

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王蕊燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

京津冀及周边地区 PM_{2.5} 时空变化特征遥感监测分析

陈辉¹, 厉青¹, 李营¹, 张连华¹, 毛慧琴^{1*}, 周伟², 刘伟汉²

(1. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094; 2. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 为分析京津冀及周边地区的 PM_{2.5} 时空变化特征, 先利用 MODIS 数据反演 1 km 分辨率的 AOT 产品, 采用地理加权回归模型实现京津冀及周边地区 2016~2017 年逐日 PM_{2.5} 浓度的遥感反演, 并在此基础上对多种时间尺度 PM_{2.5} 浓度合成结果进行验证分析, 最后从不同时间尺度对 2016 年和 2017 年 PM_{2.5} 时空变化特征进行了对比分析. 结果表明本研究反演的日均、月均和年均这 3 种时间尺度的 PM_{2.5} 浓度结果总体上效果较为理想, 时间尺度越大, 遥感估算的 PM_{2.5} 效果越好, 年均 PM_{2.5} 结果相对精度达 80% 以上, 并且 2016 年和 2017 年同一时间尺度的 PM_{2.5} 遥感结果精度较为接近. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 分布总体均呈现“冬季 > 秋季 ≈ 春季 > 夏季”和“南高北低”的季节变化和空间分布趋势. 与 2016 年相比, 2017 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 浓度平均下降约 9.2%, 且高值区范围明显减小, PM_{2.5} 浓度高值一般发生在 11 月和 12 月, 而低值则一般发生在 8 月. 2017 年与 2016 年 PM_{2.5} 浓度时空变化与 2017 年的大气污染综合治理攻坚行动巡查和空气质量专项督查活动密切相关, 这也能间接说明大气污染减排的成效.

关键词: 卫星遥感; 京津冀及周边地区; 多尺度验证; PM_{2.5}; 时空变化

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0033-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.201802104

Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM_{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing

CHEN Hui¹, LI Qing¹, LI Ying¹, ZHANG Lian-hua¹, MAO Hui-qin^{1*}, ZHOU Wei², LIU Wei-han²

(1. Satellite Environmental Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To analyze the spatial and temporal variation characteristics of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions, a 1 km resolution AOT product was retrieved from MODIS data and the remote sensing inversion of the PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions was realized using the geographically weighted regression model. On this basis, the synthesis results of multi-timescale PM_{2.5} concentrations were verified and analyzed. Finally, the spatial and temporal variation characteristics of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions between 2016 and 2017 were compared and analyzed using different time scales. The results show that the verification of the PM_{2.5} concentration products of the average daily, monthly, and annual averages are in general good. The larger the time scale is, the better is the PM_{2.5} effect of the remote sensing estimation. The relative accuracy of the annual average PM_{2.5} products is higher than 80%. However, the precision of the PM_{2.5} remote sensing results for 2016 and 2017 is relatively close (at the same time scales). The PM_{2.5} distribution in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions shows a seasonal variation (winter > autumn ≈ spring > summer). The spatial distribution is high in the southern but low in the northern part. Compared with 2016, the average PM_{2.5} concentration decreased by ~9.2% in 2017. The area with high values was significantly reduced. High PM_{2.5} concentrations occurred in November and December and low concentrations were observed in August. The PM_{2.5} concentration change between 2017 and 2016 is closely related to the comprehensive control crucial action and specific inspection activities of air pollution in 2017, which indirectly account for the effect of the reduction of the atmospheric pollution.

Key words: remote sensing; Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions; multiscale verification; PM_{2.5}; spatiotemporal change

大气细颗粒物(PM_{2.5})指空气动力学直径小于等于 2.5 μm 的颗粒, 是大气污染的重要成分之一, 也是造成京津冀及周边地区空气重污染的主要污染物之一. 近年来, 卫星遥感技术由于监测范围广、动态持续长、数据客观科学等独特优势, 并且获取的气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness, AOT)产品与大气颗粒物浓度具有显著的相关性, 被广泛用于我国大气颗粒物遥感监测^[1, 2].

国内外许多学者在 PM_{2.5} 遥感估算方法上进行了大量的尝试研究实验, 其主要思路是在卫星遥感

获取 AOT 产品的基础上, 考虑大气边界层高度、温度、湿度、风速等气象环境的影响, 采用不同的物理机制和数理统计方法来获取区域 PM_{2.5} 浓度信息, 如文献[3~6]基于区域气候模式(RAMS)、全球预报系统(GFS)、中尺度区域气象模式(WRF)等模拟

收稿日期: 2018-02-12; 修订日期: 2018-06-28

基金项目: 2017 年国家环境保护标准制修订项目(2017-27); 环境保护部卫星环境应用中心基金项目(WHJJ2016-003)

作者简介: 陈辉(1986~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气环境遥感监测技术, E-mail: matheking@163.com

* 通信作者, E-mail: huiqin.mao@hotmail.com

及地面观测气象资料结合 MODIS 数据反演的 AOT 产品通过订正和回归分析的方法获得了我国不同地区 10 km 分辨率的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布, 并初步分析了不同地区的 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化; 文献[7~9]在地理加权回归(GWR)方法基础上进一步发展了两层级、贝叶斯最大熵-地理加权等更高级的统计模型, 以 MODIS、VIIRS 等卫星遥感 AOT 资料结合 AOT、气象数据、地理数据和污染物排放数据等信息, 实现了我国不同地区 3 km、6 km 和 0.1° 等多种分辨率的 $PM_{2.5}$ 浓度遥感估算产品, 均取得了良好的效果. 由此可见, 利用卫星遥感获取高分辨率、高精度、大范围的区域 $PM_{2.5}$ 浓度数据是一种行之有效的技术手段, 但上述研究主要基于最高分辨率仅为 3 km 的 AOT 产品进行 $PM_{2.5}$ 浓度遥感估算方法研究, 并且更多的是在遥感估算技术方法方面的研究和验证, 而对重点区域 $PM_{2.5}$ 浓度多时间尺度产品验证和时空变化特征的深入研究分析相对较少, 不能为推广 $PM_{2.5}$ 遥感产品的应用提供质量保证, 也不能为环境监管部门提供多层次的决策信息支持.

为进一步挖掘卫星遥感技术在重点地区和局地大气环境精细化监测领域的应用潜力, 本研究从 MODIS LIB 数据中反演 1 km 分辨率的 AOT, 采用地理加权回归模型实现京津冀及周边地区 2016~2017 年逐日 $PM_{2.5}$ 浓度的遥感反演, 并在此基础上对多种时间尺度 $PM_{2.5}$ 浓度合成结果进行验证分析, 最后从不同时间尺度对 2016 年和 2017 年京津冀地区的 $PM_{2.5}$ 时空变化特征进行了对比分析, 同时关注环境监管活动与 $PM_{2.5}$ 变化的相关性, 以期为大气环境管理部门提供决策信息支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

京津冀地区处于环渤海地区和东北亚的核心重要区域, 是中国最大的能源工业基地、重要的钢铁基地和棉花基地, 作为中国工业最为发达的地区之一, 同时也是空气污染最严重的地区之一, 是国家控制空气污染的重点区域. 而空气污染物的迁移扩散会影响周边省市的空气质量, 石家庄、郑州、济南和太原等城市在全国重点城市环境空气质量排名多次列入空气质量相对较差的前十位, 因此需对京津冀及其周边地区采取联防联控措施^[10].

根据文献[11], 到 2017 年京津冀及周边地区(主要包括北京、天津、河北、山西、山东、河南等省市, 东经: $110^\circ \sim 125^\circ$, 北纬: $30^\circ \sim 45^\circ$)将采取一系列措施减少污染的排放, 环境保护部在 2017 年

开展了第一季度空气质量专项督查^[12]和多次京津冀及周边地区秋冬季大气污染综合治理攻坚行动巡查^[13]等行动, 以督促《大气污染行动防治计划》的落实. 为了有效支撑 $PM_{2.5}$ 污染防治措施的落实和污染物削减评估, 本研究以京津冀及周边地区作为研究区域(见图 1), 利用 MODIS 卫星数据和 WRF 资料对 2016~2017 年 $PM_{2.5}$ 时空变化情况进行遥感监测, 并与去年同期进行对比分析, 以期为京津冀及周边地区大气污染物联防联控提供科学的决策依据.

1.2 数据及方法

卫星遥感监测 $PM_{2.5}$ 需要高精度的关键技术参量, 主要包括 AOT、相对湿度(RH)和边界层高度(HPBL)等参数. 本研究结合暗象元和深蓝算法从 MODIS 数据中提取 AOT, 从 WRF 模拟资料中提取边界层高度和相对湿度.

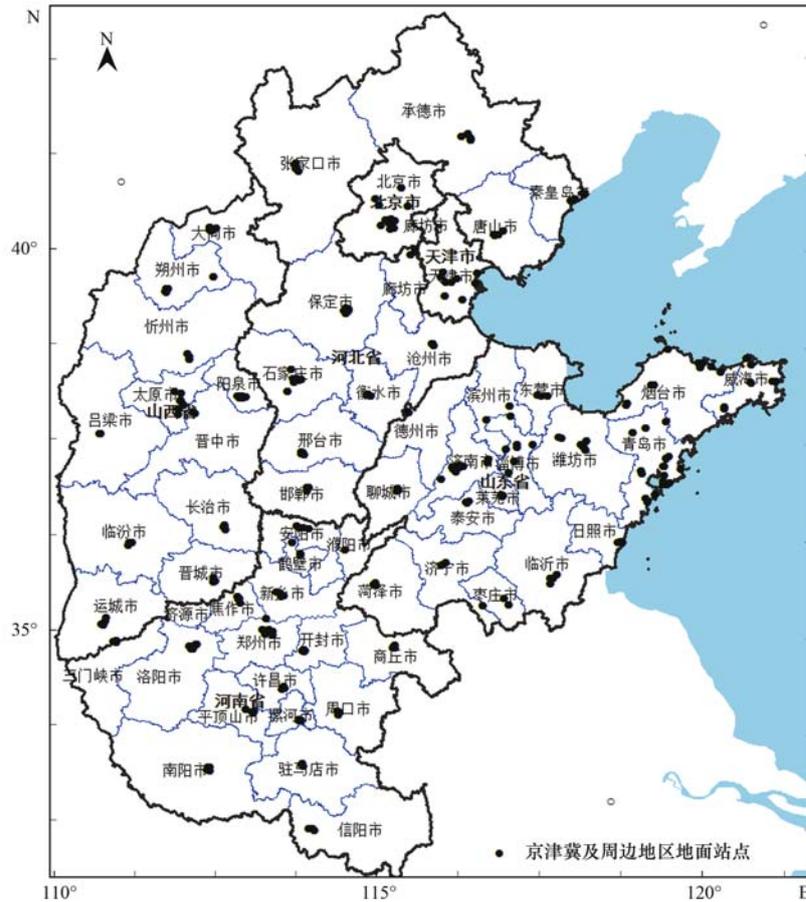
1.2.1 AOT 遥感监测

假设大气水平均一的情况下, 卫星传感器接收到的表观反射率可用式(1)表示为大气和地表之间多次散射的结果^[14]:

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \rho_0(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_s}{1 - \rho_s S} \quad (1)$$

式中, ρ_{TOA} 为卫星接收到的表观反射率, θ_s 与 θ_v 分别为太阳天顶角与观测天顶角, ρ 为太阳入射与卫星观测方向的相对方位角, ρ_0 为大气程辐射反射率, S 为大气整层的半球后向反射率, $T(\theta_s)$ 为太阳到地面的散射透过率, $T(\theta_v)$ 为地表到卫星传感器的散射透过率, 一般 $T(\theta_s)$ 和 $T(\theta_v)$ 总是以乘积形式出现, 因此将 $T(\theta_s)T(\theta_v)$ 可视为一个参数表示大气整层的散射透过率 T , ρ_s 为地表反射率. 上述角度单位均为弧度, 反射率、透过率取值为 $0 \sim 1$, 无量纲^[15].

由式(1)可知, 卫星探测的表观反射率耦合了大气和地表的信息, 要进行 AOT 反演的关键是进行地气解耦, 去除地表反射率的影响^[16]. 目前用于 AOT 遥感反演较成熟的算法有暗目标和深蓝算法等^[17], 目前这种算法在 MODIS 传感器上得到了业务应用^[18~20]. 暗目标法就是浓密植被法, 其原理是对于植被密集的地表(即暗目标), 红、蓝波段不仅有较小的反射率, 并且红、蓝和短波红外通道反射率之间具有较好的线性相关, 由此结合式(1)可实现暗目标象元的 AOT 遥感反演. 而深蓝算法^[21~23]是利用在蓝波段大气反射相对较强、地表反射相对较弱的特征, 基于地表反射率在一定时期变化较小的原理, 利用清晰天的地表反射率去除地表贡献反



图中边框即为研究区边界，京津冀及周边地区的北京、天津、河北、山西、山东、河南等省和市边界分别以黑色线条和蓝色线条标注

图 1 京津冀及周边重点城市地面 PM_{2.5}自动观测站地理位置示意

Fig. 1 Geographic location of key city PM_{2.5} observation sites in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions

演气溶胶。

相关研究表明暗目标算法反演的 AOT 产品具有较高的精度^[4, 18, 24]，而深蓝算法则能针对更广泛的地表类型，而将两种算法采用优选的融合方法进行结果合成的 AOT 产品既提升了与地面 CE318 测量结果的相关性，又能获取更高的覆盖率，这比暗目标或者深蓝算法其中单独一种算法效果都有较大的改进。本研究基于该原理从 MODIS 数据中根据暗象元和深蓝算法原理^[18]设计数据处理流程反演 1 km 分辨率的 AOT 产品，作为本研究 PM_{2.5} 遥感估算的关键参数之一。

1.2.2 边界层高度和相对湿度模拟

边界层高度和相对湿度资料目前主要来源于中尺度大气模式的数值模拟结果，目前主要有 ETA、MM5、WRF 和 RAMS 等区域气候模式。其中 WRF 模式(weather research and forecasting model)是由美国多所科研机构的科学家们共同研发的与业务与研究共用的继 MM5 后新一代高分辨率中尺度预报模式，WRF 模式是一种完全可压缩非静力模式，其内部参数化方案较其他中尺度模式丰富，物理过程更为细致，集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一

体的模式系统，能更好地改善对中尺度天气的模拟和预报，目前主要被广泛用于模拟水平分辨率 1 ~ 30 km 的天气现象，同时也可用于大涡模拟尺度(水平分辨率 ≤ 100 m)和全球尺度^[25]。

相关研究表明 WRF 在我国不同地区的边界层高度和湿度等参数模拟效果较好，如石春娥等^[26]应用 MM5 和 WRF 模式对我国中东部地区边界层气象要素进行了逐日模拟和结果检验，表明 WRF 模式对地面温度和湿度的模拟效果较好，并且能较好地再现近地逆温层；王丽霞^[27]和赵世强^[28]等利用 WRF 模式模拟兰州市和北京市等地区的大气边界层高度，并将模拟结果与同期探空资料和激光雷达观测计算的大气边界层高度进行了比较分析，结果表明 WRF 模式能较好地模拟出不同地区的边界层高度变化特征，与实测结果基本一致。

本研究中 WRF 模式采用 2013 年 4 月 18 日发布的 WRF-ARW v3.5 版本，模拟范围为东经 106.883 5° ~ 146.998 6° 和北纬 17.845 4° ~ 47.634 1°，其中 X 方向设置 210 个网格，Y 方向设置 198 个网格，水平网格分辨率为 15 km，垂直方向共设置 20 个气压层，层间距自下而上逐渐增大，

各物理过程参数设置如表 1, 参数详细介绍参考文献[29].

表 1 WRF 物理过程参数化方案设置

Table 1 WRF physical process parameterization scheme settings

物理过程	短波辐射	长波辐射	云微物理	积云对流	陆面过程	城市冠层	边界层
参数化方案	Gordard	RRTM	Lin	Grell-D	Noah	BEM	MYJ

1.2.3 PM_{2.5}浓度遥感监测

近年来, 国内外学者开展了大量利用卫星遥感技术进行近地面 PM_{2.5} 遥感监测关键技术及业务化方法研究, 但未考虑局部参数差异的 PM_{2.5} 遥感估算方法会导致反演结果有较大的误差^[4, 9, 30]. 因此, 越来越多的研究考虑 PM_{2.5} 时空分布变化特征, 引入地理加权回归模型, 利用卫星遥感 AOT 和 RH、HPBL 等气象资料, 并结合地面观测数据发展了 PM_{2.5} 遥感反演方法模型, 都取得了较好的效果. 这主要是因为相对于其他统计模型对所有样本作为一个整体进行统计回归分析, 地理加权回归(GWR)模型可以对空间上的每个点都进行回归分析, 即对每个站点选取一定的带宽, 对该带宽内的数据进行回归分析, 从而得到空间连续分布的回归参数, 可以反映出 PM_{2.5}-AOT 之间关系在空间上的变异^[4, 9, 30~31]. 不少研究表明, GWR 模型与普通线性回归模型相比, 能有效提升 PM_{2.5} 空间预测结果精度^[4, 9]. 卫星遥感监测 PM_{2.5} 浓度的 GWR 模型(地理加权回归模型)如下^[2]:

$$\ln \text{PM}_{2.5}(u_i, v_i) = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) \cdot \ln(\text{AOT}) + \beta_2(u_i, v_i) \cdot \ln(\text{HPBL}) + \beta_3(u_i, v_i) \cdot \ln\left(1 - \frac{\text{RH}}{100}\right) \quad (2)$$

式中, $\beta_d(u_i, v_i)$ 表示为第 $d(d=0, 1, 2, 3)$ 个参数在观测点 (u_i, v_i) 处的系数, 不同地理位置不同变量的回归系数会有一定差异.

本研究基于 MODIS 数据反演 1 km 分辨率的 AOT 产品, 从 WRF 模拟的原始 15 km 分辨率资料

中提取边界层高度和相对湿度数据, 并将空间分辨率重采样为 1 km, 然后与 AOT 产品进行时空匹配, 结合地面观测的每日卫星过境时间 PM_{2.5} 平均浓度, 实现京津冀及周边地区的 2016~2017 年 PM_{2.5} 浓度逐日遥感估算. 在此基础上, 分别以月均、季均、年均等多种时间尺度进行 PM_{2.5} 浓度合成计算, 然后根据地面观测结果对不同时间尺度合成的 PM_{2.5} 遥感结果进行了验证分析, 同时计算统计特征参数以评估 PM_{2.5} 遥感反演结果在多种时间尺度下的精度.

2 结果与讨论

2.1 卫星遥感反演结果验证

基于上述 PM_{2.5} 遥感估算模型, 利用 MODIS 和 WRF 模拟的气象资料对京津冀及周边地区 2016~2017 年每天的 PM_{2.5} 浓度情况进行遥感监测, 并合成计算日均、月均和年均这 3 种时间尺度 PM_{2.5} 遥感产品.

为保证京津冀及周边区域的 PM_{2.5} 遥感反演结果的可靠性, 将 2016 年和 2017 年北京(12 个)、天津(15 个)、山东(100 个)、山西(62 个)、河北(53 个)及河南(75 个)等地共 317 个地面空气质量自动监测站点 PM_{2.5} 结果按照日均、月均和年均这 3 种时间尺度进行合成计算, 并根据监测站点的地理位置, 从京津冀及周边地区 PM_{2.5} 卫星遥感监测分布结果中分别提取与地面站点时空相匹配的 PM_{2.5} 浓度进行相关分析(见图 2~4), 并统计相关参数评估不同时间尺度下 PM_{2.5} 遥感反演结果的可靠性(表 2).

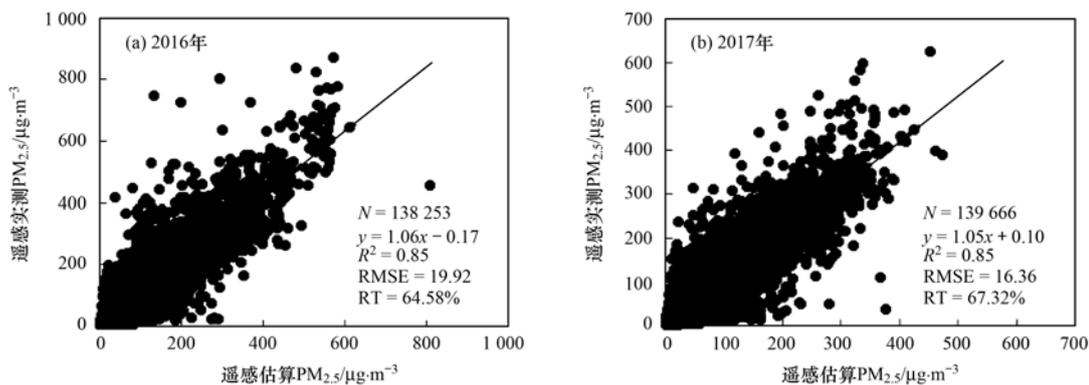


图 2 2016 年和 2017 年 PM_{2.5} 日均遥感估算与地面监测结果对比情况

Fig. 2 Comparison of the daily surface PM_{2.5} concentration between remote sensing data and observations in 2017 and 2016

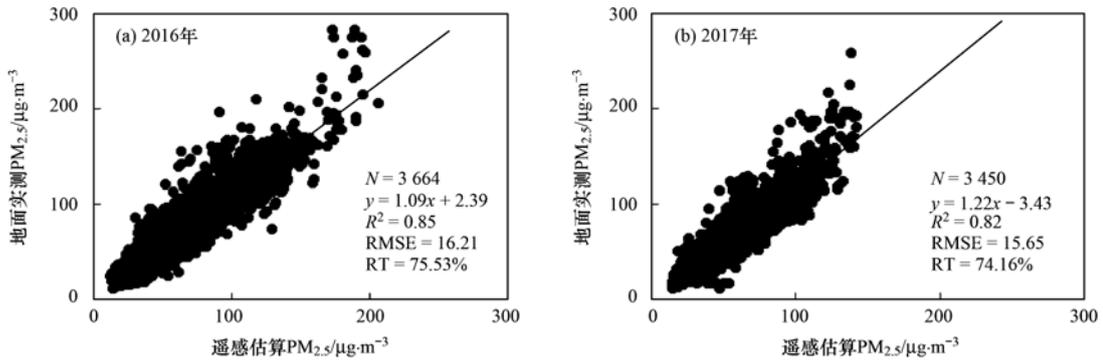


图3 2016年和2017年PM_{2.5}月均遥感估算与地面监测结果对比情况

Fig. 3 Comparison of the monthly surface PM_{2.5} concentration between remote sensing data and observations in 2017 and 2016

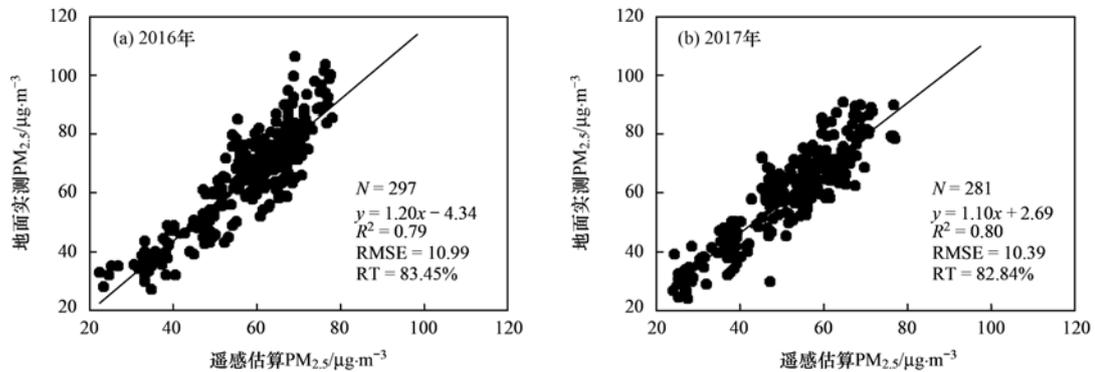


图4 2016年和2017年PM_{2.5}年均浓度遥感估算与地面监测结果对比情况

Fig. 4 Comparison of annual surface PM_{2.5} concentrations between remote sensing data and observations in 2017 and 2016

表2 2017年和2016年PM_{2.5}遥感估算与地面监测相关分析结果

Table 2 Correlation analysis results of the surface PM_{2.5} concentration between remote sensing data and observations in 2017 and 2016

时间尺度	年份	决定系数 (R^2)	斜率	均方根误差 (RMSE) / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对精度 ¹⁾ /%
日均	2016	0.85	1.06	19.92	64.58
	2017	0.85	1.05	16.36	67.32
月均	2016	0.85	1.09	16.21	75.53
	2017	0.82	1.22	15.65	74.16
年均	2016	0.79	1.20	10.99	83.45
	2017	0.80	1.10	10.39	82.84

1) 相对精度 = 1 - (PM_{2.5}拟合均方根误差/PM_{2.5}平均浓度值)

从卫星遥感监测 PM_{2.5} 结果与地面站点监测结果对比情况来看, 总体上本研究中卫星遥感 PM_{2.5} 产品与地面测量结果在日均、月均和年均这3种时间尺度上均表现出较高的相关性, 二者决定系数基本都在0.8以上; 卫星遥感结果略低于地面观测结果, 二者比例系数在1.00~1.22之间; 卫星遥感产品精度总体较好, 均方根误差在10~20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 相对精度均在60%以上. 总体上, 本研究采用的PM_{2.5}遥感反演模型效果较为理想, 根据该模型计算的1 km分辨率PM_{2.5}产品精度能表现京津冀及周边地区的PM_{2.5}时空变化特征, 基本满足对该地区PM_{2.5}时空分布特征分析需要.

从不同时间尺度对比情况分析, 总体上卫星遥

感PM_{2.5}日均浓度产品与地面结果相关性最好(决定系数 R^2 均为0.85), 但与地面观测结果误差相对最大(均方根误差大于11 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 相对精度最低(低于70%); 而卫星遥感PM_{2.5}年均浓度产品虽然与地面结果相关性略低, 但误差最小(均方根误差小于11 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 且相对精度最高(达80%以上). 这主要是因为时间尺度越小, PM_{2.5}时空分布特征的不确定性越大, 数据噪声对卫星遥感反演结果影响也越大, 一般情况下卫星遥感反演结果都存在不同程度的“高值低估、低值高估”的问题^[2], 卫星遥感反演结果的偏差并不是全部都单一为正偏差或者负偏差, 而是二者兼而有之, 因此随着时间尺度的加大, 越接近平均值则误差会越小, 相对精度则

越高。

值得注意的是, 2016 年和 2017 年 MODIS 遥感估算与地面观测线性相关分析结果表明, 同一时间尺度 $PM_{2.5}$ 遥感与地面观测结果的决定系数、均方根误差、相对精度、比例系数、相对精度等各项统计指标均较为接近, 这说明本研究反演的京津冀及周边地区的高分辨率 $PM_{2.5}$ 遥感产品较为稳定, 尽管还存在一定误差, 但可有效反映该地区的 $PM_{2.5}$ 浓度在日、月、年等 3 个时间尺度的空间分布变化特征。

2.2 $PM_{2.5}$ 时空变化特征分析

基于上述 $PM_{2.5}$ 遥感估算模型, 利用 MODIS 和 WRF 模拟的气象资料对京津冀及周边地区 2016 ~ 2017 年每天的 $PM_{2.5}$ 浓度情况进行遥感监测, 并计算日均、月均、季均和年均等多种时间尺度 $PM_{2.5}$ 浓度遥感结果, 考虑到卫星遥感产品的相对精度, 采用月均、季均和年均产品揭示京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布和变化情况。

2.2.1 $PM_{2.5}$ 年平均浓度分布变化

(1) $PM_{2.5}$ 年平均浓度空间分布

2017 年卫星遥感监测结果表明: 京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 年平均浓度主要在 $7 \sim 79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 呈现“北低南高”的区域分布特征。河北北部和山东东部地区的 $PM_{2.5}$ 浓度相对较低, $PM_{2.5}$ 年平均浓度主要在 $22 \sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间; 北京中部和南部、天津大部、河北中部、山西北部、山东东南部、河南西南部等地的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度相对略高, 主要在

$35 \sim 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间; 河北南部、山西中部和南部、河南中部和北部、山东西部等地的 $PM_{2.5}$ 浓度相对较高, $PM_{2.5}$ 年平均浓度主要在 $50 \sim 79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间。 $PM_{2.5}$ 浓度高值区主要分布在河北南部、河南北部、山西西南部等地, 该地区的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度主要在 $60 \sim 70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 其中山西西南部的临汾中部地区的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度超过 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 2017 年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 年平均浓度分布如图 5 所示。

2016 年卫星遥感监测结果表明: 京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 年平均浓度主要在 $19 \sim 89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 呈现“北低南高”的区域分布特征。河北北部、山东东部等地的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度相对较低, 主要在 $19 \sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 北京西部和北部、河北中北部、山西中部和北部、山东东部等地的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度相对略高, 主要在 $35 \sim 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间; 北京中部和南部、天津大部、河北中部和南部、山东中部和西部、河南大部、山西南部等地的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度相对较高, 主要在 $50 \sim 89 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间。 $PM_{2.5}$ 浓度高值区主要分布在北京中南部、天津南部、河北南部、河南中部和北部、山西西南部、山东西部等地, 该地区的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度主要在 $60 \sim 70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 其中保定中部、石家庄中南部、邯郸中北部、安阳中部、鹤壁中部、新乡西部及聊城中部等局部地区的 $PM_{2.5}$ 年平均浓度超过 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

(2) $PM_{2.5}$ 年平均浓度空间分布变化统计分析

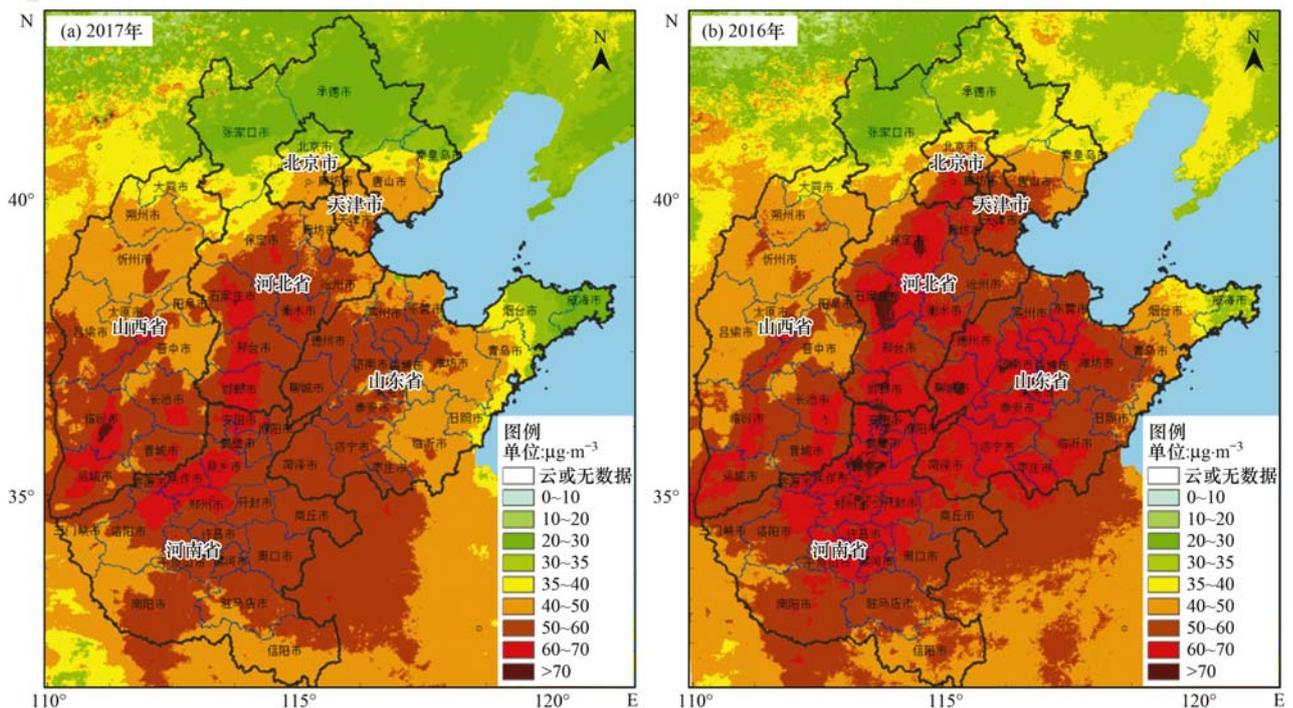


图 5 2017 年和 2016 年京津冀及周边区域 $PM_{2.5}$ 年均浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the annual mean $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions in 2017 and 2016

根据卫星遥感监测结果分别统计 2017 年和 2016 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 年平均浓度, 统计结果显示: 2017 年和 2016 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 年平均浓度分别为 47.5、52.3 μg·m⁻³. 与 2016 年相比, 2017 年京津冀地区 PM_{2.5} 年平均浓度总体降低了 4.8 μg·m⁻³, 降低 9.2%.

将 2017 年与 2016 年的京津冀及周边地区 PM_{2.5} 年均浓度进行差值计算并渲染制图(如图 6), 结果表明: 与 2016 年相比, 2017 年北京中部和南部、天津西部、河北中部及山东中部和西部等地的 PM_{2.5} 浓度降幅最大, 下降了 10 μg·m⁻³ 以上; 北京北部和西部、天津东部、河北北部和中南部、山东大部、河南中部等地的 PM_{2.5} 浓度降幅其次, 下降了 5 ~ 10 μg·m⁻³; 河北东南部、山西东部等地 PM_{2.5} 浓度有所上升, 升幅不超过 10 μg·m⁻³; 其他地区变化幅度较小.

根据京津冀及周边地区 PM_{2.5} 年平均浓度卫星遥感监测结果分别统计 2017 年和 2016 年不同省市的区域平均浓度值. 统计结果显示: 2017 年京津冀及周边地区中河南地区的 PM_{2.5} 区域年平均浓度最高, 为 53.4 μg·m⁻³; 山西、山东、天津、河北其次, PM_{2.5} 区域年平均浓度分别为 49.6、47.1、46.3、41.9 μg·m⁻³; 北京 PM_{2.5} 区域年平均浓度最低, 为 38.5 μg·m⁻³. 与 2016 年相比, 2017 年各省市的 PM_{2.5} 区域年平均浓度均有不同幅度的下降, 其中北京地区的降幅最大, 为 20.1%; 山东、天津等地降幅其次, 分别为 16.5% 和 16.2%; 河北、河南等地的 PM_{2.5} 区域年平均浓度降幅较小, 分别为 9.97% 和 7.35%, 而山西地区的 PM_{2.5} 区域年平均浓度变化很小, 与去年基本持平. 2016 ~ 2017 年京津冀及周边地区各省市 PM_{2.5} 区域年平均浓度统计结果见图 7.

2.2.2 PM_{2.5} 季平均浓度时间变化

(1) PM_{2.5} 季平均浓度变化分析

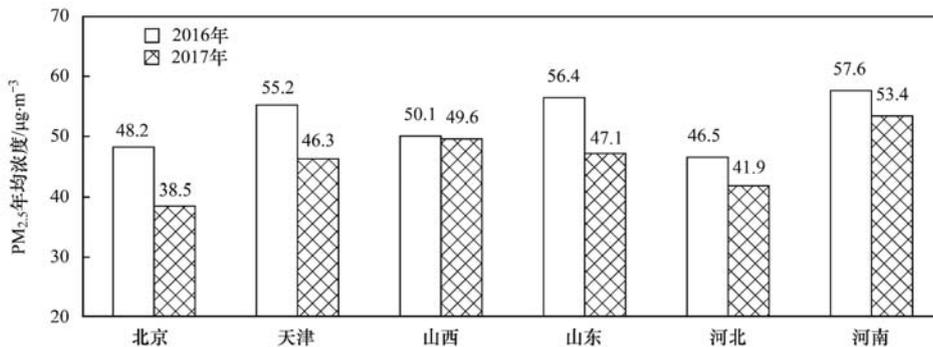


图 7 2016 年和 2017 年京津冀及周边地区各省市 PM_{2.5} 年平均浓度统计结果

Fig. 7 Comparison of annual average PM_{2.5} concentrations in cities and provinces of Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions in 2016 and 2017

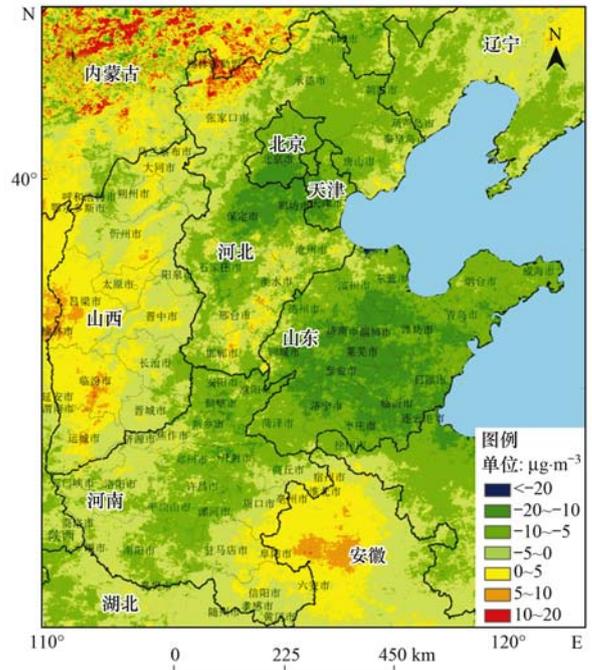


图 6 2017 年与 2016 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 月均浓度差值分布

Fig. 6 Spatial distribution of the difference between annual PM_{2.5} concentrations in 2017 and 2016 in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions

为研究京津冀及周边地区 PM_{2.5} 浓度季节时空变化特征, 利用卫星遥感反演的 PM_{2.5} 日浓度产品分别合成计算 2016 ~ 2017 年京津冀及周边地区春季(3 ~ 5 月)、夏季(6 ~ 8 月)、秋季(9 ~ 11 月)和冬季(12 月 ~ 次年 2 月)这 4 个季节的 PM_{2.5} 浓度结果, 其空间分布如图 8.

从图 8 中可以看出, 2016 ~ 2017 年京津冀及周边地区不同季节 PM_{2.5} 季平均浓度空间分布格局变化不大, 总体上均呈现“南高北低”的空间分布特征, 相对高值区主要分布在燕山以南和太行山以东及山西西南部等地. 与 2016 年相比, 除夏季以外其他三季 PM_{2.5} 季平均浓度高值区范围均有所缩小, 秋季和冬季北京中南部、天津南部、河北南部、河

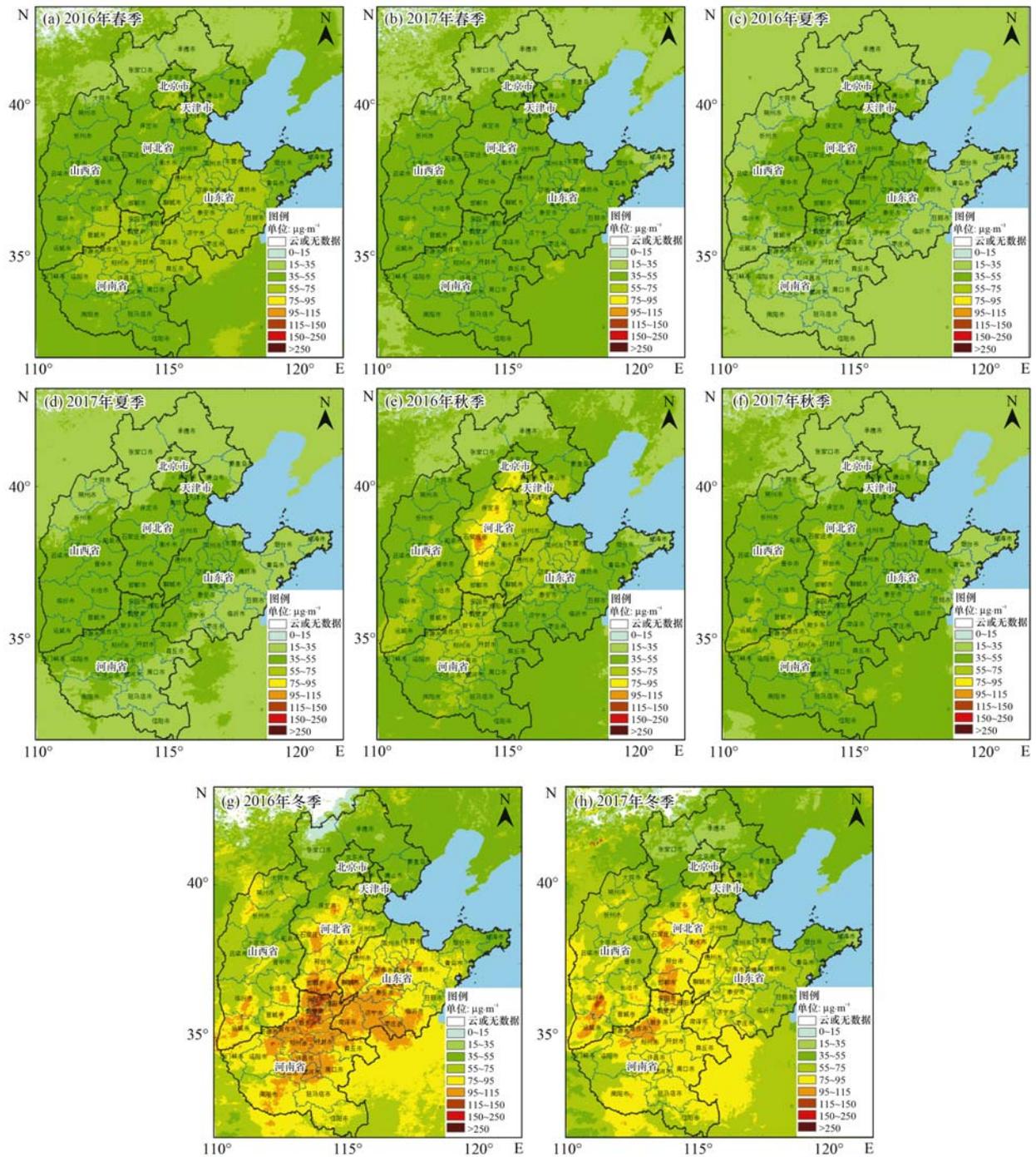


图 8 2016 年和 2017 年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 季平均浓度分布

Fig. 8 Distribution of the seasonal average $PM_{2.5}$ concentration in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions in 2017 and 2016

南北部、山东西部、山西南部等地 $PM_{2.5}$ 浓度下降较为明显,这与京津冀及周边地区 2017~2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动巡查^[8]区域(“2+26”城市)较为吻合。

(2) $PM_{2.5}$ 季平均浓度变化统计分析

统计 2016~2017 年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 季平均浓度,总体上 $PM_{2.5}$ 浓度呈现较为明显的季节变化特征(见图 9)。2017 年京津冀及周边地区冬季 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别约为 $68.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,显著高于其他 3 个季节,这可能是因为冬季气温低,一方面燃

煤采暖加大了污染物排放,一方面空气层结稳定、混合层高度低,不利于污染物的扩散和稀释,容易引起重污染天气;秋季和春季其次, $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为 $43.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $42.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这可能与秋季秸秆焚烧以及春季沙尘天气影响有关;夏季 $PM_{2.5}$ 平均浓度最低,约为 $35.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这主要是因为夏季大气温度和湿度较高,边界层高度较高有利于污染物扩散,且降雨较多有利于污染物清除。

与 2016 年相比,2017 年秋季和春季的 $PM_{2.5}$ 平均浓度降幅最高,分别为 16.7% 和 14.4%;冬季降

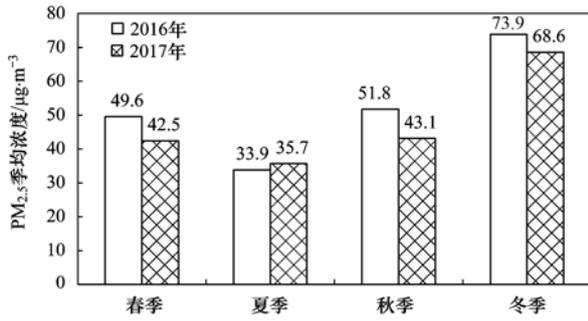


图9 2016~2017年京津冀及周边地区PM_{2.5}季平均浓度变化

Fig. 9 Change of the seasonal average PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions in 2017 and 2016

幅其次,为7.2%,这可能和2017年第一季度空气质量专项督查^[11]和京津冀及周边地区2017~2018

年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动巡查^[12]有关,环保督查行动能有效督促大气污染防治行动的落实,减少了污染排放行为;夏季PM_{2.5}平均浓度略有上升,升幅为5.3%.

统计2016~2017年京津冀地区各省市的PM_{2.5}季平均浓度(见图10),总体上2017年各省市PM_{2.5}浓度呈现出“冬季>秋季≈春季>夏季”的季节变化特征.与2016年同期相比,2017年北京、天津和河北等地的秋季PM_{2.5}浓度降幅最大,分别为42.8%、38.3%和27.8%,这可能和京津冀及周边地区2017~2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动巡查主要集中在该区域有关;2017年河南、山西等地夏季PM_{2.5}浓度升幅最大,分别为14.4%和11.0%.

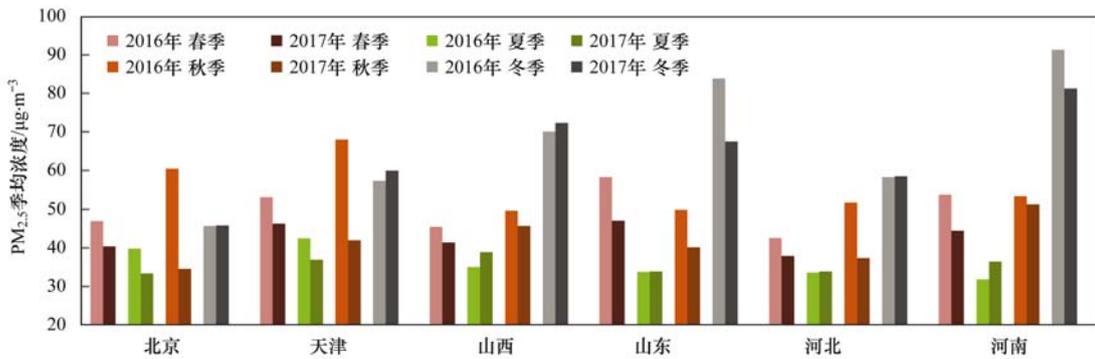


图10 2016-2017年京津冀及周边地区各省市PM_{2.5}季平均浓度变化

Fig. 10 Change of the seasonal average PM_{2.5} concentration in cities and provinces in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions in 2017 and 2016

2.2.3 PM_{2.5}月平均浓度时间变化

(1) PM_{2.5}月平均浓度变化分析

统计2016年1月~2017年12月京津冀及周边地区区域及各省市PM_{2.5}月平均浓度,总体上呈“波动下降”趋势(见图11).2016年12月京津冀及周边地区区域PM_{2.5}月平均浓度最高,2016年8月最低.

从各省市PM_{2.5}月平均浓度变化来看,2016年11月北京地区的PM_{2.5}月平均浓度最高,2017年8月最低;2016年12月天津地区的PM_{2.5}月平均浓度最高,2017年8月最低;2016年12月山西、山东、河北和河南等地的PM_{2.5}月平均浓度最高,2016年8月最低.

与2016年同期相比,2017年11~12月京津冀

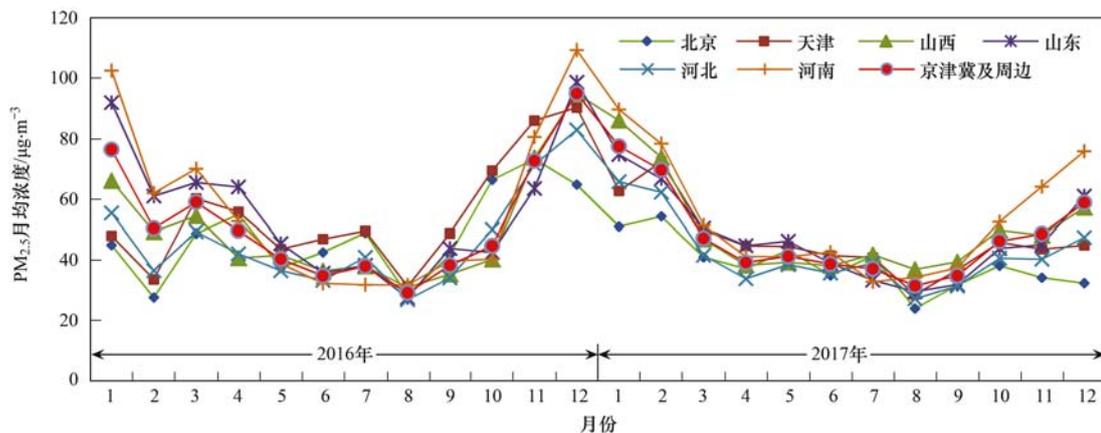


图11 2016~2017年京津冀及周边地区各省市PM_{2.5}月平均浓度变化

Fig. 11 Change of the monthly average PM_{2.5} concentration in cities and provinces in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding regions in 2017 and 2016

及周边地区 $PM_{2.5}$ 月均浓度降幅最大, 降幅超过 30%, 这可能与京津冀及周边地区 2017 ~ 2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动巡查(2017 年 9 月 15 日 ~ 2018 年 1 月 4 日)有关; 2017 年 3 ~ 4 月降幅其次, 降幅在 20% ~ 22% 之间. 这和 2017 年第一季度空气质量专项督查(2017 年 2 月 15 日 ~ 3 月 18 日)行动在时间上也有一定吻合.

3 结论

(1) 本研究基于地理加权回归算法模型利用 MODIS 数据反演的京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度结果总体上效果较为理想, 与地面测量结果在日均、月均和年均这 3 种时间尺度上均表现出较高的相关性、一致性和稳定性. 不同时间尺度的 $PM_{2.5}$ 浓度与地面相关分析结果存在一定差异, 总体上时间尺度越大, 遥感估算的 $PM_{2.5}$ 浓度结果均方根误差越小、相对精度越高, 但同一时间尺度遥感与地面观测的决定系数、均方根误差、比例系数、相对精度等各项统计指标均较为接近.

(2) 利用卫星遥感监测结果可有效揭示大范围区域的 $PM_{2.5}$ 分布时空分布特征, 2016 年与 2017 年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 空间分布和季节变化特征比较类似, 空间分布呈现“南高北低”的趋势, 即河北北部及山东东部地区 $PM_{2.5}$ 浓度相对较低, 河北南部、河南北部及山西南部等地相对较高; 季节变化呈现“冬季 > 秋季 ~ 春季 > 夏季”的特征.

(3) 结合稳定的 $PM_{2.5}$ 遥感反演模型和卫星遥感资料能较好地揭示京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 时空变化规律, 与 2016 年相比, 一方面 2017 年区域 $PM_{2.5}$ 平均浓度较 2016 年下降约 9.2%, 且 $PM_{2.5}$ 高值区范围明显减小, 其中北京降幅最大, 山西降幅最小. 另一方面, 2017 年秋季和春季降幅最大, 其中北京、天津和河北等地的秋季 $PM_{2.5}$ 浓度降幅较为显著; 夏季略有上升, 其中河南、山西等地夏季 $PM_{2.5}$ 浓度升幅较为显著. $PM_{2.5}$ 浓度高值一般发生在 11 月和 12 月, $PM_{2.5}$ 浓度低值一般发生在 8 月.

(4) 通过对比京津冀及周边地区 2017 年与 2016 年 $PM_{2.5}$ 浓度变化情况, 研究发现降幅较大的时段和地区与 2017 年的大气污染综合治理攻坚行动巡查和空气质量专项督查活动密切相关, 这也初步说明了环保督查行动能有效督促大气污染防治行动的落实, 减少污染排放行为, 从而改善空气质量.

致谢: NASA 官网为本研究提供了 MODIS 数据, 中国环境监测总站提供地面环境空气质量观测数据, 在此一并致谢.

参考文献:

- [1] 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 等. 基于多源数据的 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布预测与制图[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 4913-4923.
Xiao L, Lang Y C, Xia L, et al. Space-time estimations and mapping of $PM_{2.5}$ fine particulates based on multi-source data [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 4913-4923.
- [2] 郝静, 孙成, 郭兴宇, 等. 京津冀内陆平原区 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化定量模拟[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1455-1465.
Hao J, Sun C, Guo X Y, et al. Simulation of the spatio-temporally resolved $PM_{2.5}$ aerosol mass concentration over the inland plain of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1455-1465.
- [3] 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.
- [4] 陈辉, 厉青, 张玉环, 等. 基于地理加权模型的我国冬季 $PM_{2.5}$ 遥感估算方法研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2142-2151.
Chen H, Li Q, Zhang Y H, et al. Estimations of $PM_{2.5}$ concentrations based on the method of geographically weighted regression [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2142-2151.
- [5] 薛文博, 武卫玲, 许艳玲, 等. 基于 WRF 模型与气溶胶光学厚度的 $PM_{2.5}$ 近地面浓度卫星反演[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(12): 1751-1758.
Xue W B, Wu W L, Xu Y L, et al. Satellite retrieval of near-surface $PM_{2.5}$ based on WRF model and aerosol optical depth [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(12): 1751-1758.
- [6] 徐建辉, 江洪. 长江三角洲 $PM_{2.5}$ 质量浓度遥感估算与时空分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3119-3127.
Xu J H, Jiang H. Estimation of $PM_{2.5}$ concentration over the Yangtze Delta using remote sensing: analysis of spatial and temporal variations [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3119-3127.
- [7] Xiao L, Lang Y C, Christakos G. High-resolution spatiotemporal mapping of $PM_{2.5}$ concentrations at Mainland China using a combined BME-GWR technique [J]. Atmospheric Environment, 2018, **173**: 295-305.
- [8] Wu J S, Yao F, Li W F, et al. VIIRS-based remote sensing estimation of ground-level $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing-Tianjin-Hebei: a spatiotemporal statistical model [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, **184**: 316-328.
- [9] 马宗伟. 基于卫星遥感的我国 $PM_{2.5}$ 时空分布研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
Ma Z W. Study on spatiotemporal distributions of $PM_{2.5}$ in China using satellite remote sensing [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [10] 谢杨, 戴瀚程, 花冈达也, 等. $PM_{2.5}$ 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, **26**(11): 19-27.
Xie Y, Dai H C, Hanaoka T, et al. Health and economic impacts of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. China Population Resources and Environment, 2016, **26**(11): 19-27.
- [11] 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 关于印发《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》的通知 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/g/kml/hhb/bwj/201309/t20130918_260414.htm, 2013-09-17.
- [12] 环境保护部. 环境保护部组织开展 2017 年第一季度空气质

- 量专项督查[EB/OL]. http://www.mep.gov.cn/g/kml/hbb/qt/201702/t20170214_395837.htm, 2017-02-14.
- [13] 环境保护部, 北京市人民政府, 天津市人民政府, 等. 关于开展京津冀及周边地区2017-2018年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动巡查工作的通知[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/g/kml/hbb/bwj/201708/t20170831_420710.htm, 2017-08-28.
- [14] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(3): 675-686.
- [15] 刘佳, 王利民, 杨玲波, 等. 基于6S模型的GF-1卫星影像大气校正及效果[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(19): 159-168.
- Liu J, Wang L M, Yang L B, *et al.* GF-1 satellite image atmospheric correction based on 6S model and its effect[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(19): 159-168.
- [16] 陈健, 周杰, 李雅雯. 基于静止卫星GOCI数据的陆地上空气溶胶光学厚度遥感反演[J]. *遥感技术与应用*, 2017, **32**(6): 1040-1047.
- Chen J, Zhou J, Li Y W. Retrieving aerosol optical depth over land based on GOCI data onboard geostationary satellite[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, **32**(6): 1040-1047.
- [17] 王中挺, 辛金元, 贾松林, 等. 利用暗目标法从高分一号卫星16 m相机数据反演气溶胶光学厚度[J]. *遥感学报*, 2015, **19**(3): 530-538.
- Wang Z T, Xin J Y, Jia S L, *et al.* Retrieval of AOD from GF-1 16 m camera via DDV algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, **19**(3): 530-538.
- [18] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(11): 2989-3034.
- [19] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* Second-generation operational algorithm; retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(13): D13211.
- [20] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D14): 17051-17067.
- [21] Hus C N, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: the second generation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(16): 9296-9315.
- [22] Hsu C N, Tsay S C, King M D, *et al.* Aerosol properties over bright-reflecting source regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(3): 557-569.
- [23] Hsu C N, Tsay S C, King M D, *et al.* Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(11): 3180-3195.
- [24] Bilal M, Nichol J E, Nazeer M. Validation of Aqua-MODIS C051 and C006 operational aerosol products using AERONET measurements over Pakistan[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(5): 2074-2080.
- [25] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. *地球科学进展*, 2011, **26**(11): 1191-1199.
- Wang X J, Ma H. Progress of application of the weather research and forecast (WRF) model in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, **26**(11): 1191-1199.
- [26] 石春娥, 李耀孙, 杨军, 等. MM5和WRF对中国东部地区冬季边界层模拟效果比较[J]. *高原气象*, 2015, **34**(2): 389-400.
- Shi C E, Li Y S, Yang J, *et al.* Comparison of simulations on winter sounding profiles in PBL in East China between WRF and MM5[J]. *Plateau Meteorology*, 2015, **34**(2): 389-400.
- [27] 王丽霞, 王颖, 赖锡柳, 等. WRF模式不同边界层参数化方案模拟兰州冬季边界层高度的研究[J]. *高原气象*, 2017, **36**(1): 162-172.
- Wang L X, Wang Y, Lai X L, *et al.* Study on the simulation of boundary layer height in Lanzhou in winter using WRF model with different boundary layer parameterization schemes[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, **36**(1): 162-172.
- [28] 赵世强, 张镭, 王治厅, 等. 利用激光雷达结合数值模式估算兰州远郊榆中地区夏季边界层高度[J]. *气候与环境研究*, 2012, **17**(5): 523-531.
- Zhao S Q, Zhang L, Wang Z T, *et al.* Boundary layer height estimate in summer over the Lanzhou suburb in the Yuzhong area using lidar measurement and numerical model[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, **17**(5): 523-531.
- [29] 汪明军. 基于WRF模式的长三角地区风能资源评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [30] Hu X F, Waller L A, Al-Hamdan M Z, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern U. S. using geographically weighted regression[J]. *Environmental Research*, 2013, **121**: 1-10.
- [31] Ma Z W, Hu X F, Huang L, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} in China using satellite remote sensing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(13): 7436-7444.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)