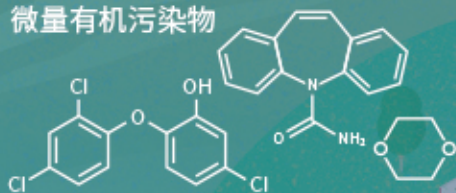


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
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 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI)的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析

金国囡¹, 杨兴川², 晏星², 赵文吉^{1*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京师范大学全球变化与地球系统科学学院, 北京 100875)

摘要: 基于 2014~2018 年京津冀及周边地区 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度数据, 探讨 AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度的时空差异, 并利用线性回归探讨两者之间的相关性。结果表明, PM_{2.5} 日均浓度超标天数分别占 33% 和 57% (执行世界卫生组织 IT.1 和 IT.2 日均标准值), 污染较为严重。Terra、Aqua MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 年均浓度均呈下降趋势, PM_{2.5} 浓度呈现出冬春季高、夏秋季低的特点, 而 Terra、Aqua AOD 则表现为春夏季高、秋冬季低。PM_{2.5} 及 AOD 的季均和年均浓度均呈现“北低南高”的区域分布特征, 高值区主要位于河北南部、山西南部、山东西部以及河南北部, 低值区主要位于山西北部、河北北部以及山东东部。PM_{2.5} 年均浓度介于 27~99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, AOD 年均值介于 0.20~0.69。Aqua AOD 与 PM_{2.5} 浓度的相关性更高, 且不同季节 Terra、Aqua AOD 与 PM_{2.5} 相关性差异显著, 总体均表现为春夏季良好, 夏秋季相对较差。对卫星 AOD 进行垂直和湿度订正后, 其与 PM_{2.5} 的相关性显著提高。

关键词: 京津冀及周边; MAIAC AOD; PM_{2.5}; 时空分布; 相关性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2604-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009200

MAIAC AOD and PM_{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas

JIN Jian-nan¹, YANG Xing-chuan², YAN Xing², ZHAO Wen-ji^{1*}

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the MAIAC AOD and PM_{2.5} mass concentration data for the Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas from 2014 to 2018, the temporal and spatial differences in Aerosol Optical Depth (AOD) and PM_{2.5} mass concentrations were explored and their correlation was analyzed by linear regression. The results show that the daily average concentration of PM_{2.5} exceeds the standard for 33% and 57% of measurements based on the daily average standard values of the World Health Organization IT.1 and IT.2, respectively, indicating serious pollution levels. The annual average concentrations of PM_{2.5} and Terra and Aqua MAIAC AOD all show downward trends. The PM_{2.5} concentrations are high in winter and spring and low in summer and autumn; Terra and Aqua AOD values are high in spring and summer and low in autumn and winter. The seasonal and annual average concentrations of PM_{2.5} and AOD all show the regional pattern of “low in the north and high in the south”. High-value areas are mainly located in southern Hebei, southwestern Shanxi, western Shandong, and northern Henan, while low-value areas are mainly located in northwestern Shanxi, northern Hebei, and eastern Shandong. The annual average concentration of PM_{2.5} is between 27 and 99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and the annual average AOD is between 0.20 and 0.69. The correlation between Aqua AOD and PM_{2.5} concentration is strong whereas the correlations between Terra AOD, Aqua AOD, and PM_{2.5} vary significantly in different seasons; overall, correlations are strongest in spring and winter and weakest in summer and autumn. After vertical-humidity correction, the correlation between satellite AOD and PM_{2.5} data is significantly improved.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas; MAIAC AOD; PM_{2.5}; temporal and spatial distribution; correlation

大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称, 粒子的空气动力学直径多在 $10^{-3} \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。气溶胶对大气能见度、地球-大气系统的辐射预算、云形成过程、降水和人类健康有重要影响^[1]。气溶胶光学厚度(AOD)定义为介质的消光系数在垂直方向上的积分, 是描述气溶胶对光的削减作用的。对于以细模态为主的气溶胶, AOD 通常会随着波长的增加而减小^[2]。细颗粒物(PM_{2.5})是指空气动力学当量直径不超过 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 对全球气候、大气环境质量和人体健康等有着重要影响^[3,4]。目前对 PM_{2.5} 的监测主要依赖于地面的监测

站点, 但由于地面监测站点的数量和空间覆盖范围有限, 因此难以提供丰富的监测数据, 对 PM_{2.5} 的监测缺乏空间上的延续性。与有限的地基监测相比, 卫星遥感具有空间分辨率高、监测范围广、速度快、成本低和能够长期全天候实时监测的特点, 可以弥补地面监测的不足^[5~8]。关于卫星遥感获得的 AOD

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0706004, 2018YFC0706000); 国家自然科学基金项目(42071422)

作者简介: 金国囡(1994~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气遥感, E-mail: zkmjnn1994@163.com

* 通信作者, E-mail: zhwenji1215@163.com

数据能够合理反映近地面细颗粒物质量浓度的情况,很多学者进行了大量针对性的研究,结果表明,卫星 AOD 与地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度有较好的正相关性^[9~14].但由于气溶胶的化学成分和光学特性在时间和空间上是不均匀的,导致卫星 AOD 和地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度之间的关系存在较大的时空差异^[15~18].因此研究不同区域 AOD 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系具有重要意义,这将改善卫星反演近地面细颗粒物质量浓度的方法.

随着城市化和工业化的快速推进,以煤炭为主的能源结构和以重工业为主的产业结构导致了我国严重的大气污染问题^[19].京津冀及周边地区是我国大气污染最严重的区域^[20,21],自 2013 年以来,该地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著增加,并导致了严重的大气污染事件,成为关注度最高的环境污染地区^[22~29].连续监测卫星 AOD 和地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对于研究区域气溶胶的气候和环境影响至关重要. AOD 和 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的经验关系将使卫星和地面观测数据统一化.对于 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性的研究,所用的卫星 AOD 资料大多来自中分辨率成像光谱仪(MODIS),它可以每天对全球进行观测,并且提供较为准确的数据信息^[30].但是传统采用 MOD04 算法的 10 km 分辨率 MODIS AOD 很难预测城市规模的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度^[31,32].近来,美国国家航天局(NASA)发布了 1 km 分辨率的气溶胶产品,该产品提供的 AOD 采用一种新的多角度大气校正(MAIAC)算法生产^[33,34],这为研究 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关性特征提供了更精细的资料.

本文以 2014~2018 年 MODIS 1 km 分辨率的 MAIAC AOD 产品和地面监测 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度为数据源,分析了京津冀及周边地区 AOD 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化特征,探讨了二者之间的相关性,以期全面评估 MODIS MAIAC AOD 产品在京津冀及周边地区反演 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度的效果提供参考.

1 材料与方法

1.1 MAIAC AOD 数据

MCD19A2 是中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)官方高分辨率(1 km)的陆地 2 级网格(L2G)AOD 日产品,其使用多角度大气校正(multi-angle implementation of atmospheric correction, MAIAC)算法生产,目前版本为 Collection6. MODIS 传感器搭载于 NASA 的地球观测系统(earth observation system, EOS)的上午星 Terra 和下午星 Aqua 上, Terra 过境时间为地方时 10:30 左右, Aqua 过境时间为地方时 13:30 左右,

MAIAC AOD 产品通过 Terra 和 Aqua MODIS 数据共同反演得到^[35]. MAIAC 基于时间序列分析和影像处理方法可以对深色植被覆盖区和亮地表区(如沙漠)进行大气校正和气溶胶反演^[34],与传统的 MODIS AOD 反演算法相比, MAIAC AOD 在暗地表区有相似的反演精度,在亮地表区精度更高,且其分辨率和有效观测范围有很大地提升^[36,37].数据可以从官网 LAADS DAAC (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>)下载.

本研究采用 2014~2018 年覆盖京津冀、山东省、山东省和河南省的 MAIAC AOD 产品,对其进行重投影、镶嵌和裁剪等预处理后获得 550 nm 波段的 AOD 数据,其灰度值一般在 0~5 000 之间,比例因子为 1 000,真实数据值应在给定值的基础上乘 0.001,即气溶胶光学厚度的真值是灰度值的 0.001 倍.

1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度

$\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据为 2014~2018 年共 306 个环境空气监测站点实时发布的 24 h 连续监测数据,其中包括北京市环境保护监测中心(<http://www.bjmemc.com.cn/>)发布的 35 个市内空气质量监测点,以及天津市 14 个、河北省 53 个、山西省 58 个、山东省 71 个和河南省 75 个观测资料较为完整的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测站点,其来源为中国环境监测总站的全国空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>).研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点分布如图 1 所示.

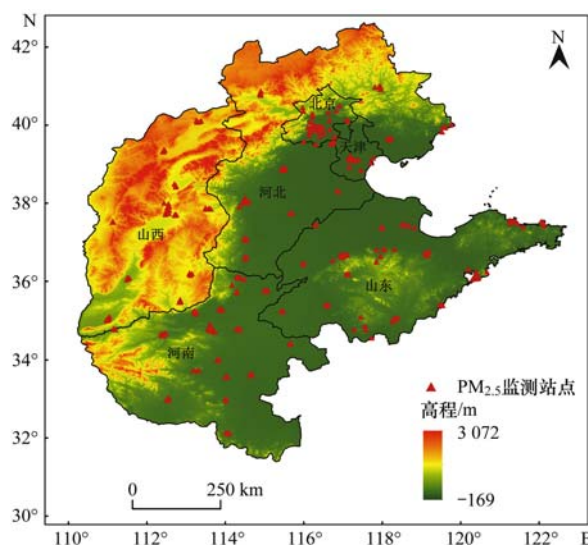


图1 京津冀及周边 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点分布示意

Fig. 1 Distribution of $\text{PM}_{2.5}$ monitoring stations in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas

1.3 气象数据

本研究采用的气象数据来源于欧洲中期天气预

报中心 (european centre for medium-range weather forecasts, ECMWF) 的气象再分析资料 ERA5 数据 (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>), 其为继 ERA-Interim 之后发布的第 5 代再分析资料, 相较于 ERA-Interim, ERA5 同化了更多观测数据, 空间分辨率提高到了 0.125° , 时间分辨率提高到了 1 h, 增加了 140 种变量. 本研究选用京津冀及周边地区 2014 ~ 2018 年 0.125° 的 ECMWF-ERA5 气象模式数据, 气象变量包括边界层高度 (boundary layer height, BLH) 和相对湿度 (relative humidity, RH).

1.4 质量控制与数据匹配

由于观测仪器的软硬件故障, 或人为操作等原因, 观测数据可能存在误差或错误, 因此需要首先进行质量控制. $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度值满足以下条件之一视为无效值: 连续 12 h 以上数值保持不变; 小时浓度值偏离当天 24 h 的质量浓度均值的 3 倍标准差以上; 质量浓度值大于 $999 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[38]. 同时剔除 AOD 值大于 2 的数据, 以消除云检测不彻底造成的影响^[8].

空间上 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点是固定的, 而卫星 AOD 的像元位置是变化的, 且 AOD 数据的空间分辨率与 ERA5 数据不一致; 时间上由于 Terra 卫星过境时间为当地时间上午 10:30 左右, Aqua 卫星过境时间为当地时间下午 13:30 左右, 而地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为逐小时数据. 故需要对 AOD、气象数据和 $\text{PM}_{2.5}$ 数据进行时空匹配. 首先进行空间匹配, 采用双线性内插方法对 ERA5 数据做降尺度处理, 将其空间分辨率调整成与 AOD 数据一致, 以每个 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点为基准, 取像元中心位置距离监测站点最近的 AOD 像元为中心像元, 将从中心像元处获得的 AOD 值赋予 $\text{PM}_{2.5}$ 的监测点, 即最近邻法^[39,40]. 其次进行时间匹配, 取卫星过境时刻前后半个小时内的 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度平均值, 分别与 Terra 和 Aqua MAIAC AOD 值进行匹配, 取与 AOD 过境时间最邻近的 ERA5 数据作为 AOD 过境时间的气象数据.

2 结果与讨论

2.1 MAIAC AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 时间变化特征

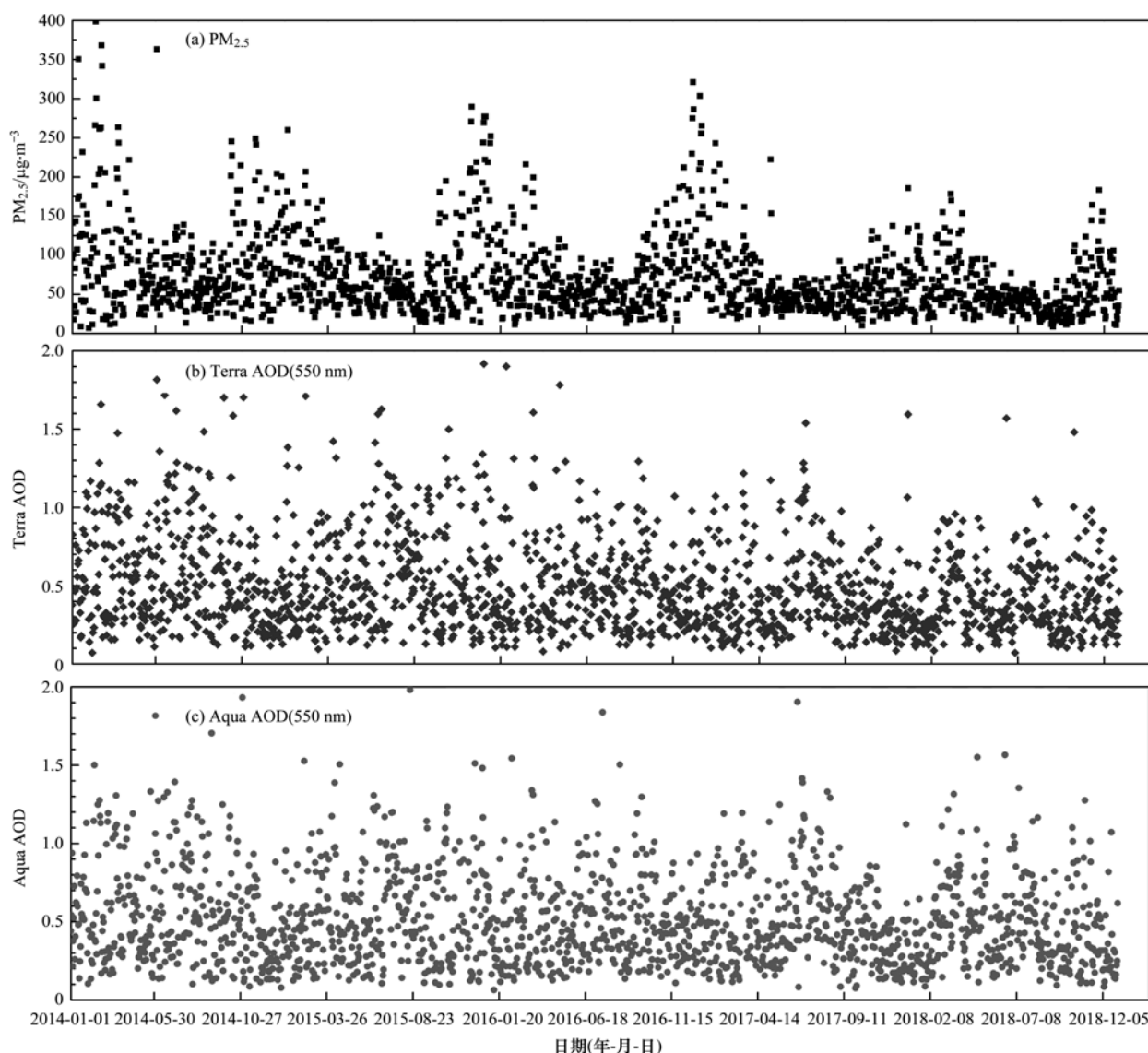
本研究选取的时间段为 2014 年 1 月 ~ 2018 年 12 月, 图 2 是 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及 Terra、Aqua MAIAC AOD 的日均变化统计. 可以看出, 京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化范围为 $7 \sim 399 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过世界卫生组织 (WHO) IT. 1 日均标准值 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的天数占 33%, 超过世界卫生组织 (WHO) IT. 2 日均标准值 ($50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的天数占 57%. 其中高值主要集中在冬季 (12 月至次

年 2 月). Terra MAIAC AOD 的日变化范围为 $0.07 \sim 1.92$, 平均值为 0.50, 其值主要集中在 $0 \sim 1.0$, 占到 92.7%. Aqua MAIAC AOD 的日变化范围为 $0.06 \sim 1.99$, 平均值为 0.51, 其值同样主要集中在 $0 \sim 1.0$, 占到 92.4%. Terra 和 Aqua MAIAC AOD 日均值变化差异较小, 基本一致.

图 3 是 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及 Terra、Aqua MAIAC AOD 的月均变化统计. 可以看出, 5 年间京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度在 $29 \sim 153 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间变化, 5a 均值分别为 89、77、71、61 和 $54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 整体呈下降趋势, 表明近几年伴随大气污染治理, 细颗粒物污染在逐步下降. 同时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度表现出冬春季高, 夏秋季低的特点 (3 ~ 5 月为春季, 6 ~ 8 月为夏季, 9 ~ 11 月为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季), 2014 年 2 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度月均值最高达到 $153 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2018 年 9 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度月均值最低为 $29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 这主要是由于夏秋季降雨丰富, 空气对流强, 大气边界层高度更高, 有利于颗粒物沉降和扩散, 所以夏秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度更低; 而冬季受下沉气流控制, 不利于颗粒物扩散, 再加上冬季采暖加大了污染物排放, 同时受春季沙尘天气影响, 导致冬春季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高. Terra MAIAC AOD 在 $0.28 \sim 0.74$ 之间变化, 5a 均值分别为 0.58、0.57、0.49、0.44 和 0.40, AOD 变化整体呈下降趋势, 5 ~ 11 月 AOD 变化幅度较大, 其他月份变化较平稳. 同时 AOD 表现出春夏季高, 秋冬季低的特点, 2015 年 7 月 AOD 月均值最高达到 0.74, 2018 年 9 月 AOD 月均值最低为 0.28. 这主要是由于夏半年气温高、湿度大, 大气中水汽含量大幅提高, 大气细粒子吸湿增长, 有利于“气-粒”转化过程中生成气溶胶, 促进了夏季 AOD 的增长; 而冬季相对湿度小, 气溶胶粒子吸湿增长性受到抑制, 且日照时间短, 二次气溶胶生成量较少, 故冬季 AOD 值偏低. Aqua MAIAC AOD 在 $0.27 \sim 0.75$ 之间变化, 5a 均值分别为 0.56、0.55、0.49、0.48 和 0.46, AOD 变化整体呈下降趋势, 2018 年整体变化幅度较大, 其余年份的 5 ~ 12 月 AOD 变化幅度较大, 其他月份变化较平稳. 同时 AOD 整体表现出春夏季高, 秋冬季低的特点, 除了 2014 年高值区出现在秋季, 2015 年和 2016 年低值区出现在春季, 2015 年 7 月 AOD 月均值最高达到 0.75, 2018 年 1 月 AOD 月均值最低为 0.27.

2.2 MAIAC AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 空间变化特征

研究区各监测点 2014 ~ 2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 季均浓度和年均浓度空间分布如图 4 所示. 从中可以看出 $\text{PM}_{2.5}$ 的季均浓度和年均浓度均存在明显的空间差异, 整体呈现“北低南高”的区域分布特征, $\text{PM}_{2.5}$ 年

图2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及 AOD 的日均变化Fig. 2 Daily average changes in $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations and AOD

均浓度高值区主要位于河北南部,低值区主要位于山西北部、河北北部以及山东东部, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度介于 $27 \sim 99 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 河北南部位于华北平原,地势平坦,人口密集且工业生产活动集中,城市化加剧,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重;而河北北部多为山地,植被覆盖良好且人类活动较少, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低. 河北南部、天津、山东西北部地区四季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均较高,北京春夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,秋冬季高值区主要位于北京南部;河北北部、山西北部、山东东部地区四季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均较低,河南南部夏秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低.

研究区各监测点 2014 ~ 2018 年 Terra MAIAC AOD 季均值和年均值空间分布如图 5 所示. 从中可以看出 Terra AOD 的季均值和年均值均存在明显的空间差异,同样整体呈现“北低南高”的区域分布特征. AOD 年均高值区主要位于河北南部、山西南部、

山东西部以及河南北部等人口相对密集和经济较为发达的地区,低值区主要位于山西北部、河北北部以及山东东部,AOD 值介于 $0.20 \sim 0.67$. 这些很好地反映了局地排放源和地形对 AOD 空间分布的影响. 河北南部、山东西部和山西南部四季 AOD 值均较高,北京、天津和唐山春季 AOD 值较高,其余季节相对较低,河南北部春夏季 AOD 值较高,而秋冬季整个河南地区 AOD 值均较高;河北北部、山西北部和山东东北部四季 AOD 值均较低,河南南部夏季 AOD 值较低,北京、天津地区冬季 AOD 值较低. AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布具有较高的一致性.

研究区各监测点 2014 ~ 2018 年 Aqua MAIAC AOD 季均值和年均值空间分布如图 6 所示. 从中可以看出 Aqua AOD 的季均值和年均值均存在明显的空间差异,但与 Terra AOD 具有很好的一致性,同样呈现“北低南高”的区域分布特征. Aqua AOD 年均

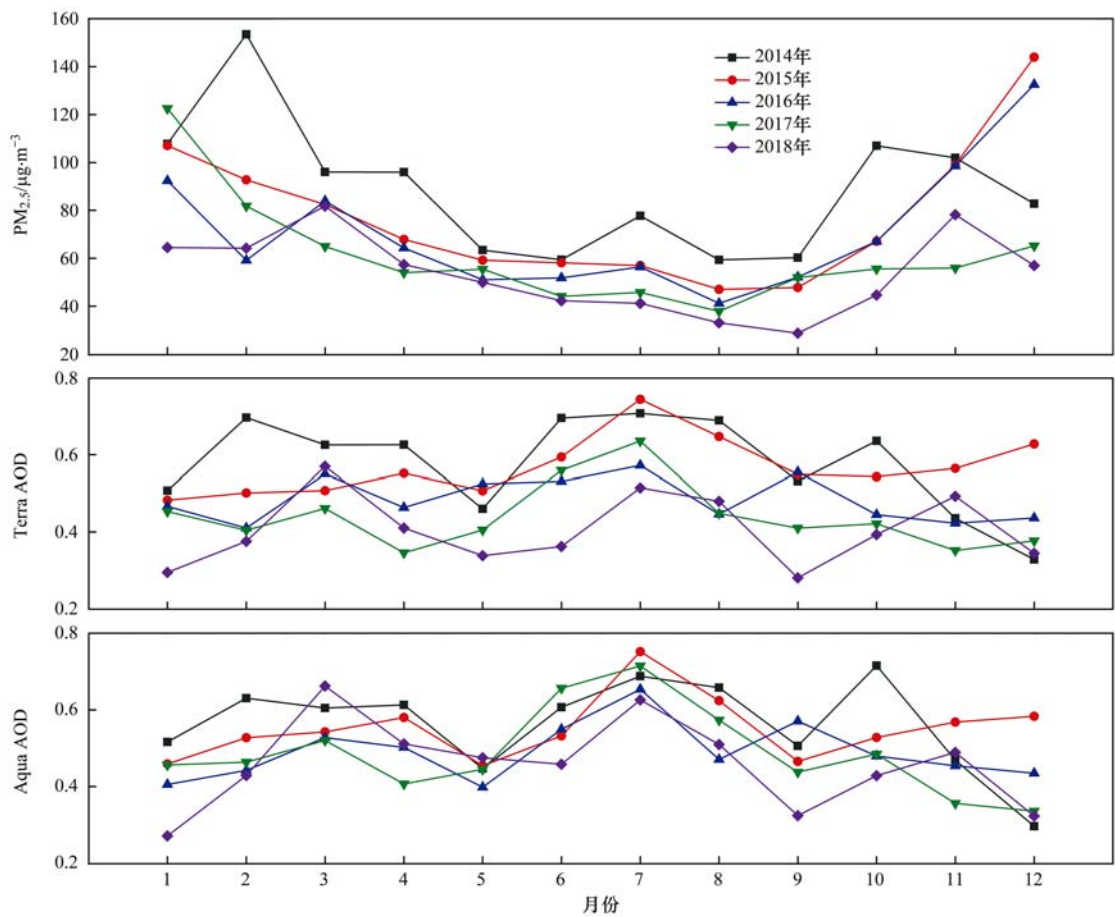


图3 $PM_{2.5}$ 质量浓度及 AOD 的月均变化

Fig. 3 Monthly average changes in $PM_{2.5}$ mass concentrations and AOD

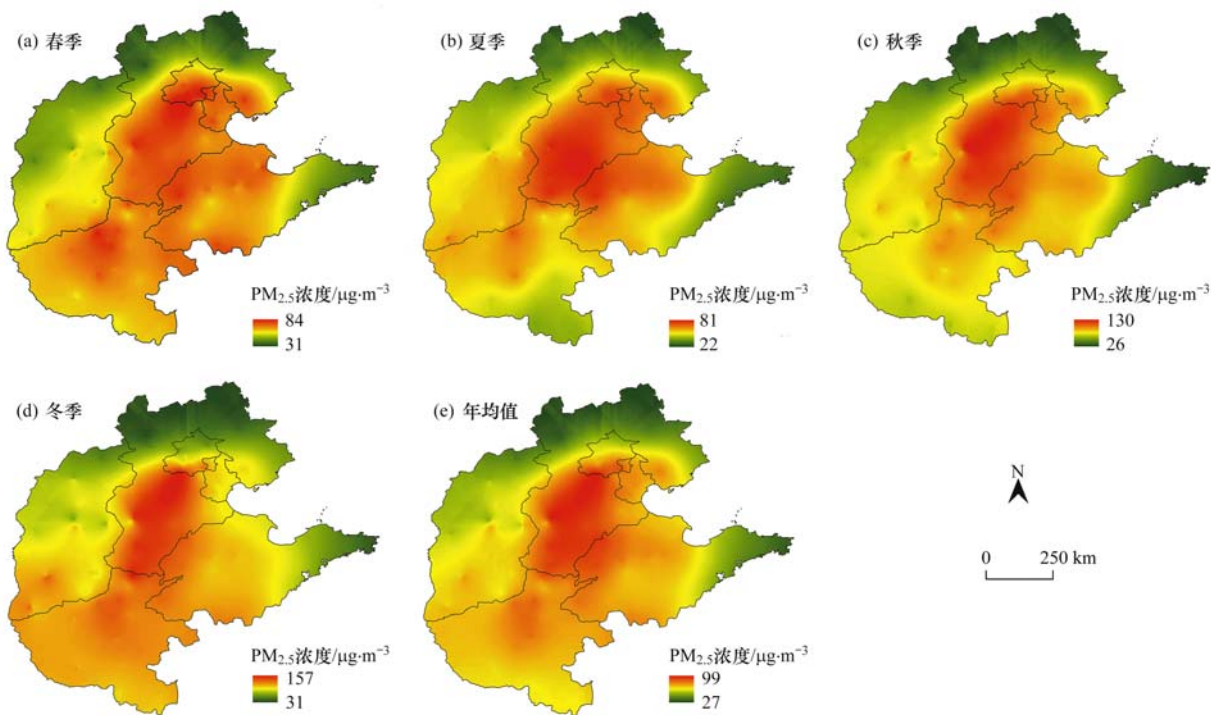


图4 $PM_{2.5}$ 季均浓度和年均浓度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of seasonal and annual average concentrations of $PM_{2.5}$

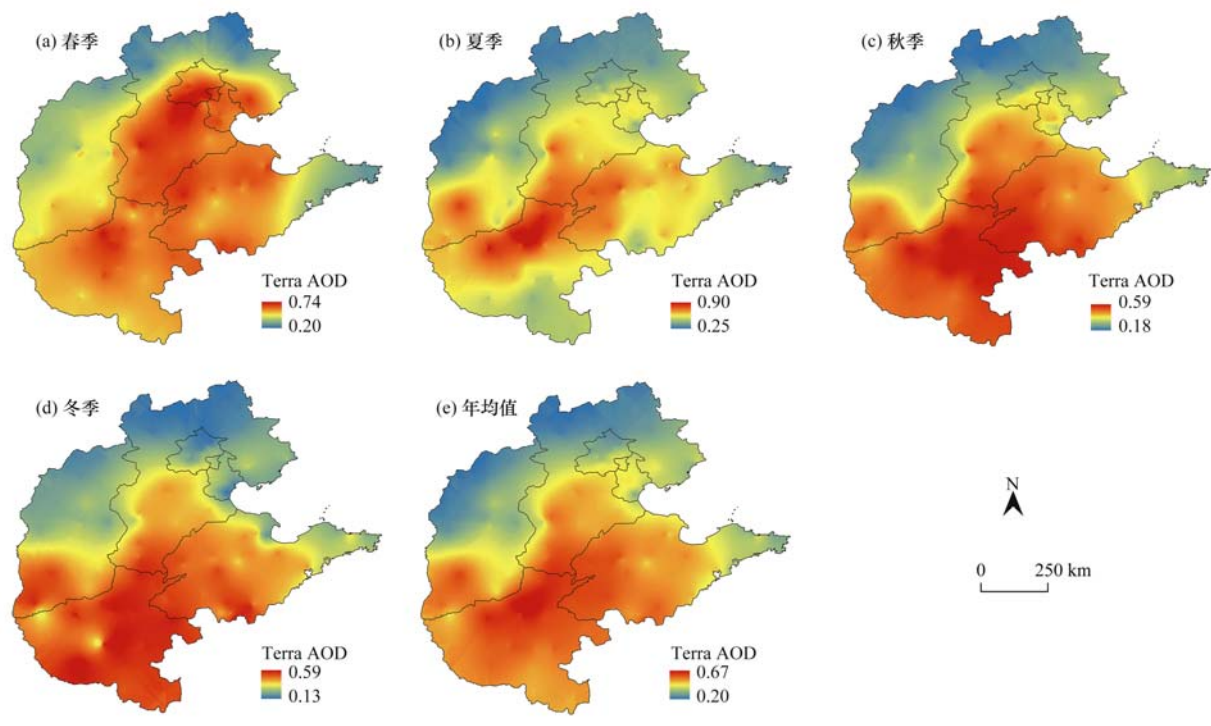


图5 Terra MAIAC AOD 季均值和年均值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of seasonal and annual average values of Terra MAIAC AOD

高值区主要位于河北南部、山西南部、山东西部以及河南北部,低值区主要位于山西北部、河北北部,AOD 值介于 0.20~0.69.河北南部、山西南部和山东西部四季 AOD 值均较高,河南北部地区春夏季 AOD 值较高,秋冬季河南整个地区 AOD 值均较高;河北北部和山西北部四季 AOD 值均较低,河南南部

夏季 AOD 值较低,北京、天津和山东东北部地区冬季 AOD 值均较低.

2.3 MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 直接相关

为了研究不同季节 MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 的相关性,本研究对相关数据按照春、夏、秋和冬这 4 个季节进行了统计分析.图 7 为 2014~2018 年京津冀

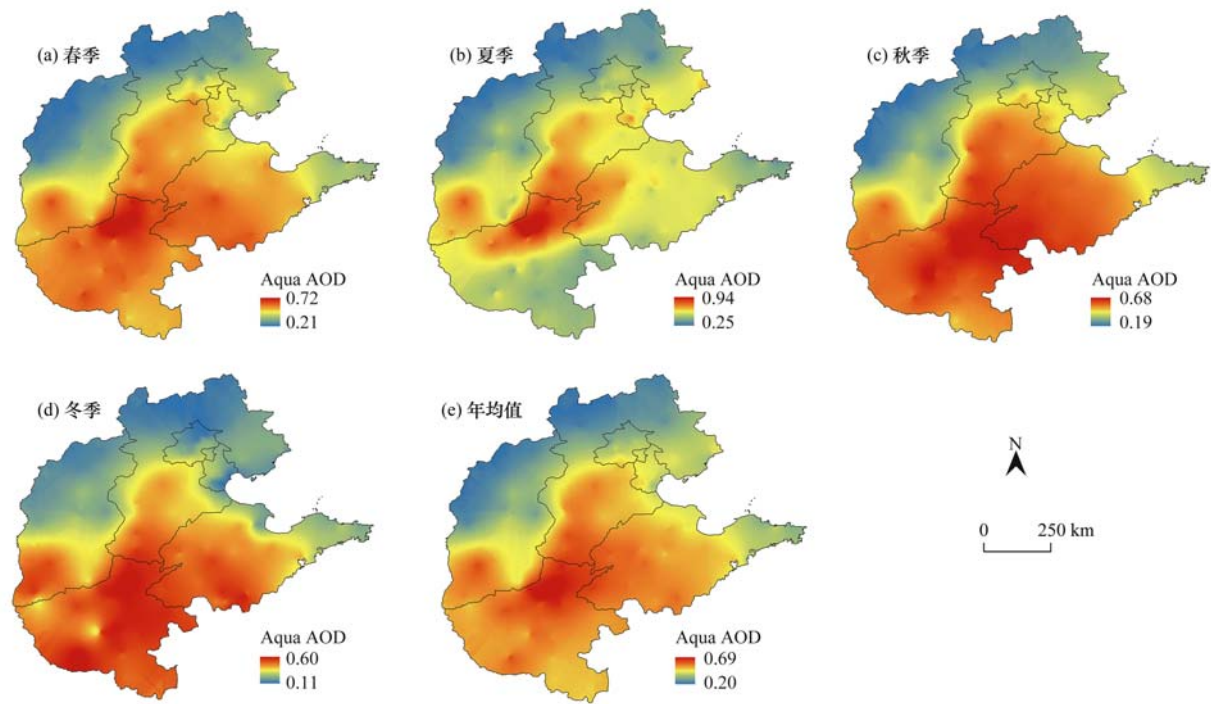


图6 Aqua MAIAC AOD 季均值和年均值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of seasonal and annual average values of Aqua MAIAC AOD

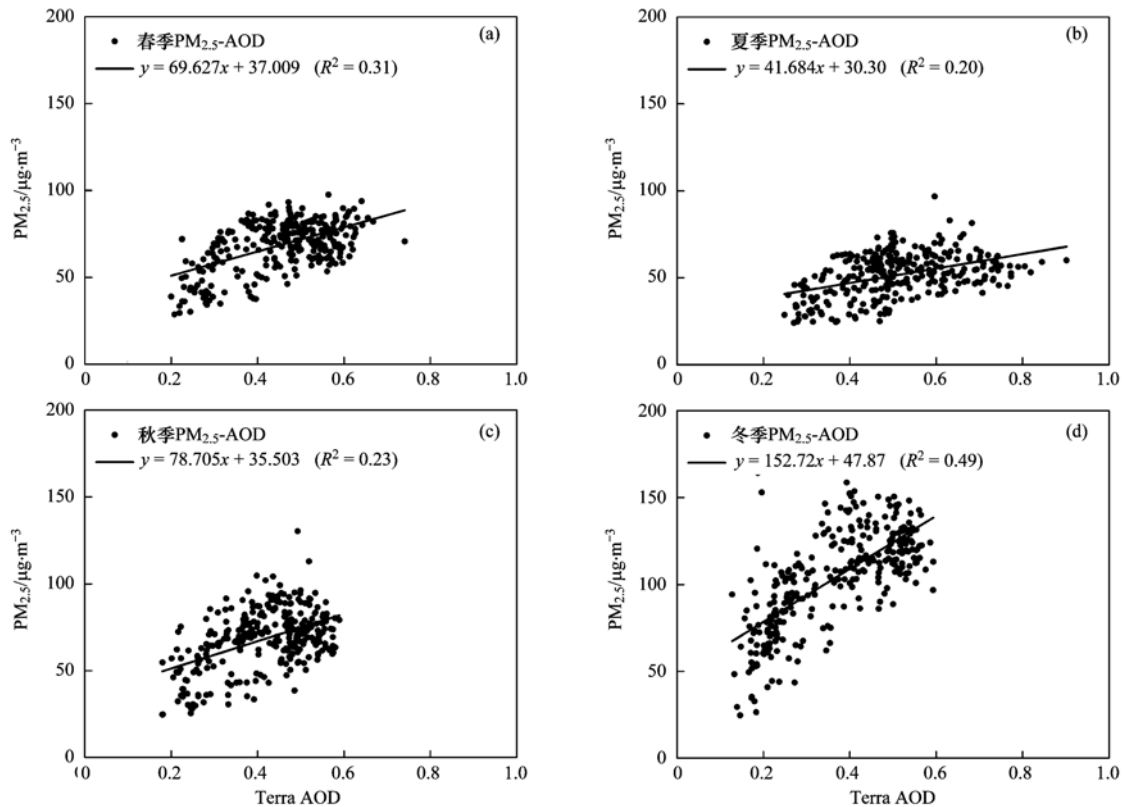


图7 2014~2018年不同季节 Terra MAIAC AOD与PM_{2.5}日均值的相关性

Fig. 7 Correlation between Terra MAIAC AOD and daily average PM_{2.5} in different seasons from 2014 to 2018

及周边地区不同季节 Terra MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 日均浓度的相关性,从中可以看出,不同季节 Terra AOD 与 PM_{2.5} 相关性差异显著, R 变化范围为 0.45~0.70,表明由 AOD 估算近地面 PM_{2.5} 质量浓度具有一定的可行性. Terra AOD 与 PM_{2.5} 浓度春夏秋冬四季的相关系数分别为 0.56、0.45、0.48 和 0.70,相关性表现为春冬季良好,夏秋季相对较差. AOD 与地面 PM_{2.5} 的相关关系受边界层高度、湿度、气溶胶粒径谱、消光系数垂直廓线、云量等因素的影响较大^[41],这些因素在不同季节、不同地域之间的差异,是导致 AOD 与 PM_{2.5} 的四季相关系数差异较大的原因.

图8为2014~2018年京津冀及周边地区不同季节 Aqua MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 日均值的相关性,从中可以看出,不同季节 Aqua AOD 与 PM_{2.5} 相关性差异显著, R 变化范围为 0.41~0.77, Aqua 卫星获取的 AOD 相较于 Terra 与 PM_{2.5} 浓度具有更高的相关性,其 AOD 与 PM_{2.5} 浓度春夏秋冬四季的相关系数分别为 0.57、0.41、0.44 和 0.77,相关性同样表现为春冬季良好,夏秋季较差,表明不同卫星 (Terra/Aqua) AOD 数值与 PM_{2.5} 浓度相关关系变化趋势基本一致. 同时发现秋冬季节 Terra 和 Aqua AOD 与 PM_{2.5} 浓度线性回归方程的斜率相比其他季节差异较大,这可能是研究区域秋冬季节细模态气

溶胶浓度的增加以及气象条件变化产生的结果.

2.4 垂直-湿度订正 MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 相关性

2.4.1 垂直订正

AOD 表征大气消光系数在垂直方向上的积分,而 PM_{2.5} 质量浓度是由地面监测站测得. 为了研究 AOD 与 PM_{2.5} 的相关性需要对卫星 AOD 进行垂直订正,将其转化为近地面气溶胶消光系数^[42]. 研究表明, BLH 可以作为气溶胶标高对 AOD 进行垂直订正,其订正方程为^[43]:

$$R_{\text{AOD}} = \text{AOD} / \text{BLH} \quad (1)$$

式中, R_{AOD} 为近地面气溶胶消光系数; AOD 表示 MODIS MAIAC 的气溶胶光学厚度产品数据; BLH 表示气象参数边界层高度.

从图9可知,垂直订正后的 Terra MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 的相关性有显著提升, R 变化范围为 0.52~0.73, AOD 与 PM_{2.5} 四季相关系数分别为 0.65、0.52、0.53 和 0.73,春季提升效果最为明显,这也证实了 AOD 与 PM_{2.5} 的相关性受 BLH 的影响.

从图10可知,垂直订正后的 Aqua MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 的相关性同样有显著提升, R 变化范围为 0.45~0.79, AOD 与 PM_{2.5} 四季相关系数分别为 0.62、0.45、0.48 和 0.79,春季提升效果较为明显.

2.4.2 湿度订正

由于地面常规站点测定颗粒物浓度过程中需要

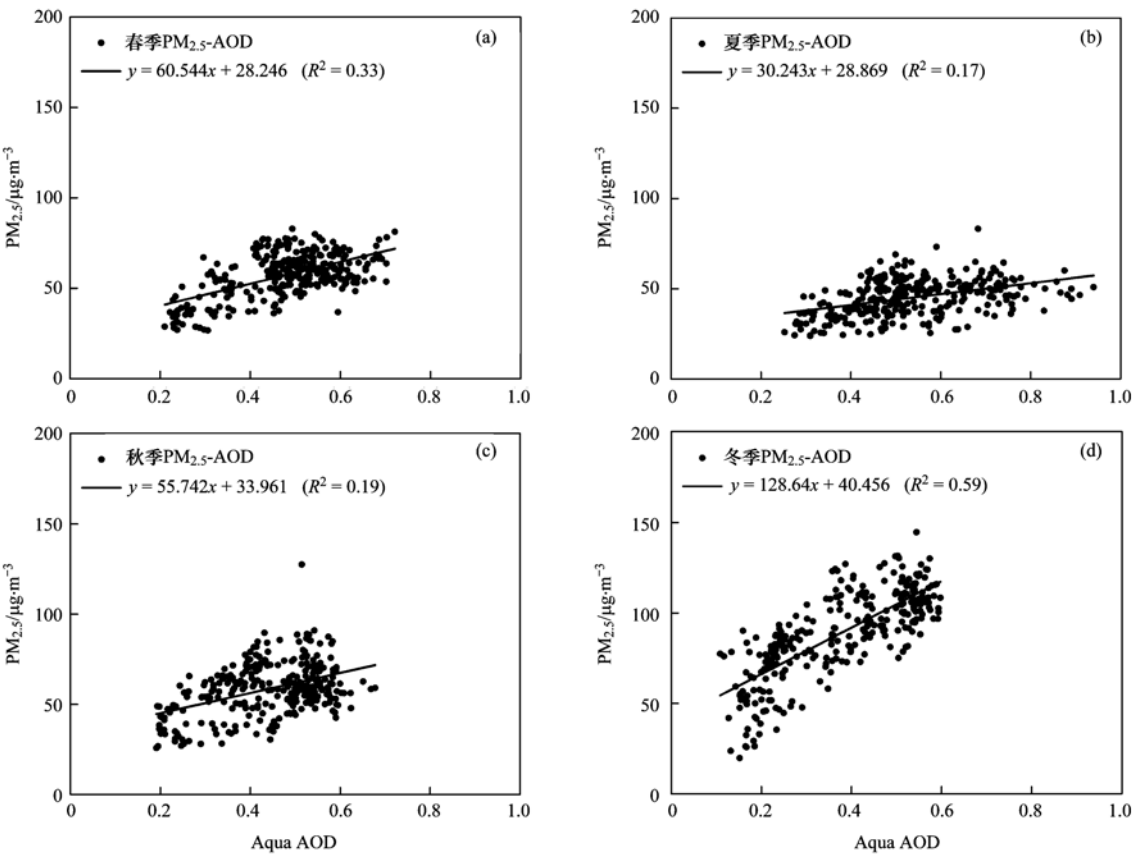


图 8 2014~2018 年不同季节 Aqua MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 日均值的相关性
Fig. 8 Correlation between Aqua MAIAC AOD and daily average PM_{2.5} in different seasons from 2014 to 2018

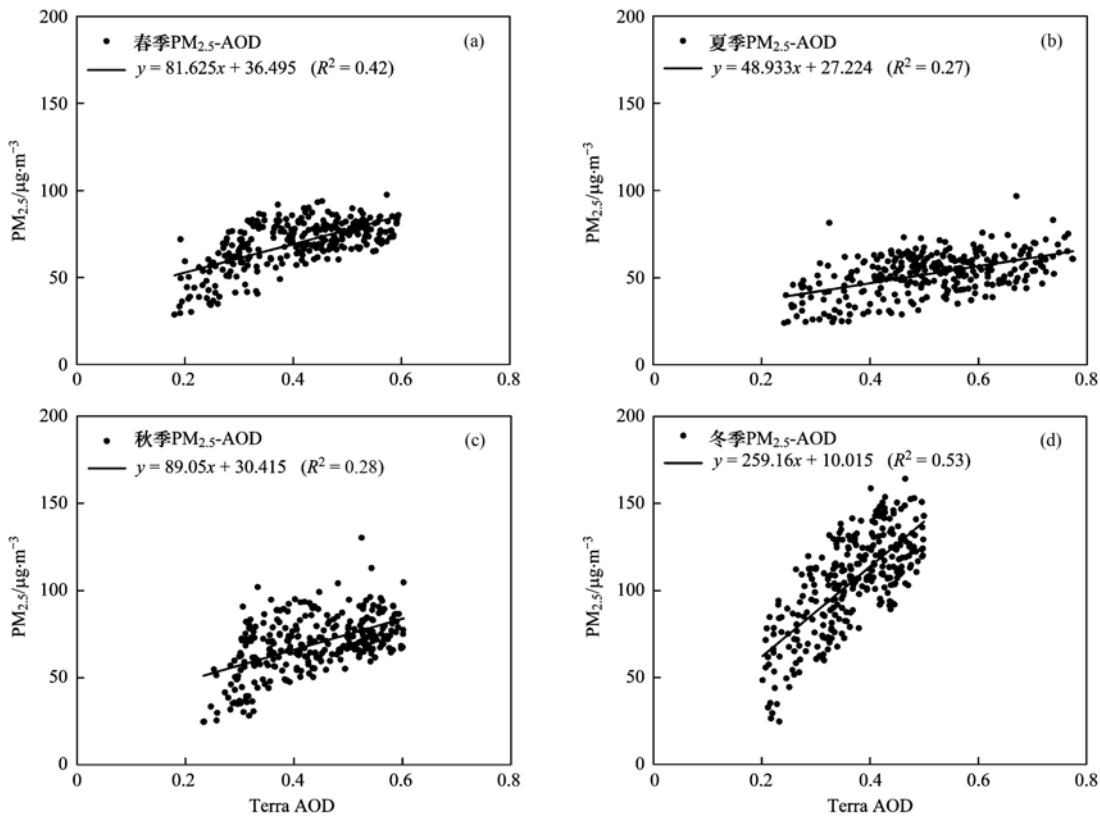


图 9 垂直订正后不同季节 Terra MAIAC AOD 与 PM_{2.5} 日均值的相关性
Fig. 9 Correlation between Terra MAIAC AOD and daily average PM_{2.5} in different seasons after vertical correction

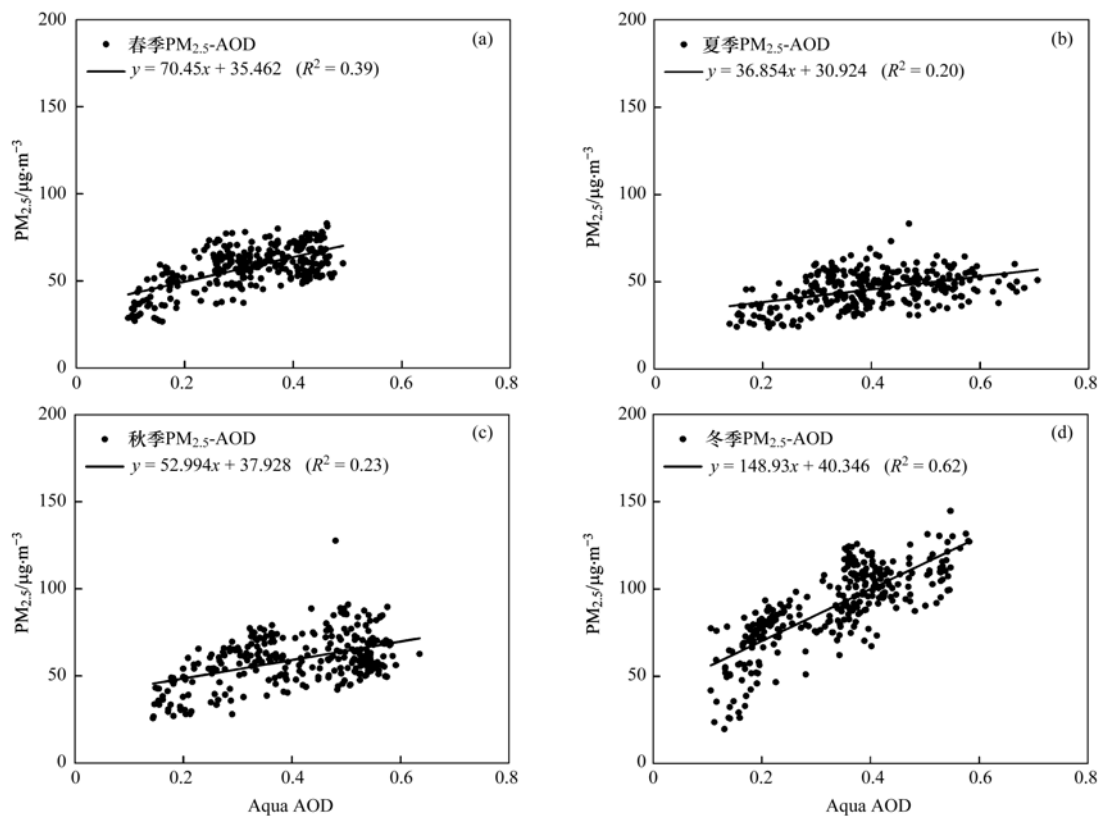


图 10 垂直订正后不同季节 Aqua MAIAC AOD 与 $PM_{2.5}$ 日均值的相关性

Fig. 10 Correlation between Aqua MAIAC AOD and daily average $PM_{2.5}$ in different seasons after vertical correction

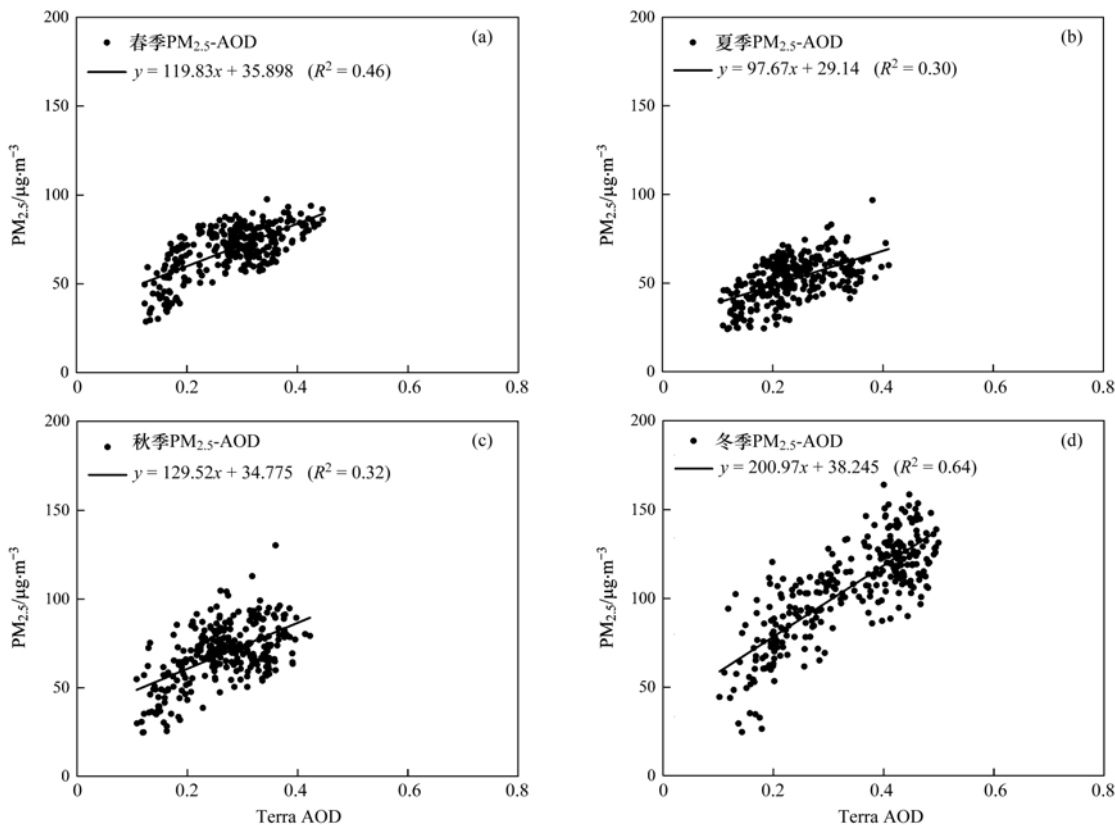


图 11 垂直-湿度订正后不同季节 Terra MAIAC AOD 与 $PM_{2.5}$ 日均值的相关性

Fig. 11 Correlation between Terra MAIAC AOD and daily average $PM_{2.5}$ in different seasons after vertical-humidity correction

50℃烘干后测定,而卫星遥感的 AOD 数据是在大气 环境下获取的.在相对湿度较高的情况下,粒子的吸

湿性对粒子的复折射指数、形态等都有较大影响, AOD 随湿度变化幅度较大^[44]. 因此, 需要对气溶胶的消光系数 AOD 订正为 AOD_{dry} , 设定湿度影响因子为 $f(\text{RH})$, 则订正公式为^[45]:

$$\begin{aligned}\text{AOD}_{\text{dry}} &= \text{AOD}/f(\text{RH}) \\ f(\text{RH}) &= 1/[1 - (\text{RH}/100)]\end{aligned}\quad (2)$$

从图 11 可知, 当引入 RH 对 AOD 进行垂直-湿度订正时, Terra MAIAC AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性有进一步提升, R 变化范围为 0.55 ~ 0.80, AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 四季相关系数分别为 0.68、0.55、0.57 和 0.80, 冬季提升效果最为明显, 这也证实了 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的

相关性同样受 RH 的影响.

从图 12 可知, 经过垂直-湿度订正后, Aqua MAIAC AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性也有进一步提升, R 变化范围为 0.49 ~ 0.81, AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 四季相关系数分别为 0.65、0.49、0.53 和 0.81, 秋季提升效果最为明显. 通过以上订正说明气溶胶的垂直分布和相对湿度对 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关系有着重要影响, MODIS MAIAC AOD 数据经过有效地垂直订正及湿度订正后可用于获取区域尺度上 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化, 可以作为地面空气质量监测的有效补充.

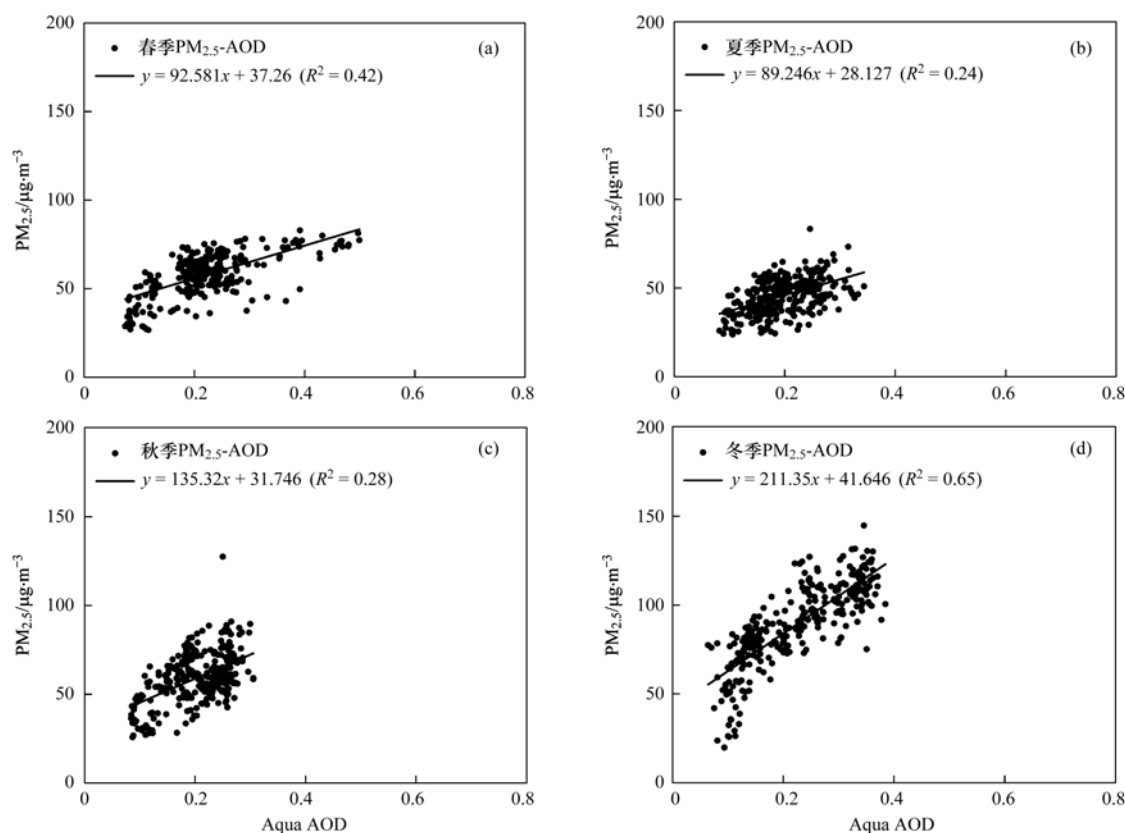


图 12 垂直-湿度订正后不同季节 Aqua MAIAC AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值的相关性

Fig. 12 Correlation between Aqua MAIAC AOD and daily average $\text{PM}_{2.5}$ in different seasons after vertical-humidity correction

3 结论

(1) 京津冀及周边地区 Terra 和 Aqua MAIAC AOD 值及 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均呈现较高水平, 空气污染严重. Terra 和 Aqua MAIAC AOD 年均值及 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度整体均呈下降趋势, 具有明显的季节性变化特征, $\text{PM}_{2.5}$ 表现出春冬季高、夏秋季低的特点, 沙尘天气和燃烧排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增高贡献明显; 而卫星 AOD 值则表现为春夏季高、秋冬季低, 主要是由于大气细粒子吸湿增长, 二次气溶胶生成量较多.

(2) AOD 和 $\text{PM}_{2.5}$ 季均和年均质量浓度空间变化特征一致, 整体呈现“北低南高”的区域分布特

征. 高值区主要位于河北南部、山西南部、山东西部以及河南北部, 低值区主要位于山西北部、河北北部以及山东东部. $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度介于 27 ~ 99 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, AOD 年均值介于 0.20 ~ 0.69. 局地排放源和地形对 AOD 和 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布具有重要影响.

(3) 对 AOD 和 $\text{PM}_{2.5}$ 进行相关性分析, 发现春冬季二者相关性高于夏秋季, 且 Aqua 卫星获取的 AOD 相较于 Terra 与 $\text{PM}_{2.5}$ 具有更高的相关性. 此外, 通过边界层高度和湿度订正可有效提高 $\text{PM}_{2.5}$ 与 AOD 之间的相关性. 此结论可为全面评估 MODIS MAIAC AOD 产品在京津冀及周边地区反演 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度的效果提供参考.

参考文献:

- [1] Shao P, Xin J Y, An J L, *et al.* The empirical relationship between $PM_{2.5}$ and AOD in Nanjing of the Yangtze River Delta [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, **8**(2): 233-243.
- [2] Xin J Y, Zhang Q, Wang L L, *et al.* The empirical relationship between the $PM_{2.5}$ concentration and aerosol optical depth over the background of North China from 2009 to 2011 [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **138**: 179-188.
- [3] Li S X, Chen L L, Huang G, *et al.* Retrieval of surface $PM_{2.5}$ mass concentrations over North China using visibility measurements and GEOS-Chem simulations [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117121.
- [4] Yang Q Q, Yuan Q Q, Yue L W, *et al.* The relationships between $PM_{2.5}$ and aerosol optical depth (AOD) in mainland China: About and behind the spatio-temporal variations [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **248**: 526-535.
- [5] Wang C, Liu Q M, Ying N, *et al.* Air quality evaluation on an urban scale based on MODIS satellite images [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **132-133**: 22-34.
- [6] 王静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的特征及其相关性 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, **27**(1): 10-16.
Wang J, Yang F M, Wang D Y, *et al.* Characteristics and relationship of aerosol optical thickness and $PM_{2.5}$ concentration over Beijing [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, **27**(1): 10-16.
- [7] Wang Z F, Chen L F, Tao J H, *et al.* Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(1): 50-63.
- [8] 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM_{10} 监测方面的应用研究 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, **46**(2): 178-184.
- [9] Segura S, Estellés V, Utrillas M P, *et al.* Long term analysis of the columnar and surface aerosol relationship at an urban European coastal site [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **167**: 309-322.
- [10] Li J, Carlson B E, Lacis A A. How well do satellite AOD observations represent the spatial and temporal variability of $PM_{2.5}$ concentration for the United States? [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **102**: 260-273.
- [11] Cao X J, Liang J N, Tian P F, *et al.* The mass concentration and optical properties of black carbon aerosols over a semi-arid region in the Northwest of China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, **5**(4): 601-609.
- [12] 赵笑然, 石汉青, 杨平吕, 等. NPP 卫星 VIIRS 微光资料反演夜间 $PM_{2.5}$ 质量浓度 [J]. *遥感学报*, 2017, **21**(2): 291-299.
- [13] 陈辉, 厉青, 王中挺, 等. MERSI 和 MODIS 卫星监测京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度 [J]. *遥感学报*, 2018, **22**(5): 822-832.
- [14] 李倩, 李成才, 王烨芳, 等. 利用激光雷达和卫星遥感获得城市地面大气悬浮颗粒物浓度分布 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2013, **49**(4): 673-682.
- [15] Kong L B, Xin J Y, Zhang W Y, *et al.* The empirical correlations between $PM_{2.5}$, PM_{10} and AOD in the Beijing metropolitan region and the $PM_{2.5}$, PM_{10} distributions retrieved by MODIS [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 350-360.
- [16] Tiwari S, Hopke P K, Pipal A S, *et al.* Intra-urban variability of particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}) and its relationship with optical properties of aerosols over Delhi, India [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **166**: 223-232.
- [17] Chen J S, Xin J Y, An J L, *et al.* Observation of aerosol optical properties and particulate pollution at background station in the Pearl River Delta region [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **143**: 216-227.
- [18] Lee L A, Carslaw K S, Pringle K J, *et al.* Emulation of a complex global aerosol model to quantify sensitivity to uncertain parameters [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(253): 12253-12273.
- [19] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. $PM_{2.5}$ in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. *Particulate*, 2014, **13**: 1-26.
- [20] Ma X Y, Wang J Y, Yu F Q, *et al.* Can MODIS AOD be employed to derive $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei over China? [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **181**: 250-256.
- [21] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, **118**(6): 847-855.
- [22] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollutants during a severe smog event [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [23] Zhang J K, Sun Y, Liu Z R, *et al.* Characterization of submicron aerosols during a month of serious pollution in Beijing, 2013 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 2887-2903.
- [24] Wang L T, Wei Z, Yang J, *et al.* The 2013 severe haze over southern Hebei, China: model evaluation, source apportionment, and policy implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3151-3173.
- [25] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al.* A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(1): 481-501.
- [26] Itahashi S, Uno I, Yumimoto K, *et al.* Up/Down trend in the MODIS aerosol optical depth and its relationship to the sulfur dioxide emission changes in China during 2000 and 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2011, **11**(8): 21971-21993.
- [27] Xin J Y, Wang L L, Wang Y S, *et al.* Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in Northeast China from 2004 to 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(35): 6317-6325.
- [28] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 711-718.
- [29] 刘兆东, 王宏, 沈新勇, 等. 京津冀及周边地区冬季能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度和环境湿度的多元回归分析 [J]. *气象学报*, 2020, **78**(4): 679-690.
- [30] Li R, Gong J H, Chen L F, *et al.* Estimating ground-level $PM_{2.5}$ using fine-resolution satellite data in the megacity of Beijing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(4): 1347-1356.
- [31] Chudnovsky A, Lyapustin A, Wang Y, *et al.* High resolution aerosol data from MODIS satellite for urban air quality studies [J]. *Central European Journal of Geosciences*, 2014, **6**(1): 17-26.
- [32] Chudnovsky A, Tang C, Lyapustin A, *et al.* A critical assessment of high-resolution aerosol optical depth retrievals for

- fine particulate matter predictions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(21): 10907-10917.
- [33] Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S, *et al.* MODIS collection 6 MAIAC algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(10): 5741-5765.
- [34] Lyapustin A, Wang Y, Laszlo I, *et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D3), doi: 10.1029/2010JD014986.
- [35] Goldberg D L, Gupta P, Wang K, *et al.* Using gap-filled MAIAC AOD and WRF-Chem to estimate daily $\text{PM}_{2.5}$ concentrations at 1 km resolution in the Eastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **199**: 443-452.
- [36] Liang F C, Xiao Q Y, Wang Y J, *et al.* MAIAC-based long-term spatiotemporal trends of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1589-1598.
- [37] Han X F, Cui X H, Ding L, *et al.* Establishment of $\text{PM}_{2.5}$ prediction model based on MAIAC AOD data of high resolution remote sensing images [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019, **33**(3), doi: 10.1142/S0218001419540090.
- [38] 梁延飞, 臧增亮, 尤伟, 等. 中国区域 MODIS AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度的相关性分析 [J]. *中国粉体技术*, 2018, **24**(3): 63-68, 75.
- [39] Hu X F, Waller L A, Lyapustin A, *et al.* Estimating ground-level $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in the Southeastern United States using MAIAC AOD retrievals and a two-stage model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 220-232.
- [40] You W, Zang Z L, Zhang L F, *et al.* National-scale estimates of ground-level $\text{PM}_{2.5}$ concentration in China using geographically weighted regression based on 3 km resolution MODIS AOD [J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(3), doi: 10.3390/rs8030184.
- [41] Zang Z L, Wang W Q, Cheng X H, *et al.* Effects of boundary layer height on the model of ground-level $\text{PM}_{2.5}$ concentrations from AOD: comparison of stable and convective boundary layer heights from different methods [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(6), doi: 10.3390/atmos8060104.
- [42] 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.
- [43] Song W Z, Jia H F, Huang J F, *et al.* A satellite-based geographically weighted regression model for regional $\text{PM}_{2.5}$ estimation over the Pearl River Delta region in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **154**: 1-7.
- [44] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(5): 831-844.
- [45] 高宇潇, 刘志辉, 王敬哲. 乌鲁木齐市 $\text{PM}_{2.5}$ 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.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)