

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ₃ 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区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 ²⁺ 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 ₄ 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¹, 殷振平², 郑祚芳¹, 李炬¹, 李青春¹, 孟春雷¹, 李威³

(1. 北京城市气象研究院, 北京 100089; 2. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079; 3. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 为了促进区域社会经济与生态环境协调发展, 构建美好人居环境, 精准防污治污, 对大气污染有准确充分了解, 开展对京津冀大气污染状况深度摸排和普查。基于 2014 ~ 2019 年 6 a 地面环境观测数据和 2000 ~ 2019 年卫星数据, 分析大气污染在不同尺度时间和空间上的分布特征和演变态势。结果表明: ① 站点 $PM_{2.5}$ 日均值浓度显示, 京津冀污染呈现天数多、等级重和总体向好的特征。污染主要发生在 10 月到次年 4 月, 占近半年时间。张家口 $PM_{2.5}$ 表现最优, 其次秦皇岛; ② 卫星近 20 年 $PM_{2.5}$ 年平均浓度呈现出平原大于山区, 城市大于郊区的空间分布特征。时间上呈现出四阶段双峰结构的“M”型演变特征, 从 2000 年开始逐渐增加, 2006 年出现第一峰, 2007 年开始逐渐降低, 直到 2012 年。2013 年骤升为第二高峰, 之后逐年降低, 到 2017 年; ③ 基于卫星每 10 a 的月平均 AOT 数据看月度变化特征, 总体上, 第一时间段(2000 ~ 2009 年)的 AOT 月均值大于第二时间段(2010 ~ 2019 年)同月, 最大值在 7 月, 最小值在 12 月。张家口和承德近 20 年月平均 AOT 变化微弱, 平原地区季节差异和空间差异显著; ④ 站点观测的 O_3 -8h 日均值表明, 京津冀 O_3 -8h 浓度良好等级频发, 出现时间广, 3 ~ 10 月。轻度污染等级至少出现 7 次, 未出现中度及以上污染等级; ⑤ 地面观测 SO_2 日均值表明, 未出现轻度及以上等级污染, 良好等级污染出现在冬季, 且多以连续几日污染形式出现; ⑥ 对 AQI 数据分析发现, 2015 ~ 2019 年, 北京 AQI 优级占比从 27% 依次增加到 38%, 天津 AQI 良好等级占比依次从 44% 增加到 64%。邯郸 AQI 优级占比最高出现在 2016 年, 仅占 9%; ⑦ 基于卫星近 20 年的月平均 SO_2 数据表明, 高值区出现在邯郸、邢台和石家庄, 低值区在张家口和承德。20 a 平均 NO_2 数据表明高值中心在北京、天津、唐山、邯郸、邢台和石家庄。

关键词: 京津冀; 大气污染; 时空特征; 演变态势; 环境调查; 气溶胶光学厚度(AOD)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3508-15 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109240

Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term “Ground-Satellite” Data

WANG Yao-ting¹, YIN Zhen-ping², ZHENG Zuo-fang¹, LI Ju¹, LI Qing-chun¹, MENG Chun-lei¹, LI Wei³

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: This study aimed to promote the coordinated development of regional social economy and ecological environment, build a better living environment, accurately prevent and control pollution, and carry out in-depth surveys and general surveys of air pollution in Beijing, Tianjin, and Hebei. Based on 6 years (June 2014 to December 2019) of ground environmental observation data and satellite data from 2000 to 2019, the distribution characteristics and evolution trend of air pollution in different time and spatial scales were analyzed. The results showed that: ① according to the daily average concentration of $PM_{2.5}$ at the sites, the pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region showed the characteristics of more days, heavy levels, and overall improvement. Pollution mainly occurred from October to April of the following year, accounting for nearly half a year. The pollution level of $PM_{2.5}$ was the best at Zhangjiakou, followed by Qinhuangdao. ② Based on the 20-year average $PM_{2.5}$ annual average concentration data retrieved from satellites, the $PM_{2.5}$ concentration presented a spatial distribution characteristic in which that in the plains was higher than that in mountain area, and $PM_{2.5}$ concentration in the city was higher than that in the suburbs. $PM_{2.5}$ concentration changed with time, showing a four-stage bimodal structure of “M”-type evolution characteristics, which gradually increased starting in 2000; the first peak appeared in 2006 and gradually decreased from 2007 to 2012. It rose sharply to the second peak in 2013 and then decreased yearly until 2017. ③ The monthly average AOT data based on satellites every 10 years indicated that the value of AOT in the first time period (2000-2009) was larger than that in the same month of the second time period (2010-2019). The maximum value was in July, and the minimum value was in December. The monthly average AOT in Zhangjiakou and Chengde changed slightly over the past 20 years, and the seasonal and spatial differences were significant in the plain area. ④ Judging from the daily average value of O_3 -8h observed at the stations, good levels of O_3 -8h concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei area occurred frequently and widely from March to October. There were at least seven instances of light pollution levels, and the moderate pollution levels and above were not observed. ⑤ The daily average value of SO_2 observed on the ground showed that there was no light pollution or above; the good pollution level occurred in winter, and most appeared in the form of pollution for several consecutive days. ⑥ The analysis of AQI data revealed that from 2015 to 2019, the proportion of AQI excellent grades in Beijing increased from 27% to 38%, and the proportion of Tianjin AQI good grades increased from 44% to 64%. The highest proportion of Handan AQI superior grades appeared in 2016, accounting for only 9%. ⑦ The 20-year monthly average concentration of SO_2 data based on satellites showed that high-value areas were in Handan, Xingtai, and Shijiazhuang, and low-value areas were in Zhangjiakou and Chengde. The 20-year average NO_2 data showed that the high-value centers were in Beijing, Tianjin, Tangshan, Handan, Xingtai, and Shijiazhuang.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei; air pollution; spatio-temporal characteristics; evolution; environmental investigation; aerosol optical depth(AOD)

收稿日期: 2021-09-27; 修订日期: 2021-12-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2102901); 北京市自然科学基金项目(8202022); 上甸子大气本地站开放基金项目(SDZ2020619)

作者简介: 王耀庭(1976 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为人居环境和大气遥感, E-mail: ytwang@ium.cn

京津冀地区因特殊的地理位置和气象条件, 突出的大气污染问题已经引起政府、公众和学术界的普遍关注^[1]. 污染物扩散及影响要素, 已成为环境科学和可持续发展研究的重要部分^[2, 3]. 对大气环境乃至气候变化的研究, 学者们多从大气气溶胶入手. 它一方面通过吸收和散射太阳辐射而直接影响地气系统的辐射平衡, 即直接辐射气候效应; 另一方面, 它作为云的凝结核影响云的光学特性、云量及云的寿命, 产生间接效应. 但这种效应很复杂, 不仅与气溶胶的成分、光学属性和混合程度有关^[4, 5], 还与下垫面性质、云及气溶胶的垂直分布有关^[6]. 对气溶胶的观测, “地-星”各有优势, 地基观测精确, 常用来验证卫星遥感数据. 卫星遥感空间覆盖面广, 时续性好. 在气溶胶光学特性中, 大气气溶胶光学厚度(AOD 或 AOT)是研究气溶胶的基本光学参数, 卫星遥感凭借广泛空间覆盖率和多要素同步采集等优势可以提供长时间观测, 比如 MODIS 提供 2000 年以来的 AOT 观测数据, 已在环境等领域广泛应用. 在大气污染方面最广泛的应用是根据 AOD 估算近地面 $PM_{2.5}$ (空气动力学直径小于 $2.5\mu m$ 的细颗粒物)、 PM_{10} 浓度状况, 有研究表明二者之间的相关性达到 0.7 以上^[7]. 因此在相当程度上可以利用卫星反演的气溶胶粒子有效半径和 AOD 估算大气污染物(颗粒物等)的浓度分布及其输送^[8, 9]. Green 等^[10]的研究分析比较了美国地区 GOES 和 MODIS AOD 与地表 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度, 讨论了利用 GOES 和 MODIS 卫星 AOD 产品结合模式预报地表 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的潜力. 用卫星 AOD 产品估计地表 $PM_{2.5}$ 浓度时, 必须考虑气溶胶粒子尺度分布、大气相对湿度和边界层高度的季节及日变化^[11, 12].

$PM_{2.5}$ 是呼吸道、心脏病和肺部疾病的主要污染物质之一^[13]. $PM_{2.5}$ 污染在中国已经成为一个极端的环境和社会问题^[14], 引起了国内外学者的广泛关注^[15, 16], 主要集中在研究 $PM_{2.5}$ 的成分来源^[17~19]、时空分布特征^[20, 21]、污染特征^[22]、对健康^[23] 和对社会经济的影响^[24]. Zhou 等^[25]研究了 $PM_{2.5}$ 的时空演变规律和驱动因素, 也有从长时间序列上研究 $PM_{2.5}$ 的时空演变^[26~28]. 近年来, 学者们对京津冀地区大气污染的时空分布、来源、传输和气象条件的影响等方面进行了广泛研究^[29~32], 成果丰富. 传统的污染物地面监测多来自于环境保护部门的地面监测网. 我国于 2012 年才将 $PM_{2.5}$ 纳入监测指标体系, 2013 年, 在 74 个城市建立 $PM_{2.5}$ 的常规监测点, 站点数量有限且分布及其不均匀, 并且在不同年份具有不同的数量和测量频率范围, 对了解

$PM_{2.5}$ 在内的各类污染物的时空分布存在很大的局限性. 卫星遥感技术可以提供区域尺度乃至全球尺度上包含 AOD 在内的各种大气成分分布信息, 为认识不同时空尺度上的污染分布、来源以及区域间传输过程提供有效手段^[33].

除了 $PM_{2.5}$, 还有臭氧(O_3)、 NO_2 和 SO_2 等大气污染物. 近地层臭氧污染是当前国内大气复合污染的常见污染形式之一, 与 $PM_{2.5}$ 一起被认为是影响空气质量的最主要的两种大气污染物^[34]. 了解区域尺度上 O_3 浓度的时空聚集变化规律不仅有利于认知大气污染现状, 评估其对人体健康和生态环境的影响, 还可为开展针对性的 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制措施提供科学参考. 约 90% 的 O_3 存在于平流层, 仅有 10% 左右的 O_3 在对流层^[35]. 虽然只是 10%, 但是当 O_3 浓度增高, 则会对人体的健康造成危害, 且作为强氧化剂, 在对流层的许多化学过程中起重要作用, 是光化学烟雾的主要标志物. 城市中 O_3 的大部分是由 NO_x 、CO 和 VOCs 等前体物在合适的气象条件下反应生成的^[36]. Ding 等^[37]的研究基于探空数据, 对北京地区 1995~2005 年间对流层下部 O_3 浓度进行分析发现, 每年以 2% 的速率增加. Tang 等^[38]的研究发现 2001~2006 年间 $\varphi(NO_x)$ 以每年 $(3.9 \pm 0.5) \times 10^{-9}$ 的速率下降, 但是 $\varphi(O_3)$ 以每年 $(1.1 \pm 0.5) \times 10^{-9}$ 的速率上升. 贺克斌等^[39]的研究指出, 低空 O_3 已逐渐成为大气污染的核心物质之一, O_3 的含量对颗粒物的生消也有重要的作用. 主要来源于火山爆发和化石燃料燃烧产生的 SO_2 也是大气中重要的污染物之一^[40]; 高浓度的 SO_2 一方面污染环境, 通过气粒转化氧化形成硫酸盐气溶胶, 降低大气能见度, 通过其直接和间接辐射强迫作用影响全球和区域气候和环境变化^[41]; 另一方面 SO_2 会造成大面积酸雨, 降低农作物产量和破坏生态系统. Schichtel 等^[42]的研究分析了美国 1980~1995 年的霾变化趋势, 认为 SO_2 排放量的下降直接影响霾日数, 发现在这期间霾日下降 10%, 美国东部的 SO_2 也大约下降了 10%. 同时, 高浓度的 NO_2 对重污染的形成起到促进作用^[43].

上述研究成果对京津冀大气污染现状调查、深入认识大气污染特征及污染成因有重要参考意义, 但这些研究多是针对某一区域和/或短时间序列, 研究单元相对小或基于单个大气污染要素开展了长时间序列的分析. 难以准确揭示 $PM_{2.5}$ 在内的各种污染物的时空分布特征和演变态势. 目前通过“地-星”结合, 进行大区域、长时序和多要素综合开展污染背景普查的研究还不多见. 本文拟利用长时间序列

“地-星”观测数据,在较大空间区域上研究污染物在不同时间和空间上呈现的特征和演变态势,摸清污染物浓度水平、空间差异和变化趋势,以期为评估和改善我国京津冀地区空气质量提供数据支持和理论支撑,并了解京津冀地区大气污染物扩散及输送规律提供依据,也为对京津冀乃至全国范围内的相关领域研究以及污染防治提供科学合理的借鉴性依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀地处东经 $113^{\circ}27' \sim 119^{\circ}50'$,北纬 $36^{\circ}05' \sim 42^{\circ}40'$ 之间,属温带大陆性季风气候,四季分明.东临渤海、西为太行山山地,北为燕山山地,地势西北高、东南低,总面积 $21.54 \times 10^4 \text{ km}^2$,见图 1.

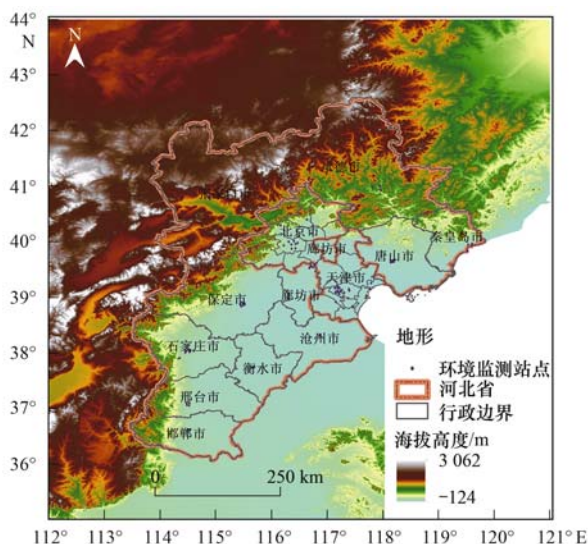


图 1 京津冀地区地形和大气环境监测站点分布示意

Fig. 1 Distribution of the terrain area and pollutant observation sites in Beijing-Tianjin-Hebei

1.2 数据来源

本研究采用的数据来自京津冀地区空气监控网络和互联网上面向社会分发的卫星产品,鉴于这些数据在加工生产过程中已经过各种预处理和质控,在本研究中仅做缺测值等这种简单的数据修订.由于研究区域广、数据量大并受篇幅所限,根据区域特点,选择 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 -8h 和 SO_2 为地面大气污染监测要素.在城市代表性方面,选择北京、天津、石家庄,东部近海唐山、秦皇岛,东部平原沧州,南部邯郸,西部保定,北部山区张家口,共 9 个城市为代表展开分析.

1.2.1 地面观测数据

本研究采用来自中华人民共和国生态环境部 (<http://www.mee.gov.cn/>) 提供的京津冀 90 个观

测站点在 2014 ~ 2019 年的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 O_3 -8h 逐时环境监测数据.

1.2.2 气溶胶光学厚度和年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据

AOD 数据来自 NASA 兰利 (Langley) 研究中心基于 MISR 卫星平台得到的产品.该产品同化了多种气象观测要素和卫星数据,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$.产品经过严格验证,供全球免费使用.提取出京津冀 2000 年 3 月至 2019 年 12 月的月平均 AOD 数据. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来自于 NASA 和哥伦比亚大学联合反演的全球逐年 $\text{PM}_{2.5}$ 格网产品 (<http://earthdata.nasa.gov>).根据地面 $\text{PM}_{2.5}$ 观测数据和同期的 MODIS、SeaWiFS 和 MISR 这 3 个卫星平台的 AOD 产品,利用戈达德地球观测系统化学传输模型 GEOS-Chem 得到该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合估算值,最后使用地理加权回归模型 (GWR),将格点上的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度外推到 2000 年^[44].从而得到 2000 ~ 2017 年长时序 $\text{PM}_{2.5}$ 格点数据,空间分辨率为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$.文献[45]对该数据集质量进行评测,表明该数据集有较高的精度,加上 GWR 后,各统计指标精度明显上升.已有学者应用该数据进行广泛研究^[46~49],说明该遥感数据能客观呈现中国地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布^[50].

1.2.3 SO_2 和 NO_2 数据

SO_2 数据来自 OMI 卫星产品 (<http://projects.knmi.nl/omi/research/product/>),时间从 2004 年 10 月至 2019 年 5 月,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. NO_2 数据是基于 GOME (global ozone monitoring experiment)、SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography) 和 GOME-2 卫星得到.利用 GEOS-Chem 数值模式生成空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的栅格数据.

1.3 研究方法

本研究采用常规数理统计方法和地理学及生态学中常用的时空格局分析法.各种卫星数据的处理及可视化均采用 MeteorInfo 软件^[51].

2 结果与分析

2.1 地基实测污染物年际变化特征

2.1.1 基于地面实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间空间分布特征

图 2 为基于地面环境监测数据绘制的京津冀 2014 ~ 2019 年 9 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值浓度和污染等级时序,等级划分依据参见文献[52].从中可知,6 年来 9 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值污染浓度及等级呈现出“多”、“重”、“同步”和“向好”的共性.污染天数“多”:每年有占据近半年的天数发生污染,中南部

地区污染天数尤其多. 污染等级重: 通常在中度及以上等级. 中度及以上等级污染日数超过 100 d 的有保定(2015 年, 128 d)和石家庄(2016 年, 108 d), 具体数据见图 3. 污染呈现出较好的“同步性”: 京津冀 $\text{PM}_{2.5}$ 污染各个季节均有发生, 但主要在 10 月至

次年 4 月. 比如 2017 年第一季度, 全区域都有重度及以上等级污染情形出现. 5~9 月, $\text{PM}_{2.5}$ 污染等级为优级的天数最多. 从 2014~2019 年, 每年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染存在差异, 但总体趋势是“向好”发展, 2019 年每个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 优级天数明显多于其余年.



图 2 9 个城市 2014~2019 年地面观测 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度年际变化特征

Fig. 2 Interannual variation in $\text{PM}_{2.5}$ daily average concentration based on observation in nine cities from 2014 to 2019

$\text{PM}_{2.5}$ 污染呈现出随地区有明显的区域差异. 位于区域北部的张家口地区, 2014 年不仅污染频次很高, 而且污染等级中度、重度和严重程度等级均有出现. 之后每年 $\text{PM}_{2.5}$ 虽有污染情形出现, 甚至还出现严重及以上污染等级, 如 2015 年 12 月、2016 年的 3 月和 11 月, 2017 年的 2 月和 5 月以及 2018 年 4 月, 但是每年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度以优级占绝大多数. 秦皇岛 2016 年出现多次良好等级污染, 2017 年出现严重等级污染.

北京 2014~2016 年污染逐渐加重, 在 5~9 月出现 $\text{PM}_{2.5}$ 为良好、轻度和重度污染. 从 2016 年之后逐渐变好. 2019 年全年没出现重度及以上的等级的污染情形, 在整个研究区域内, 只有北京和张家口出现这种情况. 天津 $\text{PM}_{2.5}$ 为重度及以上等级每年均有发生, 最差出现在 2014 年. 石家庄和保定是区域

内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最重的城市. 2015 年冬季, 保定发生了极重程度的污染 [$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值 $>500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 过程, 石家庄在 2016 年秋、冬季发生同样的过程. 相比于其他城市, 这两地的同步性更好, 体现在污染发生的时间、频次和污染等级. 唐山 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度等级也呈现出自己的特色, 2014 年和 2015 年, $\text{PM}_{2.5}$ 不同污染等级密集分布, 从 2016 年开始, $\text{PM}_{2.5}$ 污染多数为中度及以上等级. 唐山 $\text{PM}_{2.5}$ 污染等级比石家庄、保定低, 比张家口、秦皇岛高. 沧州 10 月后 $\text{PM}_{2.5}$ 污染等级逐步加重, 中度和重度为主, 持续到 2 月. 总体上, 沧州 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况明显优于保定、邯郸、唐山和石家庄. 邯郸 2015、2016 和 2017 年在 5~9 月出现了多次污染等级为良好、轻度、中度和重度的情形, 与唐山和保定的情形近似, 通常这个时

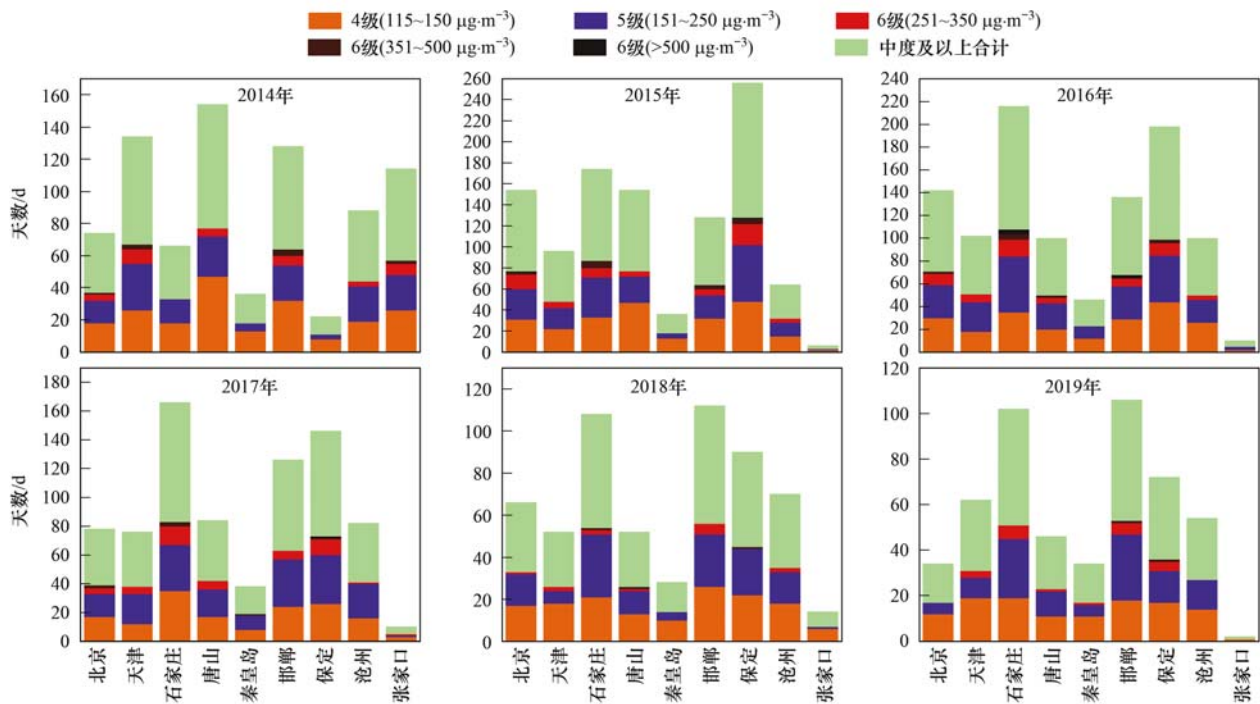


图3 9个城市2014~2019年PM_{2.5}中度及以上污染等级天数和合计天数

Fig. 3 Number of days and total days of PM_{2.5} moderate and above pollution level in nine cities from 2014 to 2019

间是PM_{2.5}优级次数多,说明河北省南部城市空气质量较差。

2.1.2 基于地面观测的O₃-8h浓度时间空间分布特征

近地层臭氧(O₃)是大气复合污染的常见污染形式之一。图4为京津冀地面环境观测站点2014年6月至2019年12月O₃-8h日平均浓度和污染等级。从中可知,研究区域内臭氧污染等级以优为主,ρ(O₃-8h)在100 µg·m⁻³以下,未出现中度及以上等级污染情形。

每年出现良好和轻度等级的城市及时间如下,2014年6个城市,分别为保定(7月)、北京(5月和6月)、邯郸(5~7月,6月出现轻度等级过程)、秦皇岛(5~7月,6月出现轻度等级过程)、石家庄(7月)和张家口(7月)。2015年7个城市,保定(6月)、北京(5月和8月)、沧州(8月)、石家庄(7月)、唐山(5月)、天津(5月)、张家口(5~7月)。2016年7个城市,保定(5月)、北京(5月和6月)、沧州(5、6和9月)、邯郸(5、9月)、唐山(5~7月)、天津(5月)和张家口(5~7月)。2017年9个城市,保定(5~7和9月)、北京(5月和6月)、沧州(5~7月和9月)、邯郸(6月)、秦皇岛(5、6和8月)、石家庄(5月和7月)、唐山(6月)、天津(5~7月)、张家口(5月和7~9月)。2018年8个城市,保定(6~8月)、北京(6月)、沧州(4月和6~8月)、邯郸(6月和7月)、石家庄(3、6和7月)、唐

山(6月)、天津(6~8月)和张家口(4~8月)。2019年9个城市,保定(6、7和9月)、北京(6月和9月)、沧州(9月)、邯郸(6、7和9月)、秦皇岛(5、6和9月)、石家庄(3月和5~10月)、唐山(9月)、天津(5~9月)和张家口(5~7月)。

可以看出,2014年臭氧浓度为良好级别的城市最少(6个)。2017年和2019年9个城市均有良好等级记录。6~7月是相对集中发生的时间。因为臭氧浓度随气温的升高而增加,但7月之后,通常降水明显增多,相对湿度增大,而降低臭氧浓度。

分析发现,京津冀O₃-8h在空间上的分布比PM_{2.5}均一,O₃-8h浓度出现良好等级的时间范围广,最早出现在3月,最迟在10月。6年间O₃-8h日均值呈现至少7次轻度污染级别。具体如下,秦皇岛占了3次,分别发生在2014年的5月和6月,达到237 µg·m⁻³和212 µg·m⁻³;2017年8月,达到215 µg·m⁻³。邯郸1次,2014年5月,达到237.4 µg·m⁻³。张家口1次,为2015年5月,达到219 µg·m⁻³。沧州1次,2017年6月。保定1次,2017年9月。也存在O₃-8h日均值全年为优级的情形,沧州、唐山和天津在2014年;邯郸在2015年;石家庄在2016年;秦皇岛在2015、2016和2018年。

从2014~2019年,O₃-8h污染呈现变重的情形,或体现在等级加重,或体现在持续时间变长。天津、保定和沧州2017年开始臭氧良好等级表现出次数明显增多、间隔短且出现多次持续时间长的过

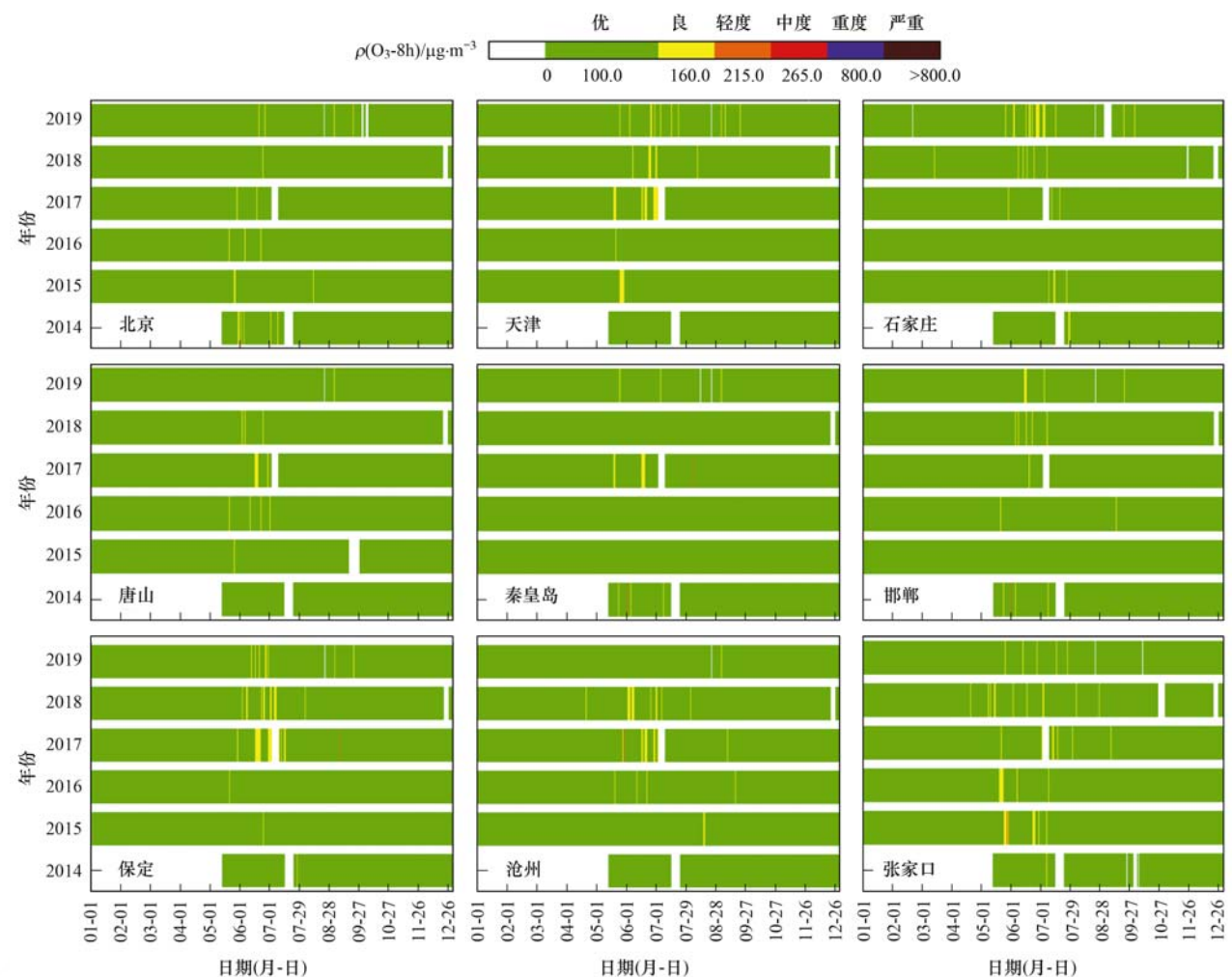


图4 9个城市2014~2019年地面观测O₃-8h日均浓度年际变化特征

Fig. 4 Interannual variation in O₃-8h daily average concentration based on observations in nine cities from 2014 to 2019

程,如天津2017年甚至出现持续近20 d(从2017年6月12日至7月1日)的过程,之后又出现一次达到7 d(2017年7月9~15日)连续良好等级的过程,2019年良好次数达到10次.石家庄O₃年度分化特征明显,2016年全年为优级,其余年份均出现多次良好等级,甚至持续多日良好等级的情形,2019年这种特征尤其明显.石家庄O₃-8h良好等级出现时间跨度最长,最早3月,最晚到10月[10月3日, $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 为172.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$].张家口除2014年外都有多次良好等级,2015年不仅是连续多日良好,而且一次过程从良好发展为轻度污染等级,2018年不仅良好等级出现次数最多,且有几连续良好等级情形.

2.1.3 基于地面观测的SO₂浓度时间空间分布特征

SO₂是常见的大气污染物之一.图5为9个城市地面观测的SO₂日均值年度变化.分析发现,SO₂以优级占绝大多数,良好等级主要集中在1、2、3和12月.其余月份出现SO₂良好等级的城市和时间分别为:保定于2015年7月,邯郸于2019年的7

月和9月.

北京、天津、沧州、秦皇岛和张家口SO₂良好等级污染情形发生于2014年和2015年,之后其余各年均没有良好等级发生.保定2015年SO₂污染情形最严重,出现多次连续型良好等级污染情形.北京和沧州在2014年的11月和12月出现SO₂等级为良好的情形.二者区别是沧州多次出现连续长时间的污染情形.保定、石家庄和唐山则在2018年和2019年未发生SO₂为良好等级的污染.邯郸2018年没有发生良好等级污染外,其余各年均良好等级发生.6年间,秦皇岛SO₂良好等级仅有3次,张家口仅发生1次良好等级.

SO₂污染和O₃-8h污染有两大明显区别,一是时间发生的差异,SO₂发生于冬季,O₃-8h发生于夏季.其次,SO₂出现更多的连续型污染特征.

2.1.4 基于空气质量指数AQI时间空间分布特征

空气质量指数(air quality index, AQI)是定量描述空气质量状况的无量纲指数,值越大、级别和类别越高,说明空气污染状况越严重,对人体的健康



图5 9个城市2014~2019年地面观测SO₂日均浓度年际变化特征

Fig. 5 Interannual variation in SO₂ daily average concentration based on observations in nine cities from 2014 to 2019

危害也就越大.参与空气质量评价的主要污染物为细颗粒物、可吸入颗粒物、SO₂、NO₂、O₃和CO这6项,能更加综合地反映空气质量. AQI共分6级:一级优、二级良、三级轻度污染、四级中度污染、五级重度污染和六级严重污染,见图6.

图6中每一簇由5根柱子构成,从左到右依次代表2015~2019年.从中看出,2015~2019年,北京AQI总趋势逐年变好的特征最显著.北京AQI优级(一级)占比从27%增加到38%,良好(二级)从30%增加加到43%,呈现单边上扬形态. 五级(重度污染)从2015年的11%减少到2019年的3%,六级(严重污染)从5%减少到1%.天津虽然优级(一级)占比从2015年的18%降低到2019年的10%,但是良好等级(二级)占比从44%增加到64%.秦皇岛和张家口从2015~2019年,优级和良好占比均大于70%.北京和天津从2017年起才出现同样的情况.而石家庄、唐山、邯郸、保定和沧州5年内优级和良好占比均未超过70%.

2015~2019年,张家口空气质量最好,五级(重

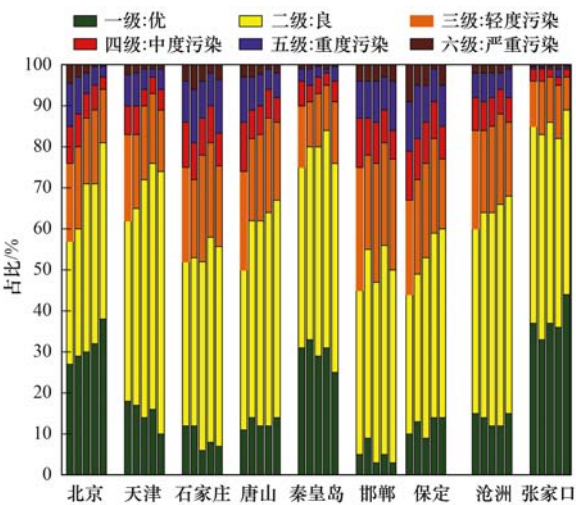


图6 9个城市2015~2019年AQI各等级占比年际变化特征

Fig. 6 Interannual variation characteristics of AQI proportion at all levels in nine cities from 2015 to 2019

度污染)和六级(严重污染)占比均小于1%.9个城市中AQI最差的是邯郸,优级占比最高为2016年,仅为9%,六级(严重污染)占比维持在约4%.秦皇岛最显著特征是六级(严重污染)占比一直低于

1%, 2018 年, 一级和二级占比之和最大, 达到 84%, 到了 2019 年, 轻度 3 级、中度 4 级和重度 5 级占比均有不同程度的增加. 相对于其余城市, 沧州 AQI 各个等级占比 5 年间最为稳定.

2.2 年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布的时间演变特征

以上内容基于 2014 ~ 2019 年站点观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 -8h 和 SO_2 日均值浓度来分析污染物历史状态、年际变化以及在空间上呈现出的差异特征. 属于对站点、单要素和逐时的污染实况呈现, 代表“真实”的污染情况, 但是在空间代表性和时序长度方面显得不足. 为了能在更长时序、不同时间尺度、更全面和更深入对京津冀大气环境状况进行摸底调查, 研究分析时空演变特征, 引入相关卫星数据, 以弥补地面观测站点在时间空间上的不足.

图 7 是将环境数据、气象数据和卫星数据同化后得到 2000 ~ 2017 年的年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 格点数据, 格点分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$, 可以满足对京津冀每年的年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布细节分析的需要.

图 7 为 2000 ~ 2017 年京津冀年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 时空演变. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布受地形影响明显, 山区和平原有明显差异, 平原区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 明显高于山区. 时间上, 从 2000 ~ 2006 逐年增加, 2006 年为第一顶峰, 之后, 开始降低, 2012 年形成阶段性底部, 之后突然跃升, 使 2013 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 成为第二峰值, 之后开始逐年降低. 年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 随时间呈现出 M 型结构, 具有双峰形态, 两个峰值都达到了 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 但是 2013 年的峰值覆盖区明显少于 2006 年的峰值区, 这种演变形态和粤港澳大湾区有明显差异^[53]. 根据 $\text{PM}_{2.5}$ 随时间变化呈现出的形态, 将全过程分为 4 个时间段.

第一阶段 2000 ~ 2006 年. 整个区域年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 逐年增加, 山区从 2000 年的 $5 \sim 25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 2006 年的 $15 \sim 40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 平原区从 $45 \sim 85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到 $60 \sim 120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2006 年出现第一个 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 峰值. 从空间演变看年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高值先以“斑点”状出现, 具有中心特征, 这些中心点通常是城市中心, 随着时间推移, 点状增多, 向“斑块”状演变, 覆盖范围越广, 到了 2006 年发展成以片状形态为主. 在该阶段, 2004 年无论是从年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$, 还是从高值斑点数上看, 均小于 2003 年.

2007 ~ 2012 年为第二阶段. 2007 年, 年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 明显下降, 张家口高值中心从 2006 年的约 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 北京从 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上降到约 $85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 随着时间推移, 不仅值降低, 高值覆盖面也明显减少, 从面状向块状和点状发展,

存在保定、石家庄、邢台和邯郸这 4 个明显的高值中心, 年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上. 到 2012 年, $\text{PM}_{2.5}$ 为本阶段的低点, 以高值为例, 北京从 2006 年的 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上减低至 2012 年的 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 石家庄、保定、廊坊、沧州和衡水从 2006 年的 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降到 2012 年的 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

第三阶段为 2013 年. 这一年极为特殊, 从 2012 年的低 $\text{PM}_{2.5}$ 值跃升到高 $\text{PM}_{2.5}$ 值, 呈现出第二个高峰, 峰值又达到 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 空间分布形态上呈现出“片中带块, 块中带点”的格局. 面状区域由石家庄、保定、沧州、衡水和邢台构成, 年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在 $90 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 在面状区域中, 存在着浓度为 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的块状区域, 周围分布着一些 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高值点状区域, 这些点块状从北边的北京开始依次往南, 沿保定、石家庄、邢台和邯郸分布.

第四阶段 2014 ~ 2017 年. 从 2014 年开始, 虽然 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在空间分布上依然保持着 2013 年的形态, 但是年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 开始逐年下降, 如北京从 2013 年约 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到 2017 年的 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 保定和石家庄从 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到 $95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 邢台和邯郸从 $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

通过分析看出, 京津冀年平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在时间演变和空间分布上有明显特征. 受“人、自然和经济”因素影响. 自然因素方面, 中长期天气气候背景的波动在一定程度上影响着 $\text{PM}_{2.5}$ 的大小和分布, 但这个问题较复杂, 研究难度很大^[54]. 人为方面除了人类生产生活的因素外, 受政府政策导向影响也很明显, 如产业结构调整、重点污染源整治和节能减排等. 有研究表明, 经济增长与雾-霾污染关系显著^[55,56]. 2013 年年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 上升, 除去经济和政策的影响以外, 气候条件也会对 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度产生影响, 如 2013 年 1 月曾出现范围广, 持续时间长的雾-霾天气^[57]. 也有学者从污染与地表参数如 NDVI 之间的关系展开研究^[58].

2.3 月平均 AOT 空间分布的时间演变特征

为了对京津冀大气污染更深入地调查, 研究月尺度上污染的时空演变特征, 对基于 MISR 的 2000 ~ 2019 年的月平均 AOD 卫星产品进行分析. 将整个时间段 (2000 ~ 2019 年) 分为两段, 每 10 a 为一段: 一段为 2000 ~ 2009 年, 另一段为 2010 ~ 2019 年.

图 8 显示的是两个时间段逐月 AOT 平均值空间分布. 从中看出, 大趋势上, 1 ~ 12 月同比, 第一时间段 (2000 ~ 2009 年) 的值大于第二时间段 (2010 ~ 2019 年), 但是 8 月大值覆盖区第二阶段大于第一阶段. AOT 从 1 月开始, 逐渐增大, 最大值出现在 7

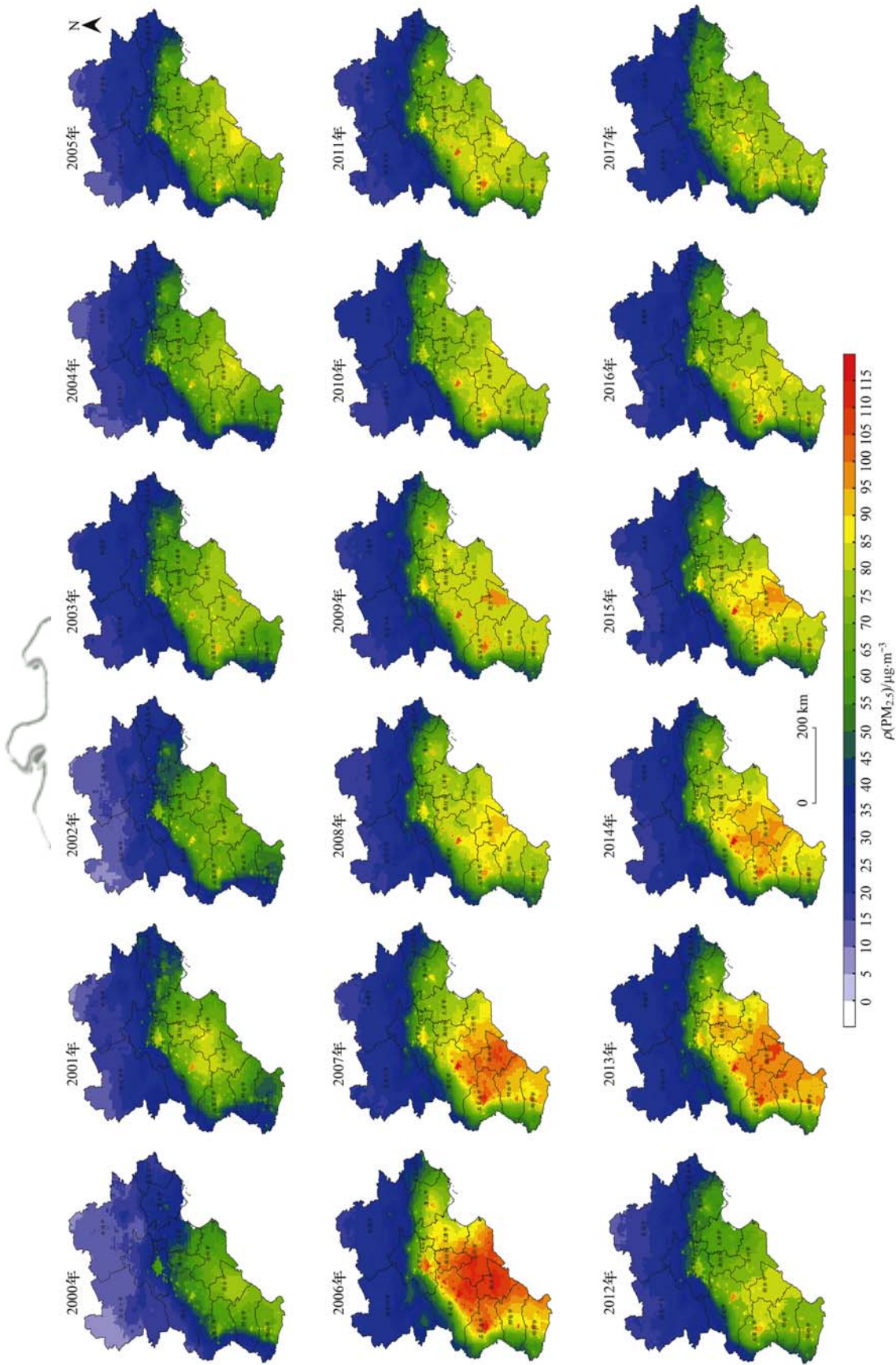


图 7 2000 ~ 2017 年京津冀 $PM_{2.5}$ 年均值浓度空间分布
Fig. 7 Annual mean $PM_{2.5}$ concentration from 2000 to 2017 in Beijing-Tianjin-Hebei

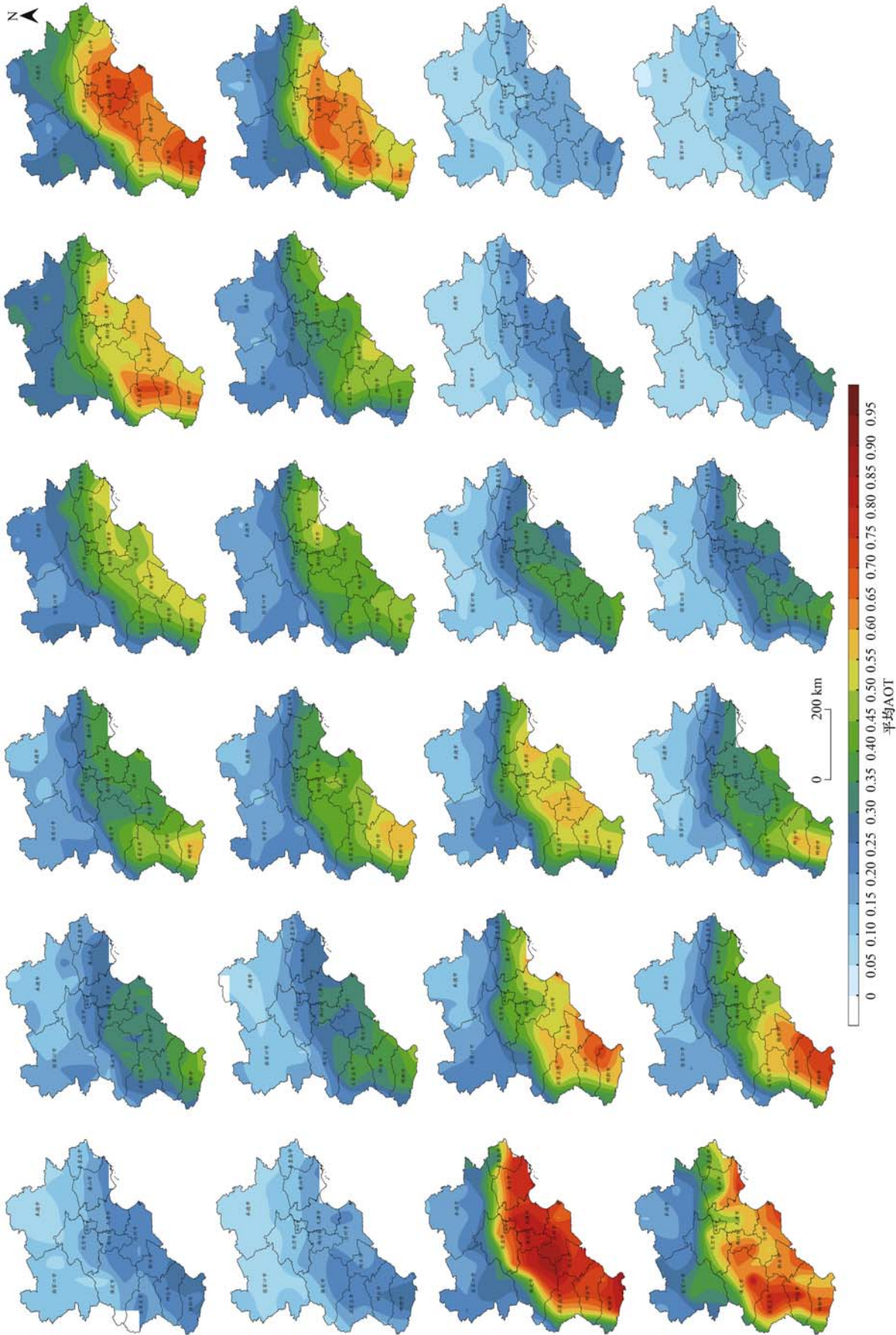


图 8 京津冀 2000 ~ 2009 年和 2010 ~ 2019 年月平均 AOT 空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of monthly average AOT over Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2009 and from 2010 to 2019

月,这或许是由于夏季相对湿度较大的原因,AOD达到1.0的级别,之后逐渐减少.值得注意的是,AOT大值是从南部邯郸先发展起来,逐渐向北影响,第一阶段这种演变形态更明显.8月开始,从北向南,AOT最大值逐渐递减,南部AOT值比北部大的特征依然存在.AOT这种演变形式说明京津冀地区污染不仅受到本地的影响,还受到周边省份输送的影响.空间分布上,平原区大于山区,而平原区上的南部相对要大于平原区上北部区域.张家口和承德地区的AOT明显低于其他地区,且20年来每个月的变化幅度轻微,这与邓学良等^[59]的研究结果一致,AOT受地形因素影响,高值区主要分布在平原地区,而低值区主要在海拔较高的山区.在时间变化方面,通常京津冀地区冬季污染要强于夏季,但是

AOT随时间分布呈现出冬季AOT值明显低于夏季的季节变化特征,这与李成才等^[60]的研究吻合.文中仅呈现了AOD的时、空演变,未涉及气溶胶微物理属性.Tao等^[61]的研究利用MISR卫星V23最新版本数据产品,对我国几个典型区域不同季节的气溶胶微物理属性特征分布开展了详细地研究.

2.4 多年月平均SO₂空间分布的时间演变特征

图9为2004~2019年月平均SO₂空间分布,形态上与PM_{2.5}和AOT有很大不同.从南向北有明显的层次特征,存在中心特征,地形对SO₂分布的影响不及对PM_{2.5}明显.

时间变化方面,总体上1、2和12月有明显的大值区域, $\varphi(\text{SO}_2)$ 可以达到 2.5×10^{-9} 以上,3~5月有2个层级,一级低于 0.4×10^{-9} ,以京津冀的北

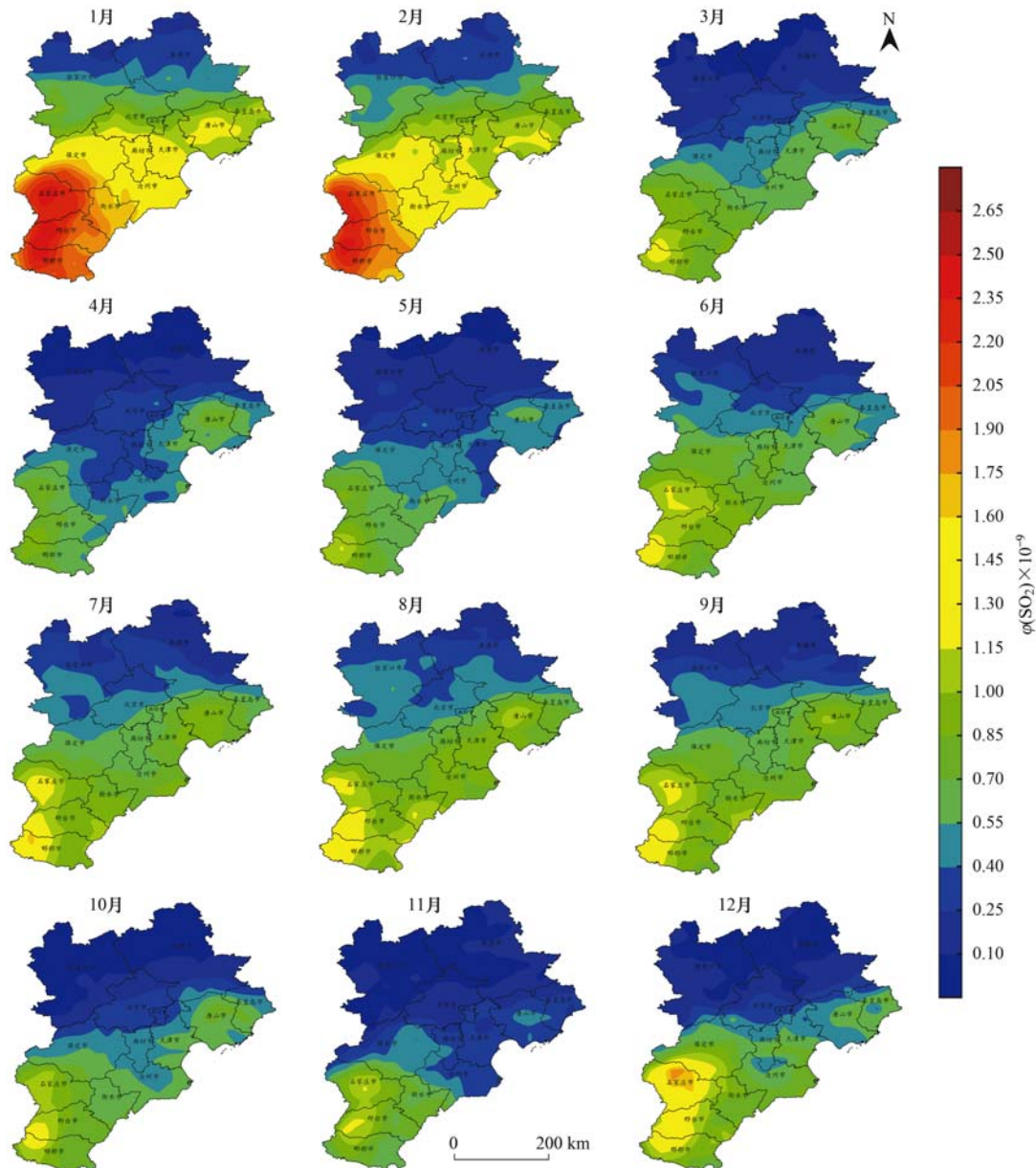


图9 京津冀2004~2019年多年月平均SO₂空间分布

Fig. 9 Spatial distribution in monthly average SO₂ from 2004 to 2019 in Beijing-Tianjin-Hebei

部为主,另一级在 $0.5 \sim 1.0 \times 10^{-9}$ 以京津冀的南部为主。6~10 月,大值区域 $\varphi(\text{SO}_2)$ 约在 1.5×10^{-9} ,量级明显降低。具体而言,1 月和 2 月 $\varphi(\text{SO}_2)$ 最高值分布在南部邯郸、邢台和石家庄,值为 3.0×10^{-9} ,往北保定、沧州、廊坊和天津为 1.5×10^{-9} ,继续往北的秦皇岛、唐山、北京及张家口南部继续降低为 1.0×10^{-9} 左右,最北边的张家口北部和承德地区 SO_2 浓度最小,为 0.5×10^{-9} 以下。1 月和 2 月之后,层级结构特征弱化,且出现一些中心点,最典型的是唐山。北京从 3~12 月 $\varphi(\text{SO}_2)$ 一直处于较低的量级,在 0.4×10^{-9} 以下,但是在 6~9 月北京南部和河北南部出现一致的浓度量级,大于 0.4×10^{-9} 。这或许既能反映出能耗的结构特征,北京和唐山能耗存在差异,同样反映出北京 SO_2 明显受到区域影响,具有一定的区域同步性。

SO_2 主要来源于煤炭燃烧、发电和工业生产等固定源。南部地区 SO_2 体积分数之所以为高值,是因为河北省重工业大部分集中该区域,如石家庄和邯郸等城市。 SO_2 浓度在冬季 1、2 和 12 月份较高,而在其余时间相对较低,一方面是因为冬季排放源强度大、气象条件不利于污染物扩散,另一方面是夏季降水充沛,通过湿清除的途径消减了空气中大量的 SO_2 。

2.5 15 a 的 NO_2 浓度空间分布特征

图 10 为 15 a (2005~2019 年) 京津冀 NO_2 对流层柱浓度多年年平均空间分布。空间呈现出明显的 NO_2 高值区域,为 $1900 \times 10^{15} \text{ molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$ (对流层柱浓度,下同),位于京津冀中东部的北京、天津、唐山和南部的石家庄、邢台和邯郸。高浓度 NO_2 沿

中心向外摊开,浓度逐渐降低为 $1000 \times 10^{15} \text{ molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$,在山区地方, NO_2 浓度值最小, $100 \times 10^{15} \text{ molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

NO_2 浓度在空间上基本呈现出经济发展水平较高、人口密度大和工业较为集中的城市, NO_2 柱浓度值也明显较高的特征。这些地区汽车数量增加或能源利用量增加,加速了 NO_x 的排放,进而增加了大气 NO_2 的浓度。说明 NO_2 主要排放源为机动车尾气排放这类人类活动外,受工业源大气污染物排放影响也很明显,而这些工业源能耗产生的大气污染主要集中在唐山、邯郸、石家庄和天津等。

3 结论

(1) 近 6 年的地面观测 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值数据表明,京津冀地区污染天数多、等级重、受周边影响、总体向好。代表北部山区的张家口 $\text{PM}_{2.5}$ 污染表现最优,其次是秦皇岛。污染季从 10 月到次年 4 月。具体到不同时间和不同空间上, $\text{PM}_{2.5}$ 的污染现状和污染分布特征具有明显时空差异。

(2) 近 6 年地基 O_3 -8h 日均值数据表明,轻度等级污染至少出现 7 次,其中秦皇岛占了 3 次。良好等级污染频发,时间范围广,3~10 月。未出现中度及以上污染等级。存在 O_3 -8h 日均值全为优级的年份,沧州、唐山和天津为 2014 年,2015 年邯郸和秦皇岛,2016 年石家庄,2018 年秦皇岛。

(3) 近 6 年地基观测的 SO_2 日均值数据表明, SO_2 以优级为主,未出现轻度及以上污染等级,良好等级主要发生在冬季,且多以连续几日的形式出现。在 2018 年和 2019 年,9 地未出现良好等级污染。

(4) 基于 5 a 的 AQI 分析表明,从 2015~2019 年,北京优级 AQI 占比从 27% 增加到 38%。天津良好等级 AQI 占比从 44% 增加到 64%。邯郸优级 AQI 占比最高为 2016 年,仅为 9%,其余年份为 4%,而 6 级严重污染等级的 AQI 均保持在 4%。

(5) 基于卫星的年平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 数据表明, $\text{PM}_{2.5}$ 呈现 M 型特征。第一段 2000~2006 年,第一峰在 2006 年,第二段 2007~2012 年,第三段为 2013 年,同时也是第二峰,第四段为 2014~2017 年。 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布呈现出明显受地形和土地利用的影响,平原区大于山区,城市区大于郊区的特征。

(6) 将基于卫星的月平均 AOT 分成 10 a 一段 (2000~2009 年为一, 2010~2019 年为一)。每月同比,除了 8 月之外,第一时间段 AOT 大于第二时间段的同月。最大值出现在夏季 7 月,最小值在冬季 12 月。空间上,平原区大于山区,而且北部的张家口、承德区域近 20 年来月平均 AOT 变化轻微。

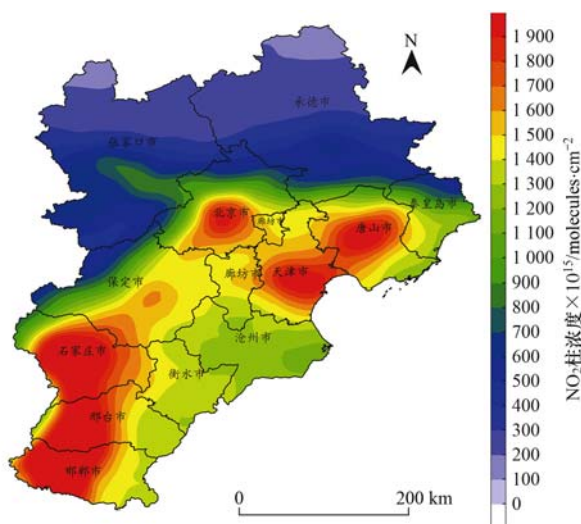


图 10 京津冀区域 2005~2019 年 NO_2 对流层柱浓度多年年平均空间分布

Fig. 10 Multi-year average spatial distribution of tropospheric NO_2 column concentration from 2005 to 2019 in Jing-Jin-Ji

(7) 基于卫星的 16a 月平均 SO_2 浓度空间分布表明, SO_2 浓度在空间上有明显层次, 大值区在南部的邯郸、邢台和石家庄. 低值区在北部张家口、承德. 北京的南部受河北影响明显. 基于卫星的多年 NO_2 平均值浓度的高值中心集中在北京、天津、唐山和邯郸、邢台、石家庄.

致谢: 本研究环境监测数据源自中华人民共和国生态环境部 (<http://www.mee.gov.cn/>); 卫星遥感数据产品来自美国戈达地球科学数据和信息中心 (Goddard Earth Science Data and Information Services Center) 和 NASA 的兰利 (Langley) 中心, 在此对各数据监制单位表示感谢.

参考文献:

- [1] Liu J, Han Y Q, Tang X, *et al.* Estimating adult mortality attributable to $\text{PM}_{2.5}$ exposure in China with assimilated $\text{PM}_{2.5}$ concentrations based on a ground monitoring network [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **568**: 1253-1262.
- [2] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 826-840.
Shi G Y, Wang B, Zhang H, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 826-840.
- [3] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1936-1943.
Li X F, Zhang M J, Wang S J, *et al.* Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1936-1943.
- [4] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [5] Kaufman Y J, Tanré, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 2002, **419**(6903): 215-223.
- [6] Keil A, Haywood J M. Solar radiative forcing by biomass burning aerosol particles during SAFARI 2000: A case study based on measured aerosol and cloud properties [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D13), doi: 10.1029/2002JD002315.
- [7] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981-2005 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, **97**(3-4): 235-242.
- [8] Rohen G J, von Hoyningen-Huene W, Kokhanovsky A, *et al.* Retrieval of aerosol mass load (PM_{10}) from MERIS/Envisat top of atmosphere spectral reflectance measurements over Germany [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, **4**(3): 523-534.
- [9] van Donkelaar A, Martin R V, Spurr R J D, *et al.* Optimal estimation for global ground-level fine particulate matter concentrations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(11): 5621-5636.
- [10] Green M, Kondragunta S, Ciren P, *et al.* Comparison of GOES and MODIS aerosol optical depth (AOD) to aerosol robotic network (AERONET) AOD and IMPROVE $\text{PM}_{2.5}$ mass at Bondville, Illinois [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, **59**(9): 1082-1091.
- [11] Paciorek C J, Liu Y, Moreno-Macias H, *et al.* Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth retrievals and ground-level $\text{PM}_{2.5}$ [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(15): 5800-5806.
- [12] Chudnovsky A A, Lee H J, Kostinski A, *et al.* Prediction of daily fine particulate matter concentrations using aerosol optical depth retrievals from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(9): 1022-1031.
- [13] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang Q, Li J C, *et al.* Comparison of models on spatial variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration: a case of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- [14] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的健康效益评估 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(1): 166-174.
Huang D S, Zhang S Q. Health benefit evaluation for $\text{PM}_{2.5}$ pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(1): 166-174.
- [15] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 分布格局演变及其影响因素 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Evolution of the distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yangtze River economic belt and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [16] Jain S, Sharma S K, Choudhary N, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ using PCA/APCS, UNMIX, and PMF at an urban site of Delhi, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(17): 14637-14656.
- [17] 程渊, 刘保双, 毕晓辉, 等. 天津市夏冬季环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分污染特征及来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(9): 3394-3405.
Cheng Y, Liu B S, Bi X H, *et al.* Character and source analysis of carbonaceous aerosol in $\text{PM}_{2.5}$ during summer-winter period, Tianjin urban area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(9): 3394-3405.
- [18] 国纪良, 姬亚芹, 马妍, 等. 盘锦市夏冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分污染特征及来源分析 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3201-3206.
Guo J L, Ji Y Q, Ma Y, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbon components in $\text{PM}_{2.5}$ during summer and winter in Panjin city [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3201-3206.
- [19] 范美益, 曹芳, 张园园, 等. 徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4478-4485.
Fan M Y, Cao F, Zhang Y Y, *et al.* Characteristics and sources of water soluble inorganic ions in fine particulate matter during winter in Xuzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4478-4485.
- [20] 江琪, 王飞, 张恒德, 等. 2013~2015 年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、反应性气体和气溶胶粒径的特性分析 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3647-3657.
Jiang Q, Wang F, Zhang H D, *et al.* The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$, reactive gas and aerosol size distributions of Beijing from 2013 to 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3647-3657.
- [21] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演化特征及驱动因素解析 [J]. *地理学报*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of $\text{PM}_{2.5}$ in China between 2000 and 2011

- [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [22] 别同, 韩立建, 田淑芳, 等. 人口城市化对空气污染人群暴露贡献的定量方法研究[J]. *生态学报*, 2018, **38**(13): 4570-4583.
- Bie T, Han L J, Tian S F, *et al.* Method for quantifying the contribution of urbanization on population exposure to air pollution[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(13): 4570-4583.
- [23] 傅尧, 王琛, 王乐, 等. 河北省PM_{2.5}污染变化特征及暴露人群健康效应评估研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, **41**(12): 187-190.
- Fu Y, Wang C, Wang L, *et al.* Variation characteristics of PM_{2.5} pollution in Hebei province and health effects evaluation of exposed population [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, **41**(12): 187-190.
- [24] 王桂林, 张伟. 中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
- Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on PM_{2.5} pollution in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
- [25] Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2015 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, **29**(2): 253-270.
- [26] 江佳, 邹滨, 陈璟雯. 中国大陆1998年以来PM_{2.5}浓度时空分异规律[J]. *遥感信息*, 2017, **32**(1): 28-34.
- Jiang J, Zou B, Chen J W. Spatial-temporal distribution of PM_{2.5} concentrations in mainland China since 1998[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, **32**(1): 28-34.
- [27] 郑保利, 梁流涛, 李明明. 1998~2016年中国地级以上城市PM_{2.5}污染时空格局[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 1909-1919.
- Zheng B L, Liang L T, Li M M. Analysis of temporal and spatial patterns of PM_{2.5} in Prefecture-Level Cities of China from 1998 to 2016[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 1909-1919.
- [28] 罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 等. 近20年来中国典型区域PM_{2.5}时空演变过程[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- Luo Y, Deng Q F, Yang K, *et al.* Spatial-temporal change evolution of PM_{2.5} in typical regions of China in recent 20 years [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- [29] Guo H, Wang Y G, Zhang H L. Characterization of criteria air pollutants in Beijing during 2014-2015 [J]. *Environmental Research*, 2017, **154**: 334-344.
- [31] Yan D, Lei Y L, Shi Y K, *et al.* Evolution of the spatiotemporal pattern of PM_{2.5} concentrations in China-A case study from the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **183**: 225-233.
- [31] 彭功, 赵媛媛, 赵吉麟, 等. 京津冀大气污染传输通道区大气污染时空格局研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 449-458.
- Peng L, Zhao Y Y, Zhao J L, *et al.* Spatiotemporal patterns of air pollution in air pollution transmission channel of Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 449-458.
- [32] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域PM_{2.5}污染相互输送特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of PM_{2.5} in Jingjinji region, 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [33] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: implications for air quality studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(21), doi: 10.1029/2003GL018174.
- [34] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [35] Pan X, Kanaya Y, Tanimoto H, *et al.* Examining the major contributors of ozone pollution in a rural area of the Yangtze River Delta region during harvest season [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(11): 6101-6111.
- [36] Wang Y G, Hopke P K, Xia X Y, *et al.* Source apportionment of airborne particulate matter using inorganic and organic species as tracers[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **55**: 525-532.
- [37] Ding A J, Wang T, Thouret V, *et al.* Tropospheric ozone climatology over Beijing: analysis of aircraft data from the MOZAIC program [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(1): 1-13.
- [38] Tang G, Li X, Wang Y, *et al.* Surface ozone trend details and interpretations in Beijing, 2001-2006 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(22): 8813-8823.
- [39] 贺克斌, 杨复沫, 段凤魁, 等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [40] 王文兴, 卢筱凤, 庞燕波, 等. 中国氨的排放强度地理分布[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(1): 2-7.
- Wang W X, Lu X F, Pang Y B, *et al.* Geographical distribution of NH₃ emission intensities in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, **17**(1): 2-7.
- [41] Hamaoui-Laguel L, Meleux F, Beekmann M, *et al.* Improving ammonia emissions in air quality modelling for France [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 584-595.
- [42] Schichtel B A, Husar R B, Falke S K, *et al.* Haze trends over the United States, 1980-1995 [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(30): 5205-5210.
- [43] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013~2014年北京市NO₂时空分布研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 18-26.
- Cheng N L, Li Y T, Chen T, *et al.* Spatial and temporal distribution of NO₂ during 2013~2014 in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 18-26.
- [44] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, **123**(2): 135-143.
- [45] van Donkelaar A, Martin R V, Spurr R J D, *et al.* High-resolution satellite-derived PM_{2.5} from optimal estimation and geographically weighted regression over North America [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(17): 10482-10491.
- [46] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(7): 3762-3772.
- [47] 许珊, 邹滨, 宫俊霞. 2001~2015年中国城镇化与PM_{2.5}浓度时空关联特征[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 469-477.
- Xu S, Zou B, Gong J X. Analysis of the spatial-temporal association between urbanization and PM_{2.5} concentration during 2001~2015 period in mainland China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 469-477.

- [48] 韩婧, 李元征, 李峰. 2000-2015 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布特征及其城乡差异[J]. 生态学报, 2019, **39**(8): 2954-2962.
- Han J, Li Y Z, Li F. Spatio-temporal distribution characteristic of $\text{PM}_{2.5}$ concentration and the difference of $\text{PM}_{2.5}$ concentration between urban areas and rural areas in China from 2000 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(8): 2954-2962.
- [49] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近 20 年来中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染演变的时空过程[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 1-13.
- Shi Y, Liu R M, Luo Y, *et al.* Spatiotemporal variations of $\text{PM}_{2.5}$ pollution evolution in China in recent 20 years [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 1-13.
- [50] 何映月, 张松林. 2000 ~ 2016 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 时空格局[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(8): 3284-3293.
- He Y Y, Zhang S L. Spatiotemporal pattern of $\text{PM}_{2.5}$ from 2000 to 2016 in China [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(8): 3284-3293.
- [51] Wang Y Q. MeteInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis [J]. *Meteorological Applications*, 2014, **21**(2): 360-368.
- [52] 人民网-环保频道. 《环境空气质量标准》修改单等获生态环境部原则通过 [EB/OL]. <http://env.people.com.cn/n1/2018/0801/c1010-30183871.html>, 2018-08-01.
- [53] 王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 等. 基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2075-2086.
- Wang Y T, Liang J C, Zheng Z F, *et al.* Characteristics of spatial and temporal evolution and investigation of air pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on ground-space observation data [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2075-2086.
- [54] 吴兑, 刘启汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子($\text{PM}_{2.5}$)污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2660-2669.
- Wu D, Lau A K H, Leung Y, *et al.* Hazy weather formation and visibility deterioration resulted from fine particulate ($\text{PM}_{2.5}$) pollutions in Guangdong and Hong Kong [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(11): 2660-2669.
- [55] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016, **51**(9): 73-88.
- Shao S, Li X, Cao J H, *et al.* China's economic policy choices for governing smog pollution based on spatial spillover effects [J]. *Economic Research Journal*, 2016, **51**(9): 73-88.
- [56] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要影响因素及内在关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(4): 102-109.
- Zhou S D, Ouyang W Q, Ge J H. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(4): 102-109.
- [57] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(1): 27-36.
- Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 26-35.
- [58] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- Sun S, Li L J, Zhao W J, *et al.* Variation in pollutant concentrations and correlation analysis with the vegetation index in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1585-1593.
- [59] 邓学良, 邓伟涛, 何冬燕. 近年来华东地区大气气溶胶的时空特征[J]. 大气科学学报, 2010, **33**(3): 347-354.
- Deng X L, Deng W T, He D Y. Spatial-temporal features of atmospheric aerosol in East China in recent years [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2010, **33**(3): 347-354.
- [60] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染[J]. 大气科学, 2003, **27**(5): 869-880.
- Li C C, Mao J T, Liu Q H, *et al.* Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(5): 869-880.
- [61] Tao M H, Wang J, Li R, *et al.* Characterization of aerosol type over East Asia by 4.4 km MISR product: first insight and general performance [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(13), doi: 10.1029/2019JD031909.

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ²⁺	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)