

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.03.003

“五基”协同大气环境立体遥感监测系统应用研究

张丽娟¹, 杨艺¹, 张建辉¹, 赵爱梅¹, 左辛利², 锡林哈斯², 额定敖其尔²,
翁国庆¹, 毛慧琴¹, 陈辉¹, 陈琳涵¹, 赵少华¹, 王中挺¹, 刘诚³,
张天舒⁴, 陶明辉⁵, 赖积保⁶, 马鹏飞^{1*}, 高吉喜^{1*}

(1 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

2 鄂尔多斯市生态环境局鄂托克旗分局, 内蒙古 鄂尔多斯 016100;

3 中国科学技术大学工程科学学院, 安徽 合肥 230026;

4 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

5 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074;

6 国家航天局对地观测与数据中心成果转化部, 北京 100101)

摘要: “五基”协同天空地一体化生态环境立体遥感监测体系, 是一种综合天基卫星、空基遥感、航空无人机、移动巡逻监测车和地面观测五种技术手段为一体的监测体系。“五基”协同大气环境立体遥感监测系统是该体系的重要组成部分, 其核心是运用协同联动机制和技术方法, 构建数据协同融合的核心算法模型, 以期弥补常规遥感手段在监测时效、精度、周期等方面的短板。以棋盘井工业园区为示范区域, 重点介绍了“五基”协同监测体系中五种不同技术手段的组成架构, 展示了多技术手段协同监测以及应用分析成效, 并讨论了该协同监测体系在解决大气污染防治工作关键技术问题上的效果。通过“五基”协同联动、多源数据融合, 获得了本地污染排放特征及区域污染物传输的量化贡献, 实现精准溯源及执法, 最终形成针对性的大气污染全面治理方案建议, 有效支撑了当地大气污染防治工作。

关键词: “五基”协同; 大气环境监测系统; 立体遥感

中图分类号: P412.2; P236

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)03-214-013

Research on the application of stereoscopic remote sensing monitoring system based on multilevel platform collaboration for atmospheric environment

ZHANG Lijuan¹, YANG Yi¹, ZHANG Jianhui¹, ZHAO Aimei¹, ZUO Xinli², Xilinhasi², Edingaoqier², WENG Guoqing¹, MAO Huiqin¹, CHEN Hui¹, CHEN Linhan¹, ZHAO Shaohua¹, WANG Zhongting¹, LIU Cheng³, ZHANG Tianshu⁴, TAO Minghu⁵, LAI Jibao⁶, MA Pengfei^{1*}, GAO Jixi^{1*}

(1 Satellite Environment Application Center of Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;

2 Ordos Municipal Ecology and Environment Bureau, Ordos 016100, China;

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3700104), 政府间国际科技创新合作重点专项(2021YFE0117100)

作者简介: 张丽娟(1984-), 女, 四川绵阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事大气遥感监测方面的研究。E-mail: zlj13021@126.com

收稿日期: 2022-12-04; 修改日期: 2022-12-24

*通信作者。E-mail: mpf136@163.com; gjx@nies.org

3 School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

4 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

5 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

6 Earth Observation System and Data Center, China National Space Administration, Department of Achievement Transformation, Beijing 100101, China)

Abstract: Stereoscopic remote sensing monitoring system based on multilevel platform collaboration is a monitoring system including space-based satellite, space-based remote sensing, aerial drones, mobile patrol monitoring vehicles and ground observation. The core of the system is to use the collaborative linkage mechanism and technical method to build the core algorithm model of data fusion, in order to make up for the shortcomings of conventional single remote sensing means in terms of monitoring time, accuracy and periodicity. The core meaning and application of stereoscopic remote sensing monitoring system based on multilevel platform collaboration for atmospheric environment are elaborated here, and the application results of the system for atmospheric environment are shown by taking the Qipanjiang Industrial Park (Erdsos, China) as an example. It is shown that the system is helpful for finding out the characteristics of local pollution emissions and quantifying regional pollutant transmission contributions, achieving accurate source tracing and law enforcement, and finally forming a targeted comprehensive air pollution control proposal, which will effectively support the local air pollution prevention work.

Key words: multilevel platform; atmospheric environmental monitoring system; stereoscopic remote sensing

0 引言

2015年7月26日,国务院办公厅印发《生态环境监测网络建设方案》,要求建设“天地一体”的生态环境监测网络。2017年9月21日,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于深化环境监测改革提高环境监测数据质量的意见》,要求强化高新技术应用,加强大数据、人工智能、卫星遥感等高新技术在环境监测和质量管理中的应用。2020年5月,生态环境部印发《关于推进生态环境监测体系与监测能力现代化的若干意见》,要求建成陆海统筹、天地一体、上下协同、信息共享的生态环境监测网络。近年来,国内外研究人员利用卫星遥感、无人机、走航观测、地基观测等多种手段对不同区域的大气环境进行了强化观测分析。如Zhang等^[1]采用国产GF-1卫星数据实现城市高分辨率气溶胶光学厚度(AOD)及颗粒物遥感监测,为城市大气环境精细化监测提供了参考;Tan等^[2]利用无人机搭载紫外光谱仪对武安市工业企业研究区进行数据采集,使用差分吸收光谱法反演SO₂气体浓度,根据无人机飞行轨迹生成浓度空间分布图,并分析了浓度扩散趋势、范围及排污位置与扩散的关系;Huang等^[3,4]、沈兰兰等^[5]采用车载被动差分光学吸收光谱(DOAS)测量方法,对城市典型工业点源和面源以及工业园区的排放通量进行了遥测分析,指出风速不确定性对工业面源的NO_x和SO₂排放测量误差影响较大;张强等^[6]采用地基紫外光谱扫描成像系统对上海某地化工区火炬排口和烟囱等开展了基于被动I-DOAS技术并结合二维插值算法的污染物分布遥测研究,对烟羽污染物扩散进行快速扫描成像。经过多年的实践与探索,我国已经初步形成了一套相对完整、科学的遥感监测技术体系。

随着新时期中国生态文明建设的不断发展,遥感逐渐成为生态环境监测不可或缺的技术手段^[7,8]。生态环境部近期下发的《生态环境监测规划纲要(2020—2035)》中要求不断推进遥感技术的应用,构建全天时、全天候、全尺度、全谱段、全要素的卫星遥感观测网络体系,形成高时间分辨率、高空间分辨率、高光谱分辨率、高辐射分辨率、高监测精度的生态环境遥感服务能力^[9]。然而与当前生态环境保护监管需求相比,现代遥感技术在该领域的应用仍然存在较大局限性。一是高时空分辨率共存的矛盾仍然存在。在现有卫星传感器的硬件技术条件和卫星发射成本的限制下,空间分辨率的提高多以牺牲卫星传感器在时间分辨率、扫描幅宽等其他方面的优势来实现,使得多属性高分辨率的遥感影像获取仍然存在较大困难,无法满足高时空分辨率大气环境遥感监测的需求^[10]。二是有效数据少。现阶段我国的卫星遥感数据面临着“又多又少”的问题^[11],即卫星遥感数据源越来越多,但受云层覆盖、重访周期等因素影响^[12],真正能被使用的有效数据却很少,这在很大程度上影响了对大气环境快速变化的监测和研究,特别是对突发大气环境事件的应急响应监测,有效数据获取问题尤为突出^[13]。三是垂直观测能力不足。常规的卫星遥感只能提供二维平面空间上的信息,但污染物在垂直方向上的分布并不均匀,且高空污染物可通过大气垂直交换影响近地面浓度,因此,垂直观测对于全面认识大气污染必不可少^[14]。四是多基协同和数据融合能力不足^[15]。随着传感器种类和数量的日益丰富,多波段、多尺度的遥感数据源源不断地产生,但如何实现多基协同和多源遥感数据有效融合,从中挖掘出有效信息,形成多种手段、多源数据的协同监测应用能力尚有不足^[16]。

面对传统卫星遥感监测手段的不足,立足于现代大气环境遥感监测场景,为实现大气环境监测的“高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率、全天候、全天时、全谱段的目标”,创新性提出了一种综合天基卫星、空基遥感、航空无人机、移动巡护监测车和地面观测五种手段为一体的“五基”协同天空地一体化生态环境立体遥感监测体系(以下简称“五基”协同监测体系)，“五基”协同大气环境立体遥感监测系统(以下简称“五基”协同大气监测系统)是该体系的重要组成部分^[17,18]。并以鄂尔多斯市的棋盘井工业园区为试验区域,集成多种光学遥感传感器,通过在数据、算法、产品和成果应用等方面的改进提升,构建“五基”协同监管平台,融合多种手段监测数据,有效弥补常规遥感手段在监测时效、精度、周期等方面的不足。

1 研究区域与数据方法

1.1 棋盘井工业园区概况

棋盘井工业园区位于鄂尔多斯市最西端,于2001年经内蒙古自治区人民政府批准建设,2003年正式运行,总人口8.2万,规划总面积85平方千米,现建成23平方千米。园区现有企业101家,其中规模以上企业55家,已形成煤炭、电力、冶金、化工四大主导产业。该区域大气结构性污染问题突出、交叉污染严重、排放叠加效应明显,污染防治任务艰巨。

本研究以棋盘井工业园区为试点开展“五基”协同监测,以期为研究和突破“五基”协同关键技术、推动“五基”协同监测体系落地应用提供参考。

1.2 “五基”协同监测系统数据采集分析

本研究在传统监测技术基础上,引入了天基卫星、空基遥感等多源数据融合监测分析手段,有效弥补了天基卫星的“短板”,同时也是对天基卫星数据真实性的有效检验。

1.2.1 天基卫星遥感

充分利用天基卫星遥感的监测范围大、动态连续、客观不受限制等技术优势,本研究以目前应用较为广泛的中分辨率MODIS卫星探测数据,对试验区及周边地区的气溶胶和颗粒物时空分布进行连续动态观测,以多角度大气校正方法^[19]反演获取AOD,采用地理加权回归方法获取区域大气颗粒物浓度^[20,21]。

1.2.2 空基遥感

空基遥感即指将颗粒物和VOCs监测设备落地高塔或高层建筑楼顶,可对工业园区的大气气溶胶、气态污染物进行长期“蹲点式”的全天候连续观测。其中,颗粒物激光雷达可有效区分硬目标与颗粒物、水汽、沙尘与雾、煤烟与工地扬尘等探测目标,并对这些探测目标进行定量分析,具有高时空分辨率、高探测精度和连续探测等优点,能够准确全面掌握园区大气污染状况。

1.2.3 移动巡护监测车

2022年9月3—6日,基于“星地协同生态环境移动监测平台”,搭载颗粒物激光雷达、气态污染物监测设备等仪器,通过移动监测、驻点监测、背包巡测和现场调查等方式,对棋盘井工业园区及其东部、北部矿区开展了走航监测,并于夜间对鄂托克旗与乌海市交界矿区、乌海市代表性工业园区开展走航监测,获取到气溶胶、颗粒物、NO₂、SO₂、CO以及HCHO等30余种VOCs污染成分的垂直柱浓度,以动态跟踪排查污染源并分析大气污染物高空传输特征。

1.2.4 空基遥感辅助设备

针对区域传输和本地污染,围绕细颗粒物和臭氧协同控制,目前在棋盘井园区已建立了20个空基遥感辅助站点,其空间分布图如图1所示。监测指标主要包括PM_{2.5}和PM₁₀,可以连续监测大气中空气污染物浓度和温湿度等参数。

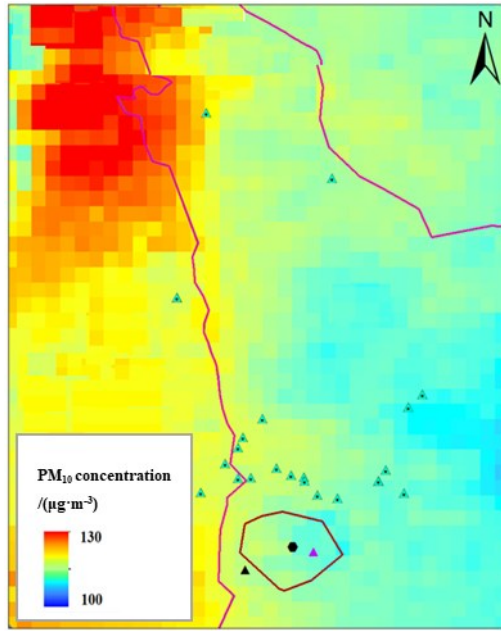
1.2.5 多源数据融合

融合天基卫星、空基遥感及其他辅助数据,建立传统机器学习和深度学习相结合的小区域尺度的多源数据精细化融合模型,具体方法为:1)将“五基”设备从固定点监测拓展到面监测,将利用天基卫星获取气态污染物柱浓度观测数据的频次由每天1次提高到每小时1次,进而获取高时空分辨率的近地面大气污染物浓度产品;2)利用融合产品开展天基卫星的真实性检验,定量评估各类大气卫星遥感监测产品的准确度和稳定性,进一步反向促进国产卫星大气载荷的发展,助力遥感科学进步。

2 “五基”协同监测系统应用分析

2.1 天基卫星协同地基定量分析区域传输

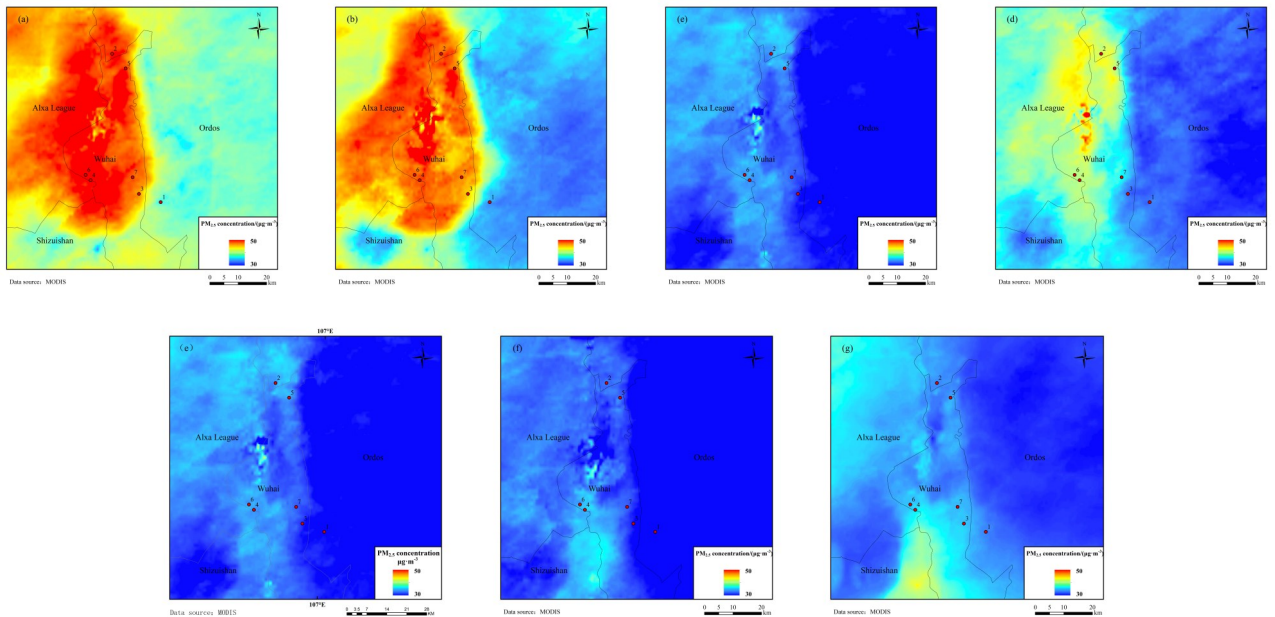
根据天基卫星历年监测结果看,2015—2021年,棋盘井及周边工业园区总体上PM_{2.5}浓度呈逐年下降趋势(图2),特别是2019年以来工业园年均PM_{2.5}浓度逐步接近国家环境空气质量标准及以下水平,大气污染治理成效显著。棋盘井及周边7个工业园区2015—2021年PM_{2.5}平均浓度的统计结果显示,棋盘井工业园区PM_{2.5}浓度相对最低,7年PM_{2.5}平均浓度低于33 μg/m³,特别是2019年以来降低至30 μg/m³以下;乌斯太和乌达工业园区PM_{2.5}浓度相对最高,7年PM_{2.5}平均浓度超过40 μg/m³。近3年棋盘井及周边工业园区PM_{2.5}平均浓度在35 μg/m³以上,在园区西部、西北部和西南部存在颗粒物高浓度污染带。而从历年的气象数据看,该区域盛行西北风。



注: ▲-空基遥感辅助设备; ▲-空基遥感-量子激光雷达; ●-空基遥感-VOCs 监测仪; ▲-空基遥感-激光雷达垂直扫描

图 1 2021 年棋盘井工业园区 PM₁₀ 浓度分布及空基遥感布设情况

Fig. 1 Distribution of PM₁₀ concentration in Qipanjing Industrial Park in 2021 and location of space-based remote sensing instruments



注: 红色圆点为工业园区: 1 棋盘井工业园区; 2 蒙西工业园; 3 西来峰工业园区; 4 乌斯太工业园区; 5 海勃湾工业园区; 6 乌达工业园区; 7 海南工业园

图 2 2015—2021 年棋盘井及周边工业园区 PM_{2.5} 浓度分布图。(a) 2015 年; (b) 2016 年; (c) 2017 年; (d) 2018 年; (e) 2019 年; (f) 2020 年; (g) 2021 年

Fig. 2 Distribution of PM_{2.5} concentration in Qipanjing Industrial Park and its surrounding areas from 2015 to 2021. (a) 2015; (b) 2016; (c) 2017; (d) 2018; (e) 2019; (f) 2020; (g) 2021

开展天基卫星尺度的区域污染传输定量评估。1) 从工业园区所在区域中提取出 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的浓度数据, 并分别计算出月平均值; 2) 获取棋盘井园区附近的乌海市某月的历史逐日气象数据中的风向数据, 用角度定义风向, 西北风为 $292.5^\circ \sim 337.5^\circ$, 北风为 $337.5^\circ \sim 22.5^\circ$, 西风为 $247.5^\circ \sim 292.5^\circ$, 东南风为 $112.5^\circ \sim 157.5^\circ$, 南风为 $157.5^\circ \sim 202.5^\circ$, 分别计算盛行西北风、北风、西风、南风和东南风天数在当月的占比; 3) 将步骤 2) 所得结果进行距离加权平均, 即可计算得出周边污染源向研究区域的污染物扩散影响, 即扩散贡献率。区域传输浓度即为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度与扩散贡献率的乘积。

以 2022 年 9 月为例, 周边污染源对棋盘井工业园区污染物传输贡献的计算结果见表 1。结果表明: 乌海市区污染物对下风向棋盘井工业园区 PM_{10} 的传输贡献约为 13.94%, $PM_{2.5}$ 的传输贡献约为 17.43%; 海南区在西风作用下对棋盘井工业园区 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 传输贡献率分别为 6.08%、4.89%。

表 1 周边污染源对棋盘井工业园区的污染物传输贡献

Table.1 Contribution of surrounding pollution sources to pollutant transmission in Qipanjing Industrial Park

年月	污染物类型	月均浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	乌海市区对棋盘井的传输贡献		海南区对棋盘井的传输贡献	
			区域传输浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	贡献率/%	区域传输浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	贡献率/%
2022-09	PM_{10}	38.00	5.30	13.94	2.31	6.08
	$PM_{2.5}$	17.54	3.06	17.43	0.86	4.89

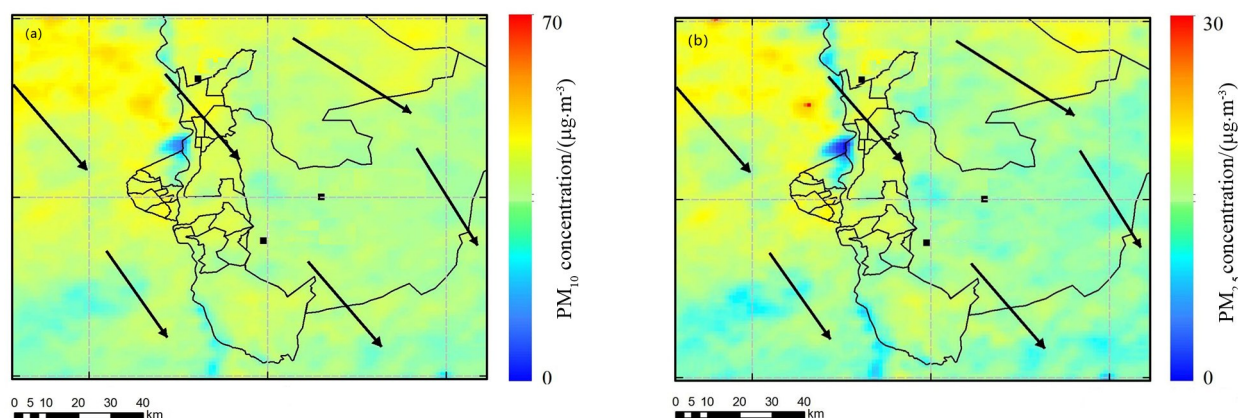


图 3 2022 年 9 月天基卫星 PM_{10} (a) 和 $PM_{2.5}$ (b) 浓度及气象条件示意图

Fig. 3 Schematic map of PM_{10} (a) and $PM_{2.5}$ (b) concentrations and meteorological conditions of space-based satellites in September 2022

在天基卫星获取的区域尺度污染物浓度基础上 (图 3), 根据棋盘井园区的历史气象数据聚类形成西南、西部和西北三条污染物传输通道。利用空基遥感监测数据、地基遥感监测数据与空气质量模式的数据融合和数据同化技术, 实现对污染过程的再分析。如 2022 年 9 月 20—26 日期间, 通过空基激光雷达垂直观测可以发现 22 日 00:00—04:00 棋盘井主要从西北通道高空 300 米左右输入污染, 西部和西南通道以污染输出为主, 24—26 日三条传输通道均以污染输入为主 (图 4)。

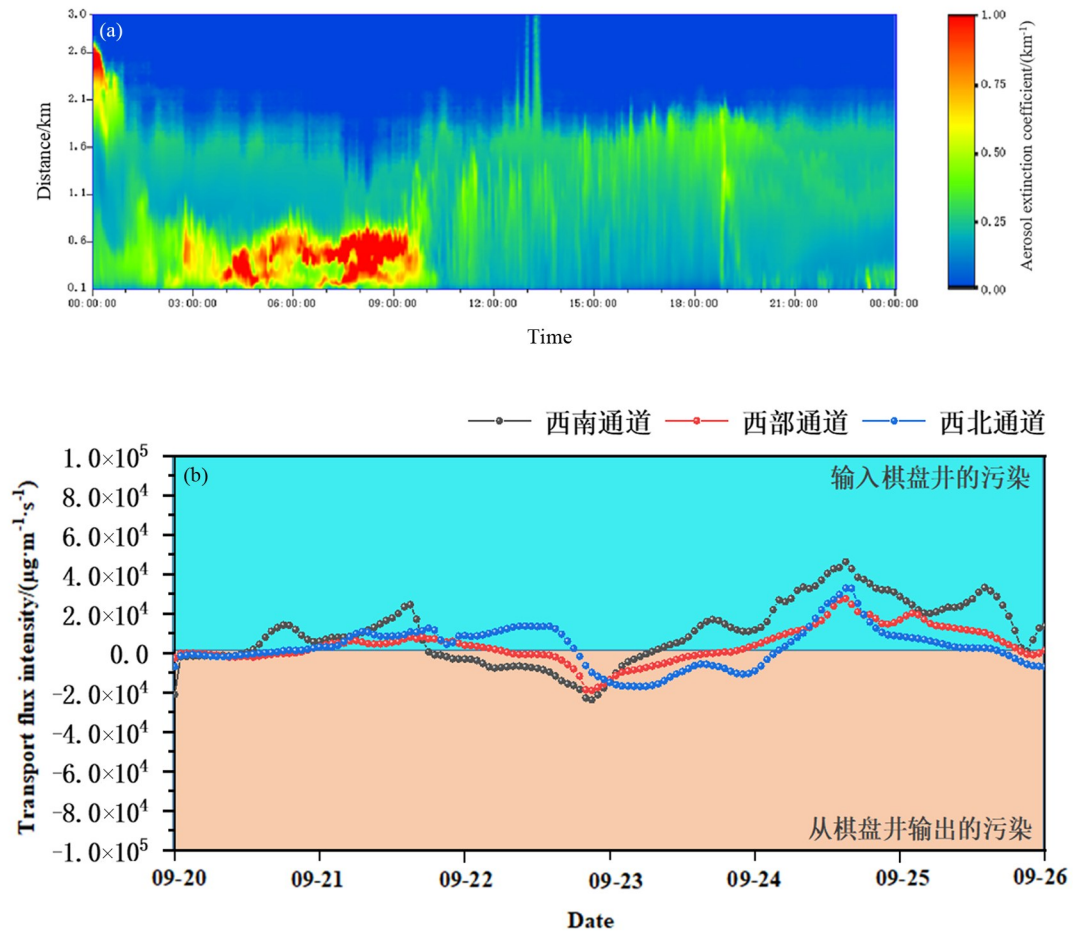


图4 2022年9月22日空基激光雷达垂直观测结果(a)和20—26日空基遥感传输分析示意图(b)

Fig. 4 Vertical observation results of space-based lidar on September 22, 2022 (a) and space-based remote sensing transmission analysis from September 20 to 26, 2022 (b)

2.2 空基遥感协同地面网格观测及时预警污染

通过空基遥感对颗粒物和臭氧及其前体物等开展8 min—1 h 1次的360°扫描(图5),空基遥感辅助设备开展分钟级的颗粒物监测,实现污染物浓度数据的及时采集。针对不同的污染物,制订不同的预警方案,通过对采集数据的实时处理,发现浓度异常数据,生成预警信息,供地面执法人员溯源调查。基于各项污染物浓度的历史数据,以浓度大于均值+1倍标准差为橙色预警,大于均值+2倍标准差为红色预警,大于均值+3倍标准差为紫色预警。通过建立3级预警方案,计算区域内污染物浓度的均值和标准差来寻找污染相对较高的企业,进而有针对性地进行深入治理,不断提升空气质量。

2022年10月1—10日期间,通过空基遥感扫描发现在园区西北方向出现高污染预警区域,结合地面网格化微站可以发现多个煤矿企业的颗粒物(PM_{2.5}和PM₁₀)浓度均出现突发升高情况(图6)。由此可及时排查污染源,减少污染排放影响。

2.3 天基卫星协同空基遥感锁定污染排放企业

利用天基卫星大范围扫描探测技术优势,可从宏观层面研判重污染区域范围以及污染形式的变化,但是

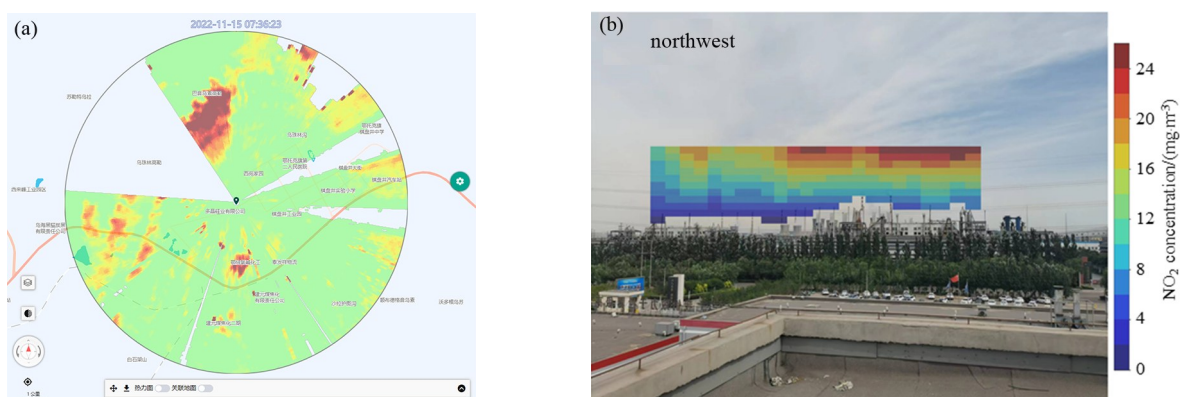


图 5 空基遥感对颗粒物 (a) 和臭氧及其前体物 (b) 的快速扫描

Fig. 5 Images of particulate matter (a), ozone and its precursors (b) scanned by space-based remote sensing

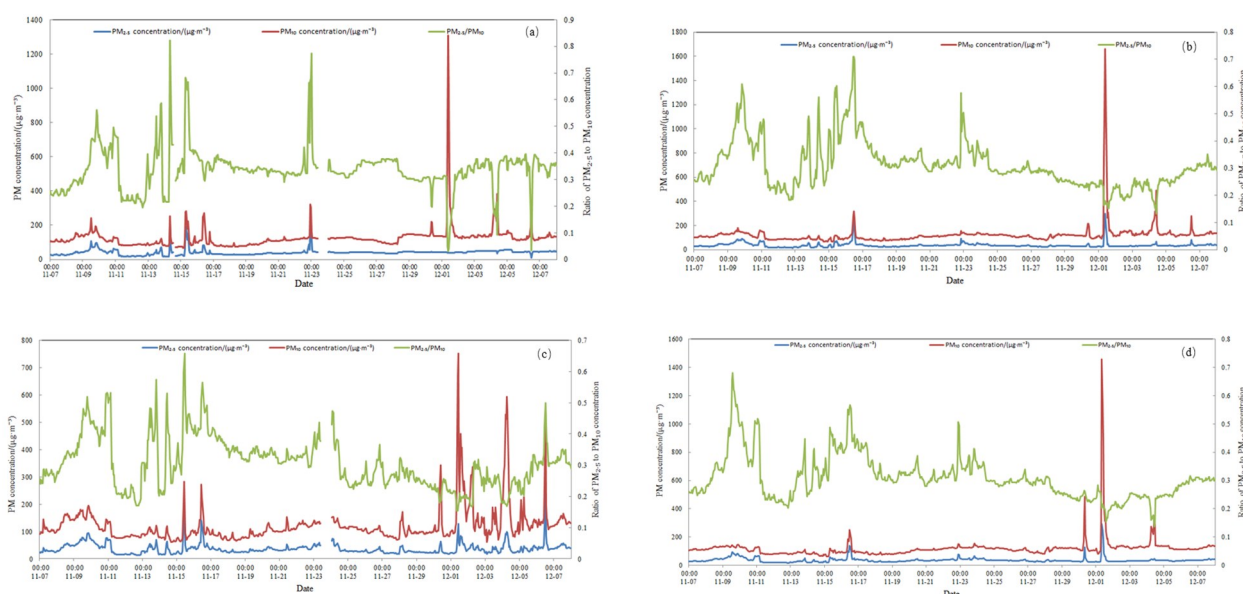


图 6 空基遥感辅助设备分钟级监测。(a) 宏业集团内蒙古宝丰煤矿有限责任公司; (b) 内蒙古星光煤炭有限责任公司一号井; (c) 内蒙古广汇煤炭责任有限公司; (d) 鄂托克旗东辰煤矿/鄂托克旗巴音乌素六保煤矿

Fig. 6 Minute-level results monitored by space-based remote sensing equipment. (a) Hongye Group Inner Mongolia Baofeng Coal Mine Limited Liability Company; (b) No. 1 Shaft of Inner Mongolia Xingguang Coal Limited Liability Company; (c) Inner Mongolia Guanghui Coal Liability Company Limited; (d) Dongchen Coal Mine of Ertok Banner/Ertok Banner Bayin Wusu Liubao Coal Mine

由于卫星的监测频次和空间分辨率限制, 很难直接锁定污染排放企业。因此, 通过在重污染区域范围关键位置布设空基遥感, 水平扫描发现污染物浓度高值方位, 在该方位上对企业排放浓度进行垂直扫描成像, 进一步叠加企业清单, 结合微气象条件, 将污染溯源到具体企业, 从高值区溯源到高值点 (图 7)。

如图 8 所示, 通过将天基卫星固定周期拓展到全天候、分钟级, 空间分辨率从千米级提高到米级, 更加精细化园区大气污染空间分布情况, 精准摸清园区本地排放热点, 颜色越深代表污染源出现频次越高, 由此可知排放热点主要集中于园区西部地区。

除此之外, 空基遥感还弥补了天基卫星监测要素少的不足, 除了常规空气质量 6 参数外, 空基遥感所采用的传感器可监测 VOCs 种类达上百种, 可有效检测多种企业特征污染物的排放变化。在此基础上, 通过特

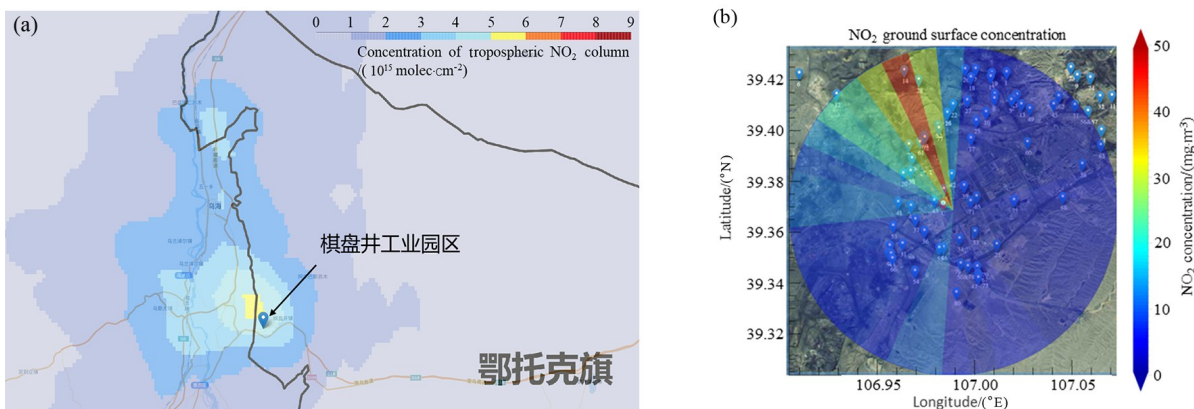
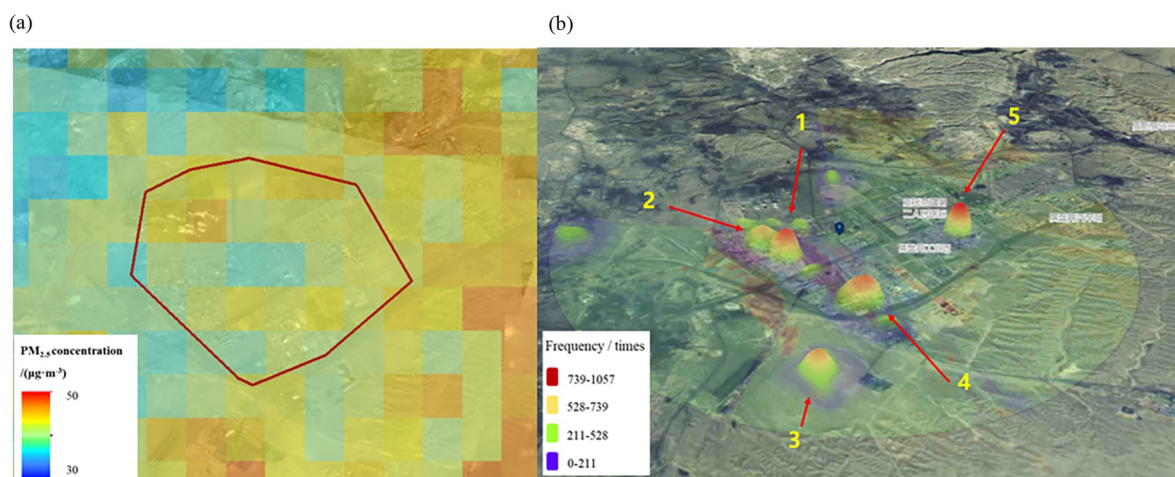


图7 天基卫星 (a) 和空基遥感 (b) 协同联动精准溯源

Fig. 7 Precise traceability by combination of remote sensing (a) and space-based remote sensing (b)



注: 1 鄂尔多斯化学工业有限公司; 2 冶金事业部办公南楼; 3 建元焦化二期; 4 工业街电石厂、氯碱工厂; 5 阿尔巴斯西街棋盘井工业园

图8 天基卫星遥感监测颗粒物浓度 (a) 和空基遥感监测颗粒物浓度报警频次热力图 (b)

Fig. 8 Space-based satellite remote sensing monitoring of particulate matter concentration (a) and space-based remote sensing monitoring of particulate matter concentration alarm frequency heat map (b)

定的指纹排放特征, 叠加气象传输影响, 可以直接锁定企业并计算企业排放量。如在棋盘井工业园区, 发现乙炔 (C_2H_2) 浓度夜间异常升高后, 进行通量分析, 发现造成浓度升高的主要排放来自东南方向厂区, 进一步查看企业清单后, 发现只有一家PVC企业在排放 C_2H_2 (图9)。

2.4 天基卫星协同走航监测逐步深入排查污染企业

根据天基卫星监测工业园区大气环境时空分布特征, 以棋盘井园区及其西北部为巡测重点区域, 结合园区路网设计走航巡测巡航路线, 如图10所示。通过对重点区域的颗粒物进行巡测, 确定污染企业。

走测途中在电力、焦化、煤炭开采与加工、化学品制造与加工等行业周边明显监测到 $PM_{2.5}$ 浓度高值 (图11)。 $PM_{2.5}$ 浓度高值持续时间较长, 走航车在大约 10 min 内监测到两次 $PM_{2.5}$ 浓度高值。

2.5 “五基”协同监测系统直观可视化分析

建立工业园区大气环境监管综合分析平台 (图12), 集成超清卫星遥感影像、园区大气环境质量天基卫

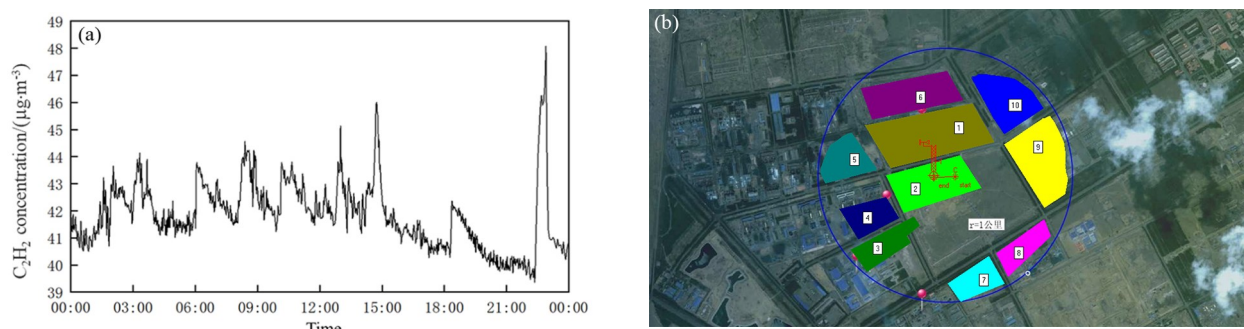


图 9 C₂H₂浓度异常升高 (a) 及通量分析 (b)

Fig. 9 Abnormal increase in C₂H₂ concentration (a) and flux analysis (b)

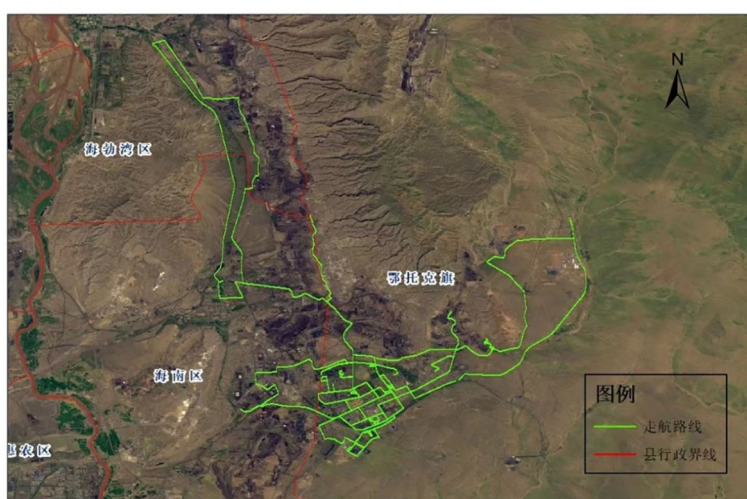


图 10 天基卫星确定重点区域以及走航路线

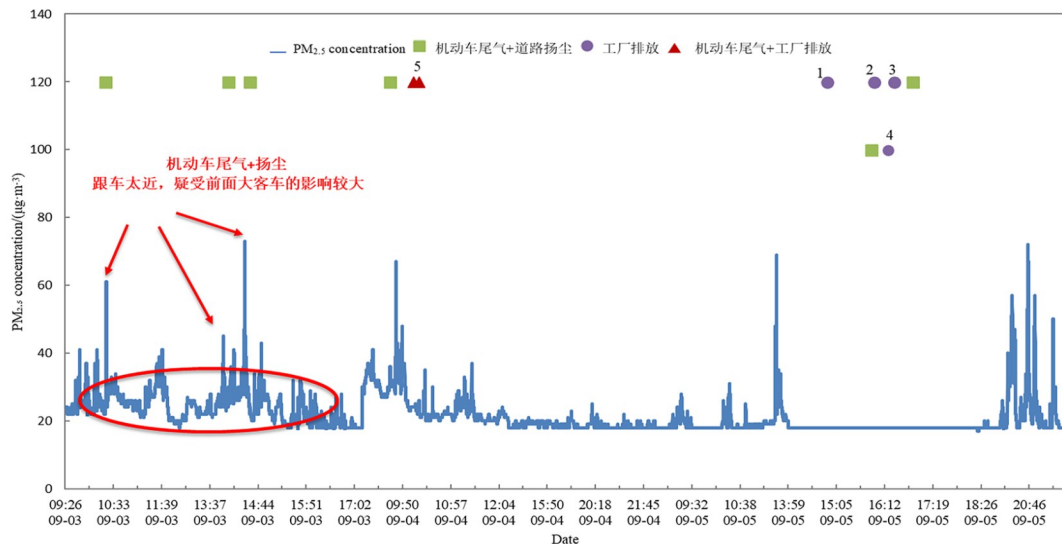
Fig. 10 Determination of key areas and navigation routes by space-based satellites

星、空基遥感、航空无人机、移动监测车和地面观测设备等“五基”协同监测数据源, 实现整个工业园区大气环境和污染排放的多源数据融合监测监管平台, 进而从点拓展到面, 从固定周期拓展到小时级监测, 及时精准发现污染要害问题, 助力工业园区精准治理, 形成综合治理方案。

3 “五基”协同监测应用讨论

“五基”协同大气监测系统的核心是运用协同联动机制和技术方法, 构建数据协同融合的核心算法模型, 形成“空间多尺度、时间多频次、指标多要素、数据多源融合”的大气环境立体遥感协同监测体系。通过多监测手段协同联动, “五基”协同大气监测系统具备及时感知、实时预警、精准溯源、全面监管的大气环境监测服务能力, 有力支撑工业园区科学治污、精准治污。

“五基”协同大气监测系统已在鄂尔多斯市的棋盘井工业园区开展了应用实践, 系统运行以来, 通过“五基”多技术手段协同联动分析, 多源数据融合主要解决了以下五个问题: 1) 量化了区域传输贡献。利用空基遥感监测发现每次污染过程中的主要污染传输方向, 综合天基卫星、空基遥感监测数据、地基遥感监测数据与空气质量模式的数据融合和数据同化技术, 实现对主要传输通道上污染物输送定性定量分析。针对每一



注: 1 红缨煤焦化; 2 兴荣洗煤厂; 3 泰和集团; 4 亚东精细化工; 5 鄂尔多斯煤电

图 11 2022年9月3-5日工业园区及周边颗粒物浓度及关联污染排放异常企业

Fig. 11 Particulate matter concentration of industrial park and the surrounding areas from September 3 to 5, 2022 and the associated pollution emissions abnormal enterprises



图 12 “五基”协同监管平台

Fig. 12 Multilevel platform collaboration for atmospheric environment

次污染过程, 一是通过分钟级的垂直污染物时空演变过程观测, 开展高时间分辨率的传输贡献量化; 二是从空间上增加传输通道污染物输送定性定量分析, 分析污染物输送路径以及周边潜在园区对重点区域贡献占比。2) 获得了本地污染物排放热点。空基遥感将天基卫星大气环境遥感产品的时间分辨率提升到分钟级, 空间分辨率提高到米级, 经过长时间的水平 360°扫描后, 叠加企业清单, 基本摸清本地污染物的排放热点。3) 协同精准溯源。通过天基卫星锁定重点区域, 空基遥感水平扫描确定重点区域内的污染高值方位, 垂直成像后叠加企业清单, 确定高排放企业点位, 追踪到排污工艺环节。4) 及时处置污染冒泡问题。对空基遥感以及空基遥感辅助设备及时获取的监测数据, 制定自适应的预警方案, 实时生成预警信息, 供地面执法人员及时处置污染冒泡问题。5) 形成全面治理方案。建立“五基”协同监管平台, 通过“五基”协同联动以及多源数

据融合,全面掌握目标区域污染状况和排放规律,形成全面治理方案,支撑管理决策。

4 结 论

由于天基卫星的时空监测尺度和地面直接监测存在较大差异,导致天基和地面监测结果往往出现不一致的情况。而空基遥感可以实现重点区域几十至几百平方千米范围内的持续观测,相对于定点观测和模式模拟,具有覆盖范围广、观测精度高、测量要素多的优势,可作为源解析手段的重要补充。

“五基”协同监测体系正是通过布设空基遥感,填补天基卫星和地面监测之间的差异,同时将传统的天基卫星、地面观测等技术手段有机统一起来,使得监测空间分辨率提升到米级,时间分辨率提高到小时级,监测要素拓展到几十上百种,可以更加及时、精准、全面地掌握污染状况,实时生成各类污染物浓度异常报警信息,结合微气象数据和企业清单,生成执法任务清单,供地面执法人员处置,可以作为远程发现问题线索的重要手段。

“五基”协同监测体系在无需发射新的遥感卫星的情况下,是一种低成本、高效率、可行性强的解决技术手段,对于进一步拓展现有遥感影像的应用和研究价值具有十分重要的意义。本研究重点介绍了天基、空基、走航和地面协同观测,而在实际应用中还包括无人机等移动精准观测技术手段,特别针对重污染天气过程的污染溯源和应急执法,“五基”协同监测体系可以发挥精准、高效和全面的监测效果。随着“五基”协同监测体系的逐步成熟和推广应用,其必将为全国重要生态空间监管、中央生态环境保护督察、生态环境执法应急、生物多样性保护和气候变化评估等重点工作提供更有力的、更全面的技术支撑和服务。

参考文献:

- [1] Zhang T H, Zhu Z M, Gong W, *et al.* Estimation of ultrahigh resolution PM_{2.5} concentrations in urban areas using 160 m Gaofen-1 AOD retrievals [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 91-104.
- [2] Tan C, Zhao G D, Huang Y H. Monitoring and analysis of enterprise SO₂ concentration based on UAV ultraviolet spectral data [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(5): 150-154.
檀畅,赵国栋,黄耀欢.基于无人机紫外光谱数据的企业SO₂浓度监测与分析[J].环境与可持续发展,2019,44(5): 150-154.
- [3] Huang Y Y, Li A, Wagner T, *et al.* The quantification of NO_x and SO₂ point source emission flux errors of mobile differential optical absorption spectroscopy on the basis of the Gaussian dispersion model: A simulation study [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(11): 6025-6051.
- [4] Huang Y Y, Li A, Qin M, *et al.* Nitrogen oxides spatial distribution and emissions with mobile multi-axis differential optical absorption spectroscopy in Wuhan City [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 195-204.
黄业园,李昂,秦敏,等.基于车载多轴差分吸收光谱技术的武汉氮氧化物分布及排放研究[J].光学学报,2021,41(10): 195-204.
- [5] Shen L L, Qin M, Sun W, *et al.* Cruise observation of SO₂, NO₂ and benzene with mobile portable DOAS in the industrial park [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1936-1940.
沈兰兰,秦敏,孙伟,等.基于车载便携式DOAS对工业园区SO₂、NO₂和苯的走航观测[J].光谱学与光谱分析,2016,36(6): 1936-1940.

- [6] Zhang Q, Xie P H, Xu J, *et al.* Two-dimensional fast imaging of smoke plumes based on spectral telemetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 209-219.
张强, 谢品华, 徐晋, 等. 基于光谱遥测技术的烟羽二维分布快速成像 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 209-219.
- [7] Gao J X, Zhao S H, Hou P. Advances of remote sensing on ecology and environment in China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(4): 705-719.
高吉喜, 赵少华, 侯鹏. 中国生态环境遥感四十年 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 705-719.
- [8] Wang Q, Li Q, Chen L F, *et al.* Satellite Remote Sensing Technology of Atmospheric Environment and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2011.
王桥, 厉青, 陈良富, 等. 大气环境卫星遥感技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [9] 生态环境部. 生态环境监测规划纲要 (2020—2035年) [OL]. [2020-06-21]. <https://mhuanbao.bjx.com.cn/mnews/20200619/1082658.shtml>
- [10] Zhang H K, Hung B, Zhang M, *et al.* A generalization of spatial and temporal fusion methods for remotely sensed surface parameters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(17): 4411-4445.
- [11] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013: 108-136.
- [12] Liu M, Liu X, Wu L, *et al.* A modified spatiotemporal fusion algorithm using phenological information for predicting reflectance of paddy rice in Southern China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 772.
- [13] Wang Q. Progress of environmental remote sensing monitoring technology in China and some related frontier issues [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 25-36.
王桥. 中国环境遥感监测技术进展及若干前沿问题 [J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 25-36.
- [14] 国家大气污染防治攻关联合中心. 大气重污染成因与治理攻关项目 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [15] Li J X, Hong D F, Gao L R, *et al.* Deep learning in multimodal remote sensing data fusion: A comprehensive review [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 112: 102926.
- [16] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, *et al.* Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2022, 52(4): 534-574.
杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献 [J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.
- [17] 新华网. 习近平在参观“奋进新时代”主题成就展时强调 踔厉奋发勇毅前行团结奋斗 夺取中国特色社会主义新胜利 [OL]. [2022-10-01]. http://www.news.cn/2022-09/27/c_1129036549.htm.
- [18] 高吉喜. “五基”协同生态遥感监测体系构建与应用 [J]. 环境保护, 2022, 50(20): 13-19.
- [19] Lyapustin A, Martonchik J, Wang Y, *et al.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2011, 116(D3): D03210.
- [20] Chen H, Li Q, Li Y, *et al.* 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 [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(1): 33-43.
陈辉, 厉青, 李营, 等. 京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析 [J]. 环境科学, 2019, 40(1): 33-43.
- [21] 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.
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.