alpha$ 特征分析

AOD 和 Angström 波长指数( $\alpha$ )是表征气溶胶含量和气溶胶尺度的基本参数,二者相结合进行综合讨论,在一定程度上能够反映区域大气的污染程度和污染类型.4 个典型地区地基观测得到的 AOD 和  $\alpha$  特征不存在显著的地域性差异,但季节性差异明显.对比春、夏两季 AOD 和  $\alpha$  概率分布及数理统计特征发现(图 12):城市群春、夏两季 AOD 出现频率均呈单峰型分布特征,AOD 在极端清洁值区间 0 ~ 0.10 的出现频率均较低,除此之外,随着 AOD 的增加,发生频率依次递减;春、夏 AOD 均集中分布在 0.10 ~ 0.30 区间范围,分别占总样本的 57.72% 和 72.33%;其中,夏季 AOD 分布在 0.10 ~ 0.20 和 0.20 ~ 0.30 区间的样本分别占总样 47.92% 和 24.41,高于春季的 34.57% 和 23.14%;春季和夏季在 0.30 ~ 1.00 区间范围样本数占总样本数的

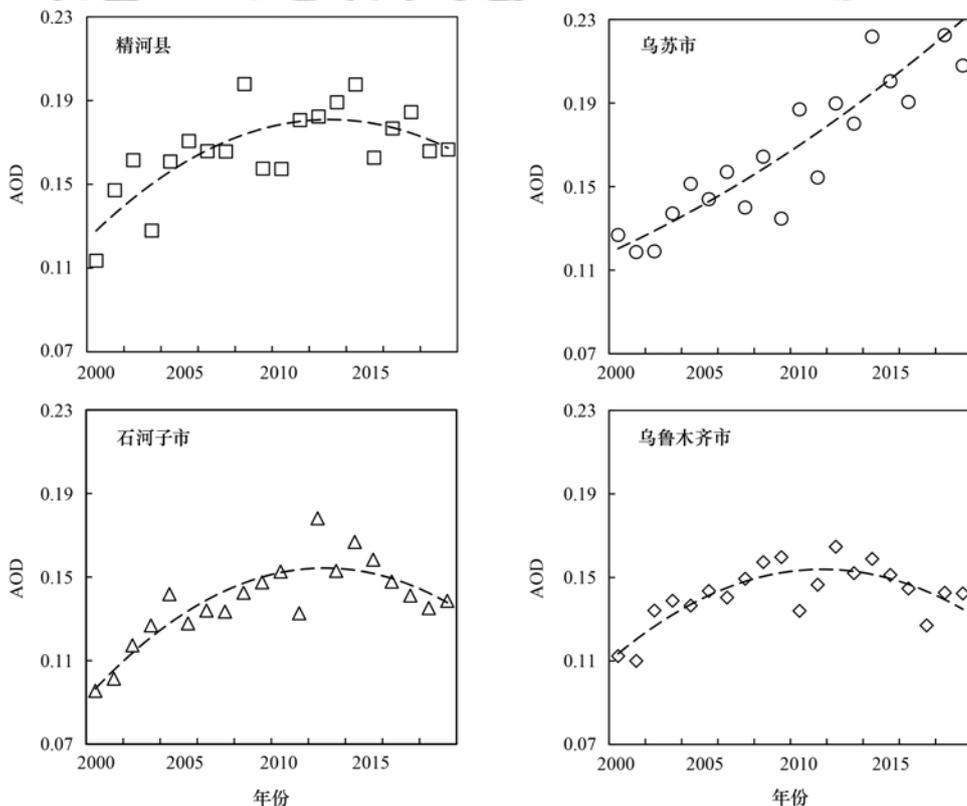


图 11 2000 ~ 2019 年地基观测站点所在城镇 AOD 年际变化

Fig. 11 AOD annual change in the town where the foundation observation stations were located during 2000-2019

38.30% 和 26.72%, 且该范围内, 以 0.10 为间隔的每个区间范围, 春季所占比例均高于夏季, 说明春季气溶胶出现高值的概率高于夏季. 观测期间春季 AOD 平均值为 0.38, 略高于夏季的 0.29; 春、夏两季 AOD 变异系数分别 59.32% 和 52.99%, 这是由于受春季沙尘天气影响, 观测期间 AOD 出现高值, 造成极大值与平均值差值过大.

与 AOD 分布情况类似,  $\alpha$  的频率分布同样呈现出单峰分布特征和季节性差异. 春季  $\alpha$  最高频区间为 0.70 ~ 0.80, 次高区间为 0.80 ~ 0.90, 分别占总

样本的 9.89% 和 9.53%, 小于 0.50 的  $\alpha$  值占总样本的 30.76%, 大于 1.10 的  $\alpha$  值占总样本的 20.57%; 夏季  $\alpha$  最高频区间为 1.20 ~ 1.40, 次高区间为 1.10 ~ 1.20, 分别占总样本的 26.37% 和 10.46%, 小于 0.50 的  $\alpha$  值占总样本的 13.15%, 大于 1.10 的  $\alpha$  值占总样本的 47.71%; 春夏两季  $\alpha$  平均值分别为 0.70 和 1.07, 变异系数分别为 59.34% 和 43.67%, 说明研究区气溶胶粒子主控模态存在季节性差异, 春季大气气溶胶主控粒子粒径大于夏季, 且粒径变化幅度较大.

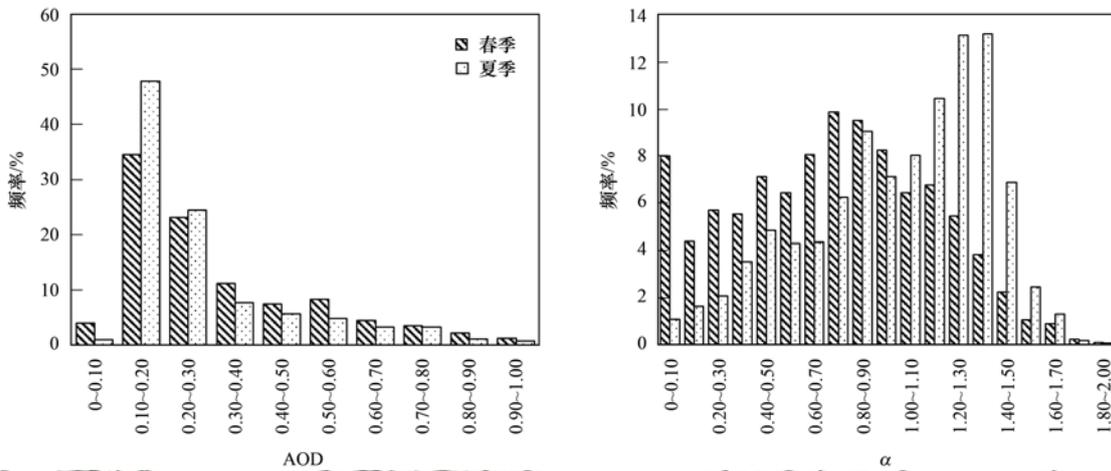


图 12 春、夏季 AOD 和  $\alpha$  的概率分布

Fig. 12 Frequency distributions of AOD and  $\alpha$  in spring and summer

2.2.2 AOD 与  $\alpha$  的关系

图 13 显示出观测期间 AOD 和  $\alpha$  日变化(08:00 ~ 21:00)特征. 与夏季相比, 春季 AOD 和  $\alpha$  具有较为明显的日变化规律. 一天之中 AOD 呈现先增长后降低的单峰型变化趋势, 峰值出现在午后的 15:00, 与  $\alpha$  波动规律具有明显的负相关关系, 说明春季 AOD 波动受主控粒子粒径变化影响较为明显. 春季  $\alpha$  日均值 0.86, 且在 AOD 高值时段(12:00 ~ 16:00),  $\alpha$  小于 0.80, 说明春季研究区受沙尘源与人为源气溶胶混合影响, 粗粒子的输入是影响该地区 AOD 日变化的主要原因. 下班晚高峰期(18:00 ~ 20:00)人类活动产生的气溶胶集中释放, 此时 AOD

在 0.20 左右波动,  $\alpha$  值明显增大, 均值升至 1.01. 夏季, 虽然  $\alpha$  波动范围较大(0.80 ~ 1.40), 但日均值为 1.12, 说明夏季人为源气溶胶占主导地位, 且在  $\alpha$  波动影响下, AOD 日变化幅度较小, 说明细模态气溶胶粒径的变化对 AOD 影响较小.

图 14 是以折射率  $m = 1.4 - 0.001i$  为参考, 采用双模态、对数正态分布的  $\alpha$  和  $\delta\alpha = \alpha_{(440-675)\text{nm}} - \alpha_{(675-870)\text{nm}}$  函数对气溶胶类型进行分类的示意. 从中可知, AOD 高值(AOD > 0.70)的情况主要出现在  $\alpha \leq 0.50, \eta < 30\%$  区域, 此时粒径大小范围约在 0.15 ~ 0.50  $\mu\text{m}$  之间, 说明 AOD 高值主要是受粗粒子气溶胶的影响; 0.15 < AOD < 0.30 时, 气溶胶主要集

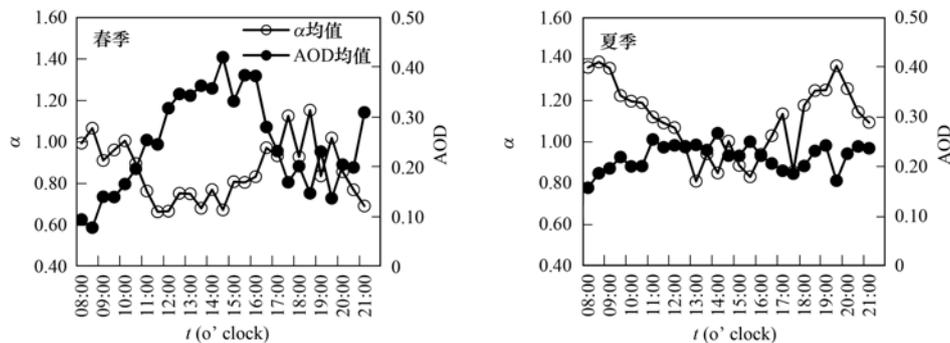
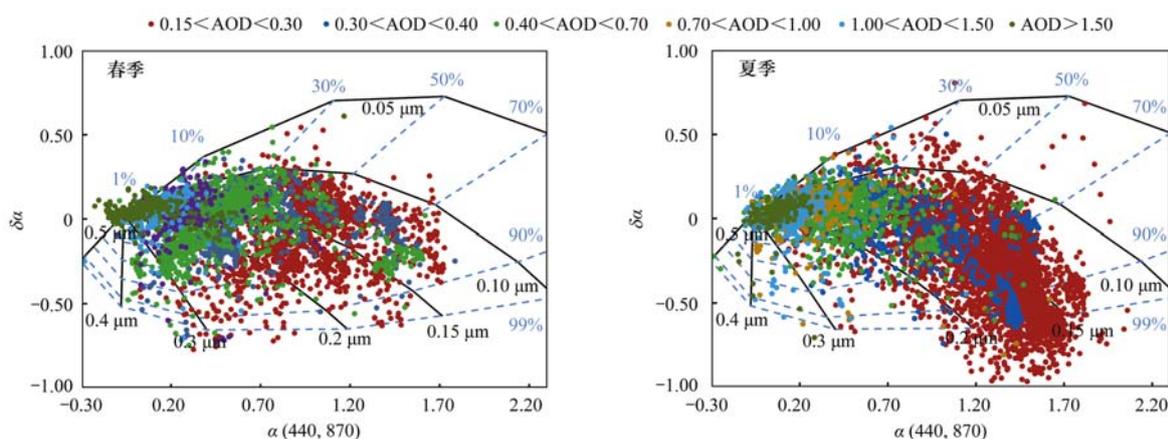


图 13 AOD 和  $\alpha$  日变化

Fig. 13 Daily variations of AOD and  $\alpha$

中在细模态粒子增长区域( $\alpha > 1.00, \delta\alpha < 0$ ), 与之相对应的  $\eta > 70\%$ , 粒径大小范围约在  $0.10 \sim 0.20 \mu\text{m}$  之间, 说明气溶胶以细模态粒子为主时, AOD 出现高值的概率很小. 夏季,  $0.30 < \text{AOD} < 0.40$  在细模态粒子增长区域( $\alpha > 1.00, \delta\alpha < 0$ ) 也偶有分布, 表现为细模态粒子 AOD 的比例( $\eta$ ) 增加但粒径保

持不变, 因此判定为云干扰; 春季, 部分  $0.40 < \text{AOD} < 0.70$  在细模态粒子增长区域( $\alpha > 1.00, \delta\alpha < 0$ ) 所占比例  $\eta > 70\%$ , 表现出气溶胶细粒子的亲水性, 但整体而言, 研究区 AOD 高值主要受粗模态粒子气溶胶的影响, 细模态粒子吸湿增长会引起 AOD 的波动, 但不易导致 AOD 高值.



黑色实线代表细模态粒子粒径的大小( $R_f$ ), 蓝色虚线代表细模态粒子 AOD 的比例( $\eta$ )

图 14 AOD<sub>675 nm</sub>、 $\alpha$  和  $\delta\alpha$  的关系

Fig. 14 Relationships among AOD<sub>675 nm</sub>,  $\alpha$ , and  $\delta\alpha$

### 3 结论

(1) 研究区 AOD 高值现象主要分布在低海拔地区, 地形与气溶胶空间分布特征基本一致; 以石河子市-奎屯市-沙湾县为中心, 往东-南和西-北方向 AOD 依次降低; AOD 存在季节性差异, 表现为 AOD 春季( $0.15 \pm 0.03$ ) > 秋季( $0.14 \pm 0.03$ ) > 夏季( $0.14 \pm 0.02$ ); 受粉尘释放的影响, 春季 AOD 较高且较为集中; 夏季, AOD 空间分布范围明显增大, 主要是因为高温高湿的环境下, 气溶胶随大气对流活动的增加, 水平输送能力增强.

(2) 2000 ~ 2019 年间研究区 AOD 年均值为 0.12, 年增幅 1.03%, 整体呈现增加趋势, 其中, 低海拔地区 AOD 呈现增长趋势, 高海拔山地呈小幅度减少趋势, 乌苏市、克拉玛依市和沙湾县等地增长趋势较为明显; 该地区 AOD 月均值的年际变化表现为双峰型, 5 月和 11 月为第一峰值和第二峰值, 春季自然尘源粉尘的释放和传输以及秋末人类社会燃煤供暖是造成 AOD 增加的主要原因.

(3) 研究区气溶胶粒子浓度和主控模态具有明显的季节性差异. 观测期间, AOD 春季(0.38) > 夏季(0.29), 变异系数分别为 59.32% 和 52.99%, 受沙尘天气的影响, 春季 AOD 的变化幅度较为剧烈;  $\alpha$  表现为夏季(1.07) > 春季(0.70); 变异系数分别为 59.34% 和 43.67%, 春季气溶胶主控粒子粒径及

变化幅度均大于夏季; 研究区 AOD 高值主要受粗模态粒子气溶胶的影响, 细模态粒子吸湿增长会引起 AOD 的波动, 但不易导致 AOD 高值.

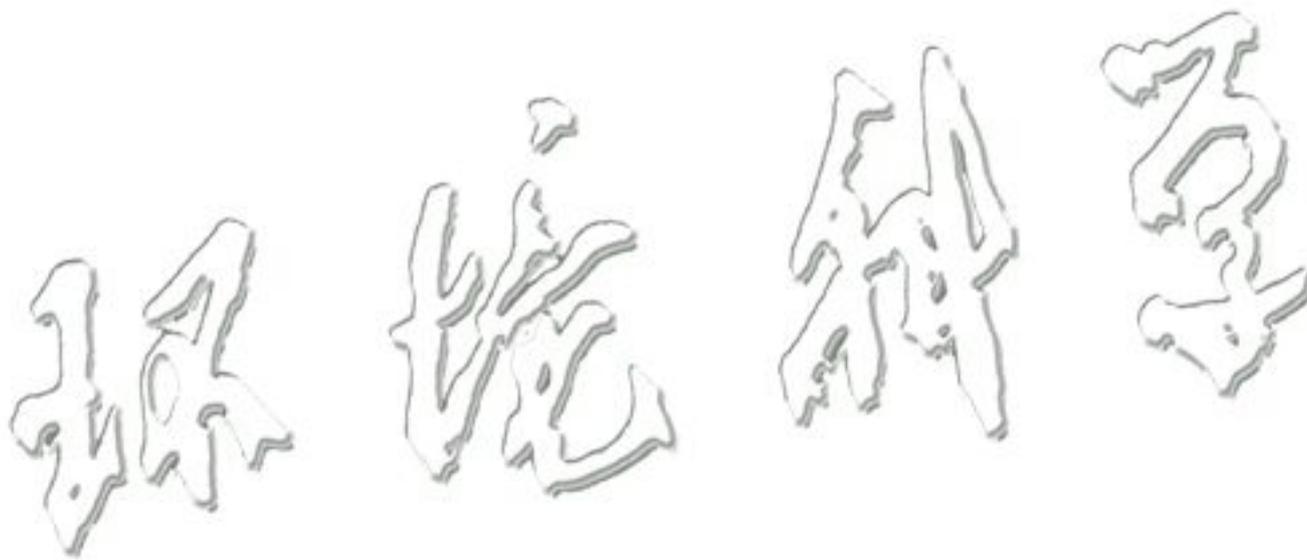
(4) 本文综合地基和卫星遥感技术, 分析天山北坡经济带重点城市 2000 ~ 2019 年气溶胶时空分布特征和演变规律, 评价该区域大气环境现状, 但对影响气溶胶时空分布格局的影响因子分析较为浅显, 未深入讨论目前形成此格局的内在原因. 下一步工作会将重点放在气候变化对气溶胶的影响等方面, 深入讨论不同尺度气象因子对局地气溶胶格局的影响.

### 参考文献:

- [1] Coakley J A Jr, Cess R D, Yurevich F B. The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: a parameterization for climate models [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, **40**(1): 116-138.
- [2] Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, **34**(7): 1149-1152.
- [3] Rosenfeld D, Andreae M O, Asmi A, *et al.* Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, **52**(4): 750-808.
- [4] 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.
- [5] 齐冰, 杜荣光, 于之锋, 等. 杭州市大气气溶胶光学厚度研

- 究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(3): 588-595.
- Qi B, Du R G, Yu Z F, *et al.* Aerosol optical depth in urban site of Hangzhou[J]. Chinese Environmental Science, 2014, **34**(3): 588-595.
- [6] Barreto Á, Cuevas E, Granados-Muñoz M J, *et al.* The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer-a comprehensive performance evaluation [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, **9**(2): 631-654.
- [7] 韩亚芳, 吴立新, 白杨, 等. 太湖北岸气溶胶光学特性长期变化特征[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2492-2503.
- Han Y F, Wu L X, Bai Y, *et al.* Long-term variation of aerosol optical properties at Tai Lake's North Bank [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2492-2503.
- [8] 张芝娟. 基于多源数据的气溶胶光学特性及时空分布特征的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- Zhang Z J. Study on characteristics of aerosol optical property and spatio-temporal distribution based on multi-source datasets[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [9] 闭建荣. 西北地区气溶胶特征及其直接辐射强迫的观测模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- Bi J R. Observation and simulation study of aerosol features and their direct radiative forcing over northwestern China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [10] 衣娜娜, 张镭, 刘卫平, 等. 西北地区气溶胶光学特性及辐射影响[J]. 大气科学, 2017, **41**(2): 409-420.
- Yi N N, Zhang L, Liu W P, *et al.* Optical characteristics and radiative effects of atmospheric aerosol over Northwest China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, **41**(2): 409-420.
- [11] 白冰, 张强, 陈旭辉, 等. 中国西北干旱半干旱区气溶胶分类及特征[J]. 中国沙漠, 2019, **39**(5): 105-110.
- Bai B, Zhang Q, Chen X H, *et al.* Classification and characteristics of aerosols in Arid and semi-arid Areas of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2019, **39**(5): 105-110.
- [12] Christopher S A, Zhang J L. Shortwave aerosol radiative forcing from MODIS and CERES observations over the oceans [J]. Geophysical Research Letters, 2002, **29**(18), doi: 10.1029/2002GL014803.
- [13] Ichoku C, Remer L A, Kaufman Y J, *et al.* MODIS observation of aerosols and estimation of aerosol radiative forcing over southern Africa during SAFARI 2000[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(13), doi: 10.1029/2002JD002366.
- [14] Benas N, Hatzianastassiou N, Matsoukas C, *et al.* Aerosol shortwave direct radiative effect and forcing based on MODIS Level 2 data in the eastern Mediterranean (Crete) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(24): 12647-12662.
- [15] Fu Y F, Zhu J C, Yang Y J, *et al.* Grid-cell aerosol direct shortwave radiative forcing calculated using the SBDART model with MODIS and AERONET observations: an application in winter and summer in eastern China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, **34**(8): 952-964.
- [16] 张西雅, 扈海波. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究[J]. 大气科学, 2017, **41**(4): 797-810.
- Zhang X Y, Hu H B. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, **41**(4): 797-810.
- [17] 陈洪滨, 范学花, 夏祥鳌. 大气气溶胶的卫星遥感及其在气候和环境研究中的应用[J]. 大气科学, 2018, **42**(3): 621-633.
- Chen H B, Fan X H, Xia X A. Review of satellite remote sensing of atmospheric aerosols and its applications in climate and environment studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, **42**(3): 621-633.
- [18] 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.
- [19] 赵仕伟, 高晓清. 利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2637-2646.
- Zhao S W, Gao X Q. Analysis of spatio-temporal distribution and variation characteristics of aerosol optical depth over the Northwest of China by MODIS C6 product [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2637-2646.
- [20] 高宇潇, 刘志辉, 王敬哲. 乌鲁木齐市 PM<sub>2.5</sub> 浓度与 MODIS 气溶胶光学厚度相关性分析[J]. 干旱区地理, 2018, **41**(2): 298-305.
- Gao Y X, Liu Z H, Wang J Z. Correlation analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration and MODIS aerosol optical depth in Urumqi City [J]. Arid Land Geography, 2018, **41**(2): 298-305.
- [21] 胡俊, 钟珂, 亢燕铭, 等. 新疆典型城市气溶胶光学厚度变化特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(10): 4074-4081.
- Hu J, Zhong K, Kang Y M, *et al.* Variation in aerosol optical depth over the typical cities in the Xinjiang region [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(10): 4074-4081.
- [22] 雷茜. “一带一路”区域大气气溶胶时空动态特征及环境效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- Lei X. The spatial and temporal characteristics of atmospheric aerosol and its environmental effects over the Belt and Road [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [23] 马珊. 丝绸之路甘肃-新疆段沿线城市大气气溶胶物化性质研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- Ma S. Study on physical and chemical properties of atmospheric aerosols along the Silk Road in Gansu and Xinjiang [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [24] 陶江, 杨德刚. 天山北坡经济带可持续发展能力的综合评价[J]. 干旱区地理, 2005, **28**(6): 874-878.
- Tao J, Yang D G. Synthesized evaluation on the sustainable development capacity of the Economic Belt on the northern slope of the Tianshan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2005, **28**(6): 874-878.
- [25] 张山清, 普宗朝, 李新建, 等. 气候变化对天山北坡经济带设施农业气候适宜性的影响[J]. 中国农业气象, 2016, **37**(5): 495-504.
- Zhang S Q, Pu Z C, Li X J, *et al.* Impact of climate change on facility agriculture climatic suitability in Economic Belt on North Slope of Tianshan Mountains in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, **37**(5): 495-504.
- [26] 毕雪岩, 吴兑, 谭浩波, 等. Microtops II 型太阳光度计的使用、计算及定标[J]. 气象科技, 2007, **35**(4): 583-588.
- Bi X Y, Wu D, Tan H B, *et al.* Application, calculation and calibration of Microtops II sunphotometer [J]. Meteorological Science and Technology, 2007, **35**(4): 583-588.
- [27] Habib A, Chen B, Khalid B, *et al.* Estimation and inter-comparison of dust aerosols based on MODIS, MISR and

- AERONET retrievals over Asian desert regions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **76**: 154-166.
- [28] 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.
- [29] Gobbi G P, Kaufman Y J, Koren I, *et al.* Classification of aerosol properties derived from AERONET direct sun data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(2): 453-458.
- [30] Tao M H, Wang J, Li R, *et al.* Performance of MODIS high-resolution MAIAC aerosol algorithm in China: characterization and limitation[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **213**: 159-169.
- [31] 李忠宾, 王楠, 张自力, 等. 中国地区 MODIS 气溶胶光学厚度产品综合验证及分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4190-4204.
- Li Z B, Wang N, Zhang Z L, *et al.* Validation and analyzation of MODIS aerosol optical depth products over China [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4190-4204.
- [32] He Q Q, Zhang M, Huang B, *et al.* MODIS 3 km and 10 km aerosol optical depth for China; evaluation and comparison[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **153**: 150-162.
- [33] Anderson J C, Wang J, Zeng J, *et al.* Long-term statistical assessment of Aqua-MODIS aerosol optical depth over coastal regions: bias characteristics and uncertainty sources[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, **65**(1), doi: 10.3402/tellusb.v65i0.20805.
- [34] 李慧娟, 胡列群, 李帅. 北疆地区 MODIS 3 km 气溶胶光学厚度与 PM<sub>10</sub> 质量浓度的相关性分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1109-1116.
- Li H J, Hu L Q, Li S. A correlation analysis of MODIS 3 km aerosol optical depth and PM<sub>10</sub> concentration in northern Xinjiang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38** (3): 1109-1116.



## CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Winter in Beijing .....	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019 .....	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019 .....	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China .....	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season .....	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an .....	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission .....	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City .....	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou .....	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province .....	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains .....	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images .....	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu .....	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake .....	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China .....	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal .....	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events .....	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes .....	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake .....	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River .....	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu .....	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region .....	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water .....	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag .....	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants .....	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> /g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance .....	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation .....	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water .....	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Composites and Its Mechanism for Chromium Removal .....	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems .....	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System .....	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates .....	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation .....	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste .....	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage .....	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China .....	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels .....	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet .....	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City .....	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil .....	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan .....	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PNEG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base .....	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce .....	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil .....	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology .....	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River .....	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area .....	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance .....	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods .....	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)