

基于卫星遥感的近地面PM_{2.5}浓度反演进展

向娟¹, 陶明辉¹, 郭玲², 陈良富³, 陶金花³, 桂露¹

1. 中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院, 武汉 430074;

2. 天津气象服务中心, 天津 300074;

3. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘要: 细颗粒物PM_{2.5} (Fine Particulate Matter) 是影响空气质量和公共健康的关键因素之一。高时空分辨率的PM_{2.5}数据是公共健康风险评估和流行病学研究的基本需求。相较于地面站点, 卫星遥感技术具有连续观测、宽覆盖和低成本的优势, 基于卫星气溶胶光学厚度AOD (Aerosol Optical Depth) 反演PM_{2.5}质量浓度的方法已成为热点。本研究概述了卫星AOD产品反演PM_{2.5}浓度的原理, 介绍了用于PM_{2.5}反演的主要卫星AOD产品及其反演精度; 总结了现有的PM_{2.5}估算方法及其优缺点, 指出目前PM_{2.5}反演研究存在的问题; 提出未来PM_{2.5}反演方向主要集中在高时空分辨率的PM_{2.5}浓度重建、基于激光雷达数据的三维PM_{2.5}浓度反演及PM_{2.5}化学组分反演等方向。比例因子法、物理机理模型和统计模型这3种方法都能在不同时期不同程度地准确估算PM_{2.5}浓度, 代表了那个时期较为前沿的研究热点, 但比例因子法和物理机理模型因其自身的局限性而应用较少, 而统计模型因其独特的时间或时空异质性的可描述性和强大的非线性描述能力的优势而被广泛应用并不断改进。目前PM_{2.5}反演研究存在的问题主要有3种: (1) 卫星AOD的非随机缺失问题造成估算的PM_{2.5}数据缺失; (2) 反演模型的精度问题; (3) PM_{2.5}的化学成分估算问题。基于此, 本文为了准确揭示近地面PM_{2.5}的时空变化趋势, 提高基于卫星AOD产品的近地面PM_{2.5}反演研究的准确性, 提出了几点未来的研究方向: 首先, 新型的高空间(如风云四号、高分五号)、高时间分辨率(Himawari-8/9)卫星AOD产品在PM_{2.5}的精细化估算研究上具有很大优势, 这对于高时空分辨率的PM_{2.5}浓度重建具有重要意义; 其次, 随着大气探测技术的发展, 星载、机载及地基激光雷达都能够获取垂直分布信息, 搭载在无人机上的颗粒物传感器可实现PM_{2.5}垂直方向上的监测, 将其与光学遥感卫星数据及地面监测数据结合, 可实现三维的PM_{2.5}浓度反演; 最后, PM_{2.5}化学成分信息对于分析污染成因、暴露特征等尤其重要, 其时空变化趋势研究是一个重要的发展方向, 然而, 地面PM_{2.5}组分观测站网仍不完善, 如何克服卫星遥感估算中对地面站网的依赖, 实现PM_{2.5}化学成分的高精度反演需要进一步研究。通过本研究, 有助于进一步了解不同PM_{2.5}估算方法的原理机制及其优缺点, 为基于卫星AOD产品反演近地面PM_{2.5}浓度的新的发展方向提供启示, 提升近地面PM_{2.5}浓度反演的精度及时空分辨率。

关键词: PM_{2.5}, 卫星遥感, AOD, 估算方法

引用格式: 向娟, 陶明辉, 郭玲, 陈良富, 陶金花, 桂露. 2022. 基于卫星遥感的近地面PM_{2.5}浓度反演进展. 遥感学报, 26(9): 1757-1776

Xiang J, Tao M H, Guo L, Chen L F, Tao J H and Gui L. 2022. Progress of near-surface PM_{2.5} concentration retrieve based on satellite remote sensing. National Remote Sensing Bulletin, 26(9): 1757-1776 [DOI: 10.11834/jrs.20210438]

1 引言

随着经济的快速发展和城市化进程的加快, 细颗粒物PM_{2.5} (Fine Particulate Matter) 污染已成为全球范围内的一个严峻问题。PM_{2.5}是指大气中空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物,

是近年来空气质量恶化的主要元凶之一 (Tao等, 2013)。且其粒径小, 可以轻易地进入人体肺部及支气管, 对人体健康产生极大危害 (吕勇等, 2017)。大量流行病学研究表明, 长期暴露于高PM_{2.5}污染水平的地区会增加心血管和呼吸系统等疾病的发病率和过早死亡率 (Liu等, 2007a;

收稿日期: 2020-10-02; 预印本: 2021-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41871262); 国家自然科学基金重点(编号:41830109)

第一作者简介: 向娟, 研究方向为大气遥感。E-mail: 1358702500@qq.com

通信作者简介: 陶明辉, 研究方向为大气环境遥感。E-mail: taomh@cug.edu.cn

Pope III 等, 2002)。2015 年我国因 PM_{2.5} 污染导致的中风死亡率高达 40.3%、急性下呼吸道感染死亡率为 33.1%、缺血性心脏病死亡率为 26.8%、肺癌死亡率为 23.9%、慢性阻塞性肺病死亡率为 18.7% (Song 等, 2017); 另外, PM_{2.5} 具有来源复杂 (人为源及自然源)、寿命短 (约 7—15 d)、时空变化大和化学成分复杂等特点, 能对大气环境乃至气候变化产生重要影响 (Cao 等, 2012; Kaufman 等, 2002)。因而, 准确获取高时空分辨率的 PM_{2.5} 浓度尤其重要。

地面站点监测是获取 PM_{2.5} 污染水平最直接的监测手段, 它可以提供逐小时的 PM_{2.5} 连续观测, 准确性高 (Zhang 等, 2006; Wang 等, 2016)。中国已于 2012 年底建成了覆盖全国主要城市的 PM_{2.5} 地面监测网络, 这为 PM_{2.5} 的暴露特征研究提供了更加密集的数据支持。然而仅仅依靠地面站点的监测数据是远远不够的, 原因有以下几点: (1) 由于缺失 2013 年以前的监测数据, 地面监测网络难以反映中国 PM_{2.5} 的历史变化趋势; (2) 尽管自 2015 年以来地面监测网络可提供加密站点的监测数据, 但是大部分站点分布在东部沿海的主要城市地区, 而东部农村及西部地区的站点较为稀疏, 监测站点的分布不均导致难以获取 PM_{2.5} 浓度的空间变化特征 (Lu 等, 2016); (3) 中国冬季燃煤期常发生区域性雾霾污染事件, 稀疏的站点分布难以反映大范围的污染空间分布、来源及传输过程 (Tao 等, 2012)。因此, 准确获取 PM_{2.5} 浓度的时空变化至关重要。

卫星遥感观测技术为 PM_{2.5} 的监测提供了连续的空间分布信息, 弥补了地面监测站点分布不均的缺点, 它可以实现全方位、大空间范围的连续观测并获取全面、完整和细致的 PM_{2.5} 污染源分布 (Yao 和 Lu, 2014); 另外, 卫星观测大大降低了空气质量的监测成本, 尤其是在缺乏地面监测网络且空气污染严重的发展中国家, 因而卫星遥感监测具有地面监测无可比拟的成本和空间覆盖优势 (Yao 和 Lu, 2014)。卫星气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth) 是地球表面到大气顶部的气溶胶消光系数的积分, 作为柱状气溶胶的光学指标, 用于描述气溶胶对太阳辐射的散射和吸收作用, 并反映空气污染程度 (Liu 等, 2009a)。研究表明, PM_{2.5} 与 AOD 之间存在强烈的正相关关系, 具体表现为当大气中颗粒物粒子的数量和质量增

加时, 光散射或吸收随之增强, 并导致 AOD 浓度增加 (Kahn 等, 1998)。基于此, 许多研究利用 PM_{2.5} 与 AOD 的相关性建立关联模型, 以实现长时间、大空间范围的 PM_{2.5} 连续监测 (Hoff 和 Christopher, 2009; Liang 等, 2018)。利用卫星 AOD 估算 PM_{2.5} 浓度也成为 PM_{2.5} 长期变化趋势研究的热点 (Zhang 等, 2017)。

本文主要从卫星 AOD 产品估算 PM_{2.5} 浓度的基本方法原理、常用的 AOD 产品以及反演方法模型, 结合国内外的相关研究, 综述基于卫星遥感估算 PM_{2.5} 浓度的研究进展, 并对其发展趋势进行展望。

2 AOD 估算 PM_{2.5} 的基本原理

2.1 气溶胶光学厚度 (AOD)

气溶胶是指悬浮在大气中的固态或液态颗粒物共同组成的多相体系, 可分为烟、雾和灰尘, 动力学直径大约是 0.001—100 μm; 来源可分为自然源 (尘土、扬沙、火山灰、植被排放等) 和人为源 (汽车尾气、工业生产、生物质燃烧等) 两大类。气溶胶分布广泛、生命周期短暂 (约 7—15 d, 有些细粒子可达 30 d)、空间变化大、化学组分复杂等特征, 对全球和区域气候、大气环境质量、人体健康造成严重影响 (Kaufman 等, 2002)。AOD 是描述气溶胶污染程度的重要参数之一, 它是垂直方向上气溶胶消光系数的积分, 可以衡量气溶胶粒子在垂直大气柱中对太阳辐射的衰减程度, 表征了气溶胶总的消光影响及大气浑浊程度 (Liu 等, 2009a)。通常, 波长为 λ 的 AOD 可表示为 (汤玉明 等, 2018):

$$\text{AOD} = \int_0^{\infty} K_a(\lambda, Z) dz \quad (1)$$

式中, $K_a(\lambda, Z)$ 表示波长 λ 在高度 Z 时的气溶胶消光系数。根据米散射原理 (Bassan 等, 2010; Nussenzveig 和 Wiscombe, 1980; Yamamoto 和 Tanaka, 1969), 假设大气微粒可以等效为已知折射率的粒子, 那么整层大气柱的气溶胶消光系数 $K_a(\lambda, Z)$ 可表示为 (李学彬等, 2008):

$$K_a(\lambda, Z) = \pi \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r) r^2 dr \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda)$ 为折射率 m、粒子半径 r 和波长 λ 的函数, n(r) 为气溶胶粒径分布。由以上公式可以看出, AOD 与气溶胶消光系数的垂直分布及气溶胶浓度有关。

2.2 AOD与PM_{2.5}的关系

搭载于Terra卫星的多角度成像仪MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) 的早期研究表明, 在可见光和近红外波段反演的AOD对粒径为0.1—2.0 μm的颗粒物极其敏感, 这与PM_{2.5}的粒径范围非常接近 (Kahn等, 1998, 2001), 这也为建立AOD与PM_{2.5}之间的相关关系提供了重要理论基础。但是, AOD代表的是大气中湿度环境下整层大气的气溶胶消光积分, 而PM_{2.5}是近地面颗粒物在干燥条件下的质量浓度 (Collaud Coen等, 2013), 它们之间的相关性受到气溶胶垂直分布和气溶胶吸湿特性的影响 (李成才等, 2005)。因此, 需要对AOD进行高度及湿度订正。气溶胶消光系数随垂直廓线高度的增加呈负指数衰减, 根据AOD计算公式, 消光系数 $K_{\alpha}(\lambda, Z)$ 可表示为

$$K_{\alpha}(\lambda, Z) \approx K_{\alpha,0}(\lambda) \exp\left(-\frac{Z}{H_{\alpha}}\right) \quad (3)$$

式中, H_{α} 为气溶胶的位势高度, 通常可由行星边界层PBLH (Planetary Boundary Layer Height) 近似代替, 行星边界层是大气最底层的部分, 可影响大气污染物的扩散程度 (Tsai等, 2011)。因此, AOD可表示为 (Koelemeijer等, 2006)

$$\text{AOD} \approx K_{\alpha,0}(\lambda, Z) \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{Z}{H_{\alpha}}\right) dz = K_{\alpha}(\lambda, Z) \cdot H_{pblh} \quad (4)$$

由于吸湿性气溶胶的存在, 气溶胶的粒径会随相对湿度发生变化, 从而影响气溶胶的消光特性 (李成才等, 2005)。以前的研究简单地把相对湿度RH (Relative Humidity) 作为多元回归模型的预测变量之一, 但它只能代表RH对AOD的平均影响, 难以反映不同RH下AOD的变化趋势 (Tian等, 2010)。精密仪器可以准确测得气溶胶的吸湿特性, 但这些测量值因其空间异质性仅适用于有限地区 (Hand和Malm, 2007)。目前, 多数研究采用经验公式获得吸湿增长因子 $f(\text{rh})$, 对消光系数进行湿度订正, 以获得近地面干消光系数。如Wang等 (2010) 基于PM_{2.5}与干气溶胶消光系数之间的关系, 发现经过垂直校正和湿度校正后的AOD与PM_{2.5}的相关性由0.48上升至0.62。根据Hand和Malm (2007) 的研究结果, 气溶胶的吸湿特性取决于它们的化学组分、混合物状态和粒子谱分布, 具有较大的空间和时间变化特征。因此, 准确获取不同区域的吸湿增长因子 $f(\text{rh})$, 是正确

建立AOD与PM_{2.5}相关关系的基础。

3 用于PM_{2.5}反演的主要AOD产品介绍

目前, 可用于反演AOD的卫星传感器按其类型可分为多光谱、多角度、紫外高光谱、激光雷达和被动式偏振传感器等五大类。多光谱卫星传感器主要有中分辨率成像光谱仪MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、可见光红外成像辐射仪VIIRS (Visible infrared Imaging Radiometer)、先进葵花成像仪AHI (Advanced Himawari Imager) 等; 多角度卫星传感器主要有多角度成像仪MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer); 激光雷达主要是云-气溶胶正交偏振激光雷达CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization); 被动式偏振卫星传感器主要是地球反射率极化和方向仪POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances); 此外, 基于MODIS LIB AOD数据集反演AOD的多角度大气校正算法MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) 也被广泛应用于PM_{2.5}的反演研究。各卫星AOD产品详细信息见表1。另外, 紫外高光谱AOD产品由于其较粗的分辨率 (0.25°) 和每日AOD像元的空间覆盖率极低, 几乎没有应用于PM_{2.5}的卫星遥感估算研究。因此, 本文不对紫外高光谱AOD产品进行介绍。

3.1 多光谱卫星传感器

3.1.1 MODIS、MAIAC

搭载在Terra和Aqua卫星上的MODIS传感器在36个光谱波段 (0.4—14.0 μm) 内对地球和大气光谱辐射进行每日的全球观测, 空间分辨率在250 m—1 km之间。虽然MODIS等多波段的传感器主要获取的是陆地上空的AOD信息, 但由于其在空间分辨率和时间分辨率上的优势, MODIS AOD已成为应用最广泛的卫星气溶胶产品之一 (Tao等, 2015; Wang等, 2020)。Tao等 (2015) 评价了C6版的反演精度, 发现暗目标DT (Dark Target) 算法反演的AOD在南方地区因密集植被的覆盖而表现出较好的反演结果, 但显著低估了中国北方地区的AOD值; 相对于DT在AOD>1.0超过一半的情况下无法反演AOD, 深蓝DB (Deep

Blue) 算法反演的 AOD 值能很好地揭示大范围霾污染的空间分布特征, 但 DB AOD 由于中国西部地区存在较多异常低 AOD 值导致其反演准确性较低 (Tao 等, 2017)。Wang 等 (2019a) 利用中国 20 个全球气溶胶自动观测网络 AERONET (Aerosol Robotic Network) 站点, 评估了 2001 年—2016 年期间中国各地区不同下垫面的 C6.1 DT AOD 的精度, 与 C6 AOD 相比 C6.1 DT AOD 在城市区域的过高估计得到了有效的缓解, MODIS C6.1 AOD 数据无论是在覆盖度上还是精度上都比 C6 版产品有所提高。

初步研究表明, MODIS AOD 数据可用于探测和追踪污染物的传输及极端污染事件 (Tao 等, 2015)。此外, 在基于 MODIS AOD 的 $PM_{2.5}$ 估算值与阿拉巴马州 7 个地点 24 小时的实测 $PM_{2.5}$ 浓度间发现了很强的相关性 (相关系数 $R^2=0.7$) (Wang 和 Christopher, 2003), 这表明了卫星气溶胶光学特性用于空气质量研究的可行性。Wang 等 (2020) 利用 MODIS 3 km AOD 估算了京津冀地区的 $PM_{2.5}$ 浓度, 其基于时间的 10 折交叉验证 R^2 为 0.82, 可见 MODIS AOD 能表现出较好的预测效果。

表 1 常用卫星 AOD 产品

Table 1 The common satellite AOD products

AOD 产品	反演算法	反演波段	空间分辨率	反演区域	产品精度
MODIS	深蓝算法 (DB)	550 nm	10 km, 3 km	陆地、海洋	0.904 (Wei 等, 2019)
	暗目标算法 (DT)	550 nm	3 km		0.946 (Wang 等, 2019a)
VIIRS	VIIRS 官方 AOD 算法	9 个可见光—近红外波段, 8 个中红外波段及 4 个热红外波段	6 km	陆地、海洋	0.85—0.94 (Bilal 等, 2017)
AHI	JAXA 官方 AOD 算法	500 nm	5.5 km	陆地、海洋	0.74 (Zang 等, 2018)
MAIAC	多角度大气校正算法	550 nm	1 km	陆地、海洋	0.94 (Tao 等, 2019)
MISR	MISR 多角度算法	550 nm	4.4 km	陆地、海洋	0.865 (Tao 等, 2020)
CALIOP	偏振算法	0.532 μm 、1.064 μm	水平方向为 5 km 垂直方向为 30 m	陆地、海洋	0.7 (Omar 等, 2013)
POLDER	GRASP 偏振算法	865 nm、670 nm	10 km	陆地、海洋	0.92 (Su 等, 2010)

MAIAC 基于 MODIS L1B AOD 产品, 利用时间序列分析和基于图像的空间处理, 能够在 1 km 的高空间分辨率下反演气溶胶光学厚度 (Lyapustin, 2011a, 2011b), 为更精细空间尺度的气溶胶反演研究提供了极好的机会。结合时间序列分析和空间分析, 有助于提高 MAIAC 数据中的云检测、气溶胶算法和大气校正的准确性 (Lyapustin 等, 2018), 如中国上空的高 AOD 水平往往会被误分类为云 (Tao 等, 2012), 限制了 AOD 反演的准确性; Tao 等 (2019) 的验证结果表明, MAIAC AOD 与 AERONET AOD 的相关系数高达 0.94, 且 MAIAC AOD 与 MODIS DB 和 DT AOD 产品具有相似的空间分布特征, 但由于 MAIAC 1 km 分辨率更高, 更易于揭示大量高 AOD 值的热点。另外, 因其他标准 AOD 产品如 MODIS 等分辨率较粗 (10 km AOD) 或精度较低 (DT 3 km AOD) (Mhawish 等, 2017; Remer 等, 2013), MAIAC 近年来在颗粒物估算、空气质量和流行病学等方面得到广泛应用。MAIAC 在暗植被地表和高亮沙漠、干旱半干旱地表均能成功反演 AOD, 已被证明与新英格兰地区的 $PM_{2.5}$

浓度有很强的相关性 (Chudnovsky 等, 2013)。Liang 等 (2018) 利用 MAIAC 气溶胶光学厚度估算了北京及其周边地区 2004 年到 2014 年 1 km 空间分辨率下的每日 $PM_{2.5}$ 浓度, 模型交叉检验的 R^2 在 2013 年为 0.82, 在 2014 年为 0.79; 此外, 模型预测的历史 $PM_{2.5}$ 浓度在季节和年度水平上具有相对较高的准确度 (R^2 范围为 0.78—0.86)。

3.1.2 VIIRS

考虑到 Terra 和 Aqua 卫星的使用寿命已超过设计寿命, 2011 年美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 发射了 Suomi-NPP 卫星, 其搭载的 VIIRS 传感器被视为 MODIS 的“继任者”。相比之下, VIIRS 的幅宽更宽 (3060 km), 这避免了 MODIS (2330 km) 传感器在低纬度地区两个相邻轨道间的扫描间隙 (Hsu 等, 2019)。VIIRS 提供两种气溶胶数据: 环境数据记录 (EDR) 和中间产品 (IP), IP 空间分辨率为 750 m, 用于获取定量测量的气溶胶特性; EDR 是 IP 产品经过数据质量筛选、过滤和分析后

得到的空间分辨率为6 km的数据记录,包括陆地及海洋上的AOD产品和Angstrom波长指数。已有研究揭示了MODIS 3 km AOD产品和VIIRS 6 km EDR AOD产品在PM_{2.5}估算方面的差异;从模型精度来看,VIIRS模型优于MODIS模型,从估算的年均和季节趋势来看,VIIRS模型提供了更接近地面实际PM_{2.5}水平(Yao等,2018)。Yao等(2019)基于空间自适应的两阶段模型利用6 km的VIIRS EDR AOD估算了中国地区的PM_{2.5}浓度;PM_{2.5}具有明显的日变化周期,结合白天与夜间的监测将更为准确地评估PM_{2.5}的日变化趋势(于建华等,2004),所以夜间PM_{2.5}浓度的估算也至关重要;Wang等(2016)利用VIIRS DayNight Band (DNB)的微光数据估算了夜间近地表的PM_{2.5}浓度,发现其相关系数为0.67,结果几乎没有偏差;Zhao等(2016)利用VIIRS DNB通道数据建立了反向传播神经网络,以监测城区夜间PM_{2.5}的污染状况,并取得较好的结果。

3.1.3 AHI

以往研究中,PM_{2.5}的估算常依赖于极轨卫星(Aqua、Terra等)反演的AOD产品,此类卫星的时间分辨率较粗,无法实时监测PM_{2.5}的浓度变化(特别是突发性污染事件)同时不能较好地分析城市地区的污染特征,且PM_{2.5}浓度存在日间变化(Guo等,2016)。因此,极轨卫星不能准确描述PM_{2.5}一日内的浓度变化及污染热源。葵花8号(Himawari-8)是一颗地球静止卫星,其搭载的AHI成像仪可在可见光至红外波段进行每10分钟一次的全盘观测(Yumimoto等,2016),获取气溶胶的日变化信息。Zang等(2018)将Himawari-8 AOD与AERONET在中国及其周边地区42个地面站点的观测结果进行比较,显示出 R^2 为0.74的高相关性及0.24的不确定性。Himawari-8 AOD已成功用于京津冀地区的PM_{2.5}小时浓度估算,并得到 R^2 为0.86的估算结果(Wang等,2017)。Li等(2018)基于小时同步的Himawari-8 AOD观测数据利用深度学习估算了武汉城市群的PM_{2.5}浓度,结果表明基于Himawari-8的估算结果精度较好,估算值与地面测量值的相关性达到0.75;Zhang等(2019)基于Himawari-8 AOD的小时数据构建了华中地区、京津冀地区、长三角地区及珠三角地区的PM_{2.5}估算模型,十折交叉验证得到实测值与

估算值的相关系数 R^2 分别为0.82、0.84、0.80及0.74。可见,小时同步观测的AOD数据对于PM_{2.5}的实时监测具有很大的潜力。

3.2 多角度卫星传感器——MISR

MISR从9个观测角度提供了4个可见/近红外光谱波段的全球连续观测(Tao等,2020);MISR独特的多角度观测可获取丰富的气溶胶光学和微物理特性,包括颗粒大小和形状,可用于分析气溶胶组分信息(Kahn等,1998)。然而,MISR(第22版,V22)的分辨率为17.6 km,这对于城市的空气污染研究(Moo等,2015)和流行病学研究(Liu等,2007a;2007b)来说过于粗糙。为了解决分辨率的限制,2018年初,新的MISR气溶胶产品(第23版,V23)已经发布,分辨率达到4.4 km,精度和覆盖范围也得到了提高(Garay等,2017,2020),这为全球气溶胶成分的制图提供了重要机会。验证表明MISR AOD的反演偏差在 $\pm(0.05+20\%AOD_{AERONET})$ 范围内约为80%(Tao等,2020)。独特的多角度观测优势使MISR AOD的研究取得重要进展,已成功应用于化学传输模型(Chemical Transport Model, CTM)模拟整个美国的气溶胶分布(Li等,2015和2013)及估算美国东部和西部地区的PM_{2.5}浓度(Liu等,2007b)。如Franklin等(2017)利用MISR 4.4 km总AOD和分级AOD产品建立了AOD-PM_{2.5}时空模型,发现“细模态AOD+中模态AOD”的AOD-PM_{2.5}模型表现最好,模型估算的PM_{2.5}与地表实测PM_{2.5}的 R^2 为0.67。城市气溶胶主要由硫酸盐、硝酸盐、铵盐、元素碳(EC)和有机碳(OC)组成,这些成分的贡献率随地理位置和季节而变化(Jeffrey,1998);且动物研究表明,血液学变化和肺部炎症与PM_{2.5}的某些化学成分有关(Saldiva等,2002)。因此,确定不同PM_{2.5}化学成分的浓度和相对毒性至关重要。早期,CTM因其模拟过程不依赖近地面监测数据就可实现反演,而广泛用于预测PM_{2.5}的各化学成分浓度(Liu等,2004)。但是CTM的预测结果通常存在较高的不确定性(Smyth等,2009),如Yahya等(2014)的结果显示,12 km分辨率下气象研究和化学预报模式的模拟值与实测值间的相关系数在0.2—0.6之间(硫酸盐)和0.1—0.7之间(硝酸盐);另一项使用加州大学开发的区域空气质量模型的研究结果表明,模拟的PM_{2.5}成分浓度低于实

测浓度 (Mahmud 等, 2010)。卫星 AOD 产品能有效预测近地面 $PM_{2.5}$ 的总浓度 (Hu 等, 2014), 且具有广泛的时空覆盖范围, 但由于大多数的 AOD 产品无法准确区分气溶胶物理和化学特性而无法用于估算 $PM_{2.5}$ 的化学成分。MISR 因其丰富的气溶胶信息, 在研究 $PM_{2.5}$ 的长期时空变化趋势以及 $PM_{2.5}$ 化学成分暴露特征的健康影响方面具有重要优势 (Liu 等, 2007a)。已有研究证明利用 MISR 气溶胶组分信息预测 $PM_{2.5}$ 化学成分的巨大潜力 (Liu 等, 2007b)。Liu 等 (2009b) 已于 2009 年利用 17.6 km 的 MISR AOD 组分信息预测美国 $PM_{2.5}$ 的硫酸盐浓度, 并解释了 70% 的硫酸盐浓度变化。但这个分辨率对于捕捉热源和 $PM_{2.5}$ 化学成分的高空间变异性过于粗糙, 为了反映更精细的空间变化细节, Meng 等 (2018) 等于利用 V23 版 MISR 4.4 km 数据集, 开发了气溶胶微物理特性的统计模型, 成功地捕捉到南加州 4 种 $PM_{2.5}$ 化学成分 (硫酸盐、硝酸盐、OC 和 EC) 的热源和更精细的浓度梯度变化。这一结果表明, MISR 4.4 km 的 AOD 组分数据集为捕捉 $PM_{2.5}$ 化学成分的空间热点和长期变化趋势提供了更多的数据信息。

3.3 激光雷达——CALIOP

CALIOP 搭载于 CALIPSO 卫星, 是一台对偏振光敏感的双波长激光雷达, 能在 0.532 μm 和 1.064 μm 处接收观测对象的后向散射信号, 并于 0.532 μm 处进行偏振观测, 提供白天和夜间的云和气溶胶垂直分布信息 (Holz 等, 2008)。CALIOP 为主动式遥感, 不断发射和接受激光脉冲, 其优势在于能够探测到明亮地表上及薄云层下的气溶胶层, 可同时识别气溶胶、烟尘和卷云等 (Holz 等, 2008)。与 MODIS 等传感器相比, CALIOP 重访周期约为 16 d (Winker 等, 2009), 这表明 CALIOP 每日的空间采样是稀疏的, 如果直接使用 CALIOP 观测值来估算 $PM_{2.5}$, 这将导致不可避免的偏差 (Colarco 等, 2014; Zhang 和 Reid, 2009)。因此, 以往的研究只是将 CALIOP 的垂直分布信息作为辅助变量估算 $PM_{2.5}$ (Glantz 等, 2009; Gong 等, 2017)。鉴于 CALIOP 提供了近地面的气溶胶消光系数, 理论上是一种更接近近地面气溶胶的真实值, 因此, Toth 等 (2019) 考虑是否可以从近地面的 CALIOP AOD 估算 $PM_{2.5}$ 浓度, 利用体积质量模型首次获得了白天和夜间的 $PM_{2.5}$ 浓度, 估

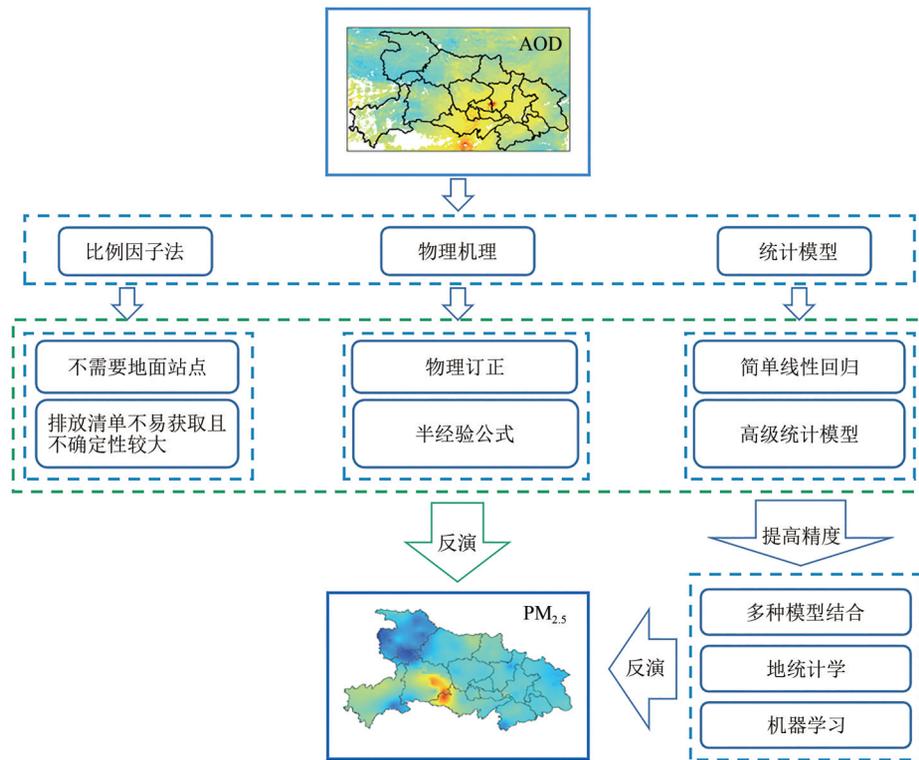
算的 $PM_{2.5}$ 与近地面 $PM_{2.5}$ 的一致性较好 (夜间 R^2 为 0.48), 但白天较低 (R^2 为 0.21); 这表明了 $PM_{2.5}$ 可以从主动遥感的观测中获得, 且具有合理的精度。

3.4 被动式偏振卫星传感器——POLDER

POLDER 是搭载在 Parosol 卫星上的宽视场成像辐射偏光计, 它在 9 个波段进行多角度偏振成像观测, 可提供大气气溶胶以及陆地表面和海洋状况的探测信息 (Deuzé 等, 2001)。POLDER 提供的偏振信息能很容易地区分出大气散射辐射和地表反射辐射的贡献, 大大减小了地表反射率的确定对 AOD 反演的影响 (Deuzé 等, 1993)。Fan 等 (2008) 比较了北京和香河两地的 POLDER AOD (粒子半径 $\leq 0.30 \mu\text{m}$), 结果表明两个数据集之间的斜率和相关性都接近于 1, AOD 均方根为 0.03, 这表明了 POLDER 具有确定区域气溶胶人为贡献的能力。此外, Su 等 (2010) 将陆地表面的 POLDER AOD (粒子半径 $\leq 0.30 \mu\text{m}$) 与东亚 14 个站点的 AERONET AOD 进行比较, 得到了良好的相关性 ($R^2 \approx 0.92$), 研究结果表明, POLDER AOD 产品具有较高的准确性且对细颗粒物具有显著的敏感性。Guo 等 (2016a) 基于 2013 年 1 月至 10 月的 POLDER AOD 数据比较了 4 种估算模型 (线性回归模型、二次回归模型、幂回归模型和对数回归模型) 的 $PM_{2.5}$ 预测能力, 结果表明这 4 种模型交叉验证的相关系数在 0.57—0.64 之间, 仅利用 POLDER AOD 预测浓度较低的 $PM_{2.5}$ 具有重要意义, 特别是农村和偏远地区。Bovchaliuk (2013) 基于 PARASOL AOD 分析了 2005 年至 2013 年期间欧洲每日 $PM_{2.5}$ 浓度的月均结果, 并发现 865 nm 处的 POLDER AOD 与地面 $PM_{2.5}$ 显著相关, 其相关系数为 0.62 (均方根为 3.26)。虽然, 目前大多数的研究主要应用 MODIS AOD 等数据集来预测 $PM_{2.5}$ 浓度, 对近地面精细模态气溶胶敏感的 PARASOL AOD 关注较少, 但已有的研究证明了 POLDER AOD 在估算近地面 $PM_{2.5}$ 浓度中的独特优势 (Su 等, 2010; Guo 等, 2016a)。

4 $PM_{2.5}$ 的估算方法

基于卫星 AOD 的 $PM_{2.5}$ 的估算方法主要有 3 种, 即比例因子法、考虑气溶胶垂直分布和吸湿特性的物理机理模型以及由简单线性回归逐渐发展到机器学习 ML (Machine Learning) 方法的各种统计模型, 如图 1 所示。

图1 PM_{2.5}卫星反演模型分类示意图Fig. 1 Classification of PM_{2.5} satellite retrieve models

4.1 比例因子法

比例因子法利用CTM计算出PM_{2.5}与AOD的比例关系因子，再将比例关系因子与AOD相乘，从而估算近地面PM_{2.5}浓度（Van Donkelaar等，2006）。此方法的优势在于无需地面PM_{2.5}观测数据，直接由卫星AOD即可完成PM_{2.5}的反演，并解释影响PM_{2.5}-AOD关系的多种因素（如AOD的垂直廓线、温度、湿度、风向风速等）。2004年，Liu等（2004）等将全球大气化学模型中的局部比例因子应用于MISR AOD，开发了一种简单而有效的方法来解释影响AOD与PM_{2.5}一致性的因素，其预测值与美国环境保护署EPA（Environmental Protection Agency）的测量值存在较强相关性（ $R=0.81$ ），并表示气溶胶垂直廓线有助于减少对流层下部和上部气溶胶间相关性变化而导致PM_{2.5}估算的不确定性，提高PM_{2.5}的估算能力。Van Donkelaar等（2006）的研究结果表明，气溶胶垂直廓线是影响AOD与PM_{2.5}空间关系的重要因素，忽略这一因素使空间相关性从0.69下降到0.36；另外，Van Donkelaar等（2010）将比例因子法与AOD结合，得到了全球2001年和2006年的近地面PM_{2.5}浓度，全球人口加权的PM_{2.5}几何平均浓度为20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，中

国中东部地区的年均值为80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，验证表明其误差仅为6.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，引发了国际社会的广泛关注。但比例因子法由于其模型结构与模拟过程十分复杂，污染物排放清单等参数不易获取且存在较大不确定性，这往往导致估算的PM_{2.5}精度有限（Liu等，2004；Van Donkelaar等，2006）。

4.2 物理机理

AOD代表的是大气中湿度环境下整层大气的气溶胶光学厚度，而PM_{2.5}是干燥条件下近地面颗粒物在单位体积内的质量浓度，他们之间的相关性受到气溶胶垂直分布和气溶胶吸湿特性的影响（李成才等，2005）。李成才等（2005）首次发展了基于物理机理模型的半经验公式法对AOD进行校正，并详细分析了2004年10月北京的一次地面污染事件形成过程，表明区域传输和地形是这起污染事件的关键因素。基于物理机理，建立卫星AOD与PM_{2.5}的物理关系方程，其优势在于充分考虑部分PM_{2.5}的理化特性，建立准确的PM_{2.5}-AOD关系模型（Koelemeijer等，2006），He等（2016）提出一种基于双层气溶胶模型的垂直校正方法，对RH进行校正后得到PM_{2.5}质量浓度与实测PM_{2.5}浓度相关系数超过0.85。物理机理模型能充分考

虑部分PM_{2.5}的理化特性,但是PM_{2.5}和AOD关系的物理机理比较复杂,且参数的求解需要通过经验统计关系拟合,目前的半经验公式还难以准确地描述二者之间的关系,导致PM_{2.5}的估算结果并不理想(Li等,2016),如Engel-Cox等(2004)等使用雷达观测数据确定边界层高度,对AOD进行校正,结果表明相关系数R仅提高了约5%。

4.3 统计模型

早期对于PM_{2.5}和AOD关系的研究主要是直接将卫星AOD与地面站点的PM_{2.5}质量浓度进行简单的相关性分析,例如2003年,Wang和Christopher(2003)首次对AOD与PM_{2.5}的相关性进行定量分析,发现美国阿拉巴马州杰斐逊县AOD与PM_{2.5}的相关性很高($R=0.7$),并建立了日平均PM_{2.5}与MODIS AOD的线性回归方程;证明了利用AOD估算PM_{2.5}浓度的可行性(Hoff和Christopher,2009)。因此,早期的研究主要关注地面监测站点PM_{2.5}与AOD的线性关系,以此为基础建立二者间的简单线性回归方程,并取得一些较好的结果。另外,AOD与PM_{2.5}的关系容易受气象因子等因素的影响,基于此发展了加入气象因子等多变量的多元线性回归模型(Gupta和Christopher,2009; Song等,2014),它可以更好地描述AOD与PM_{2.5}间的关系。此类简单线性回归模型结构如下列公式所示,式中, X 代表诸如气象因子等辅助变量, β_0 、 β_{AOD} 与 β_X 为回归系数。

$$PM_{2.5} = \beta_0 + \beta_{AOD} \cdot AOD \quad (5)$$

$$PM_{2.5} = \beta_0 + \beta_{AOD} \cdot AOD + \beta_X \cdot X \quad (6)$$

然而,这类方法并不适用于构建大范围研究区的PM_{2.5}-AOD关系,在模型预测精度上存在极大的不确定性,如Engel-Cox等(2004)利用美国地面站点半年的监测数据,首次对全美陆地范围的AOD和PM_{2.5}相关性进行分析,得到了相关系数的全国分布图,结果显示东北部地区相关系数达0.8以上,西北部相关系数则低于0.2。因此,简单线性回归模型不能满足大多数情况下的PM_{2.5}估算研究;此后,许多学者发展了统计模型从不同国家和地区AOD中估算PM_{2.5},其中应用最广泛、反演精度最高的是高级统计模型,如线性混合效应模型LME(Linear Mixed Effects Model)(Lee等,2011)、广义加性模型GAM(Generalized Additive Models)(Paciorek等,2008)、地理加权回归模型

GWR(Geographically Weighted Regression)、地理和时间加权回归模型(GTWR)和机器学习等,这些模型相比简单的线性回归模型有更优的拟合效果和预测精度。

(1) LME。LME是一种较为先进的统计模型,2011年首次应用于PM_{2.5}质量浓度估算(Lee等,2011),在新英格兰地区成功建立了PM_{2.5}-AOD关系,且具有较高的相关系数。Kloog等(2011)将AOD与土地利用数据结合,使用LME模型解释了由于气象条件导致的PM_{2.5}与AOD关系在时间上的变化。LME模型的使用在一定程度上解释了AOD与PM_{2.5}之间的复杂关系,且因其模型结构简单,使用灵活而得到了广泛应用,例如,LME模型已被用于预测美国东北部的PM_{2.5}浓度(Chudnovsky等,2012),且已应用到不同的研究区域,包括美国东南部(Lee等,2016),以色列(Kloog等,2015)以及中国北京及周边城市(Zheng等,2016)等;如Xie等(2015)利用LME估算了北京市2013年3月至2014年4月的日均PM_{2.5}浓度,其结果显示不同监测站点拟合的交叉检验 R^2 为0.75—0.79。LME模型在时间上添加随机效应,以考虑AOD-PM_{2.5}关系的时间异质性,如下列公式所示:

$$PM_{2.5} = (\beta_0 + \beta_{0,t}) + (\beta_{AOD} + \beta_{AOD,t}) \cdot AOD + \beta_X \cdot X \quad (7)$$

式中, β_0 和 β_{AOD} 表示固定效应系数, $\beta_{0,t}$ 和 $\beta_{AOD,t}$ 表示随机效应系数, β_X 表示系统误差,随机效应反映了AOD-PM_{2.5}关系的时间变异性。需要注意的是LME在空间上是全局的,没有考虑AOD-PM_{2.5}关系的空间异质性。

(2) GWR。LME模型在时间维度上具有很强的灵活性,而单时间(小时或天)的GWR模型在空间维度上具有灵活性,它基于局部光滑的思想,将数据的空间位置嵌入回归参数,利用局部加权最小二乘法进行逐点参数回归估计,构建基于AOD的大气PM_{2.5}局部估算模型,其结构如式(8)所示,式中(u_s, v_s)表示空间位置 s 处的坐标,这说明GWR模型的系数随空间位置而变化(Ma等,2014)。Hu(2009)发现了美国相邻地区AOD与PM_{2.5}之间的空间不一致性,利用GWR模型解释了这种空间异质性。之后,GWR模型在美国东南部和 中国等地得到了更新(Hu等,2013)。Ma等(2014)利用GWR模型对中国地区2013年PM_{2.5}浓度进行估算,首次实现了中国地区PM_{2.5}的日均浓

度格网，其模型交叉验证 R^2 为 0.64。Song 等 (2014) 的研究结果表明在中国珠三角地区的 PM_{2.5} 估算中，GWR 模型解释了 73.8% 的 PM_{2.5} 浓度变化。

$$PM_{2.5} = \beta_0(u_s, v_s) + \beta_{AOD}(u_s, v_s) \cdot AOD + \beta_X(u_s, v_s) \cdot X_s \quad (8)$$

(3) GTWR。GTWR 模型基于时空距离和时空权重矩阵同时解决时空不稳定性问题，考虑了 GWR 模型没有考虑的时间依赖性。在 GWR 模型的基础上，融合了时空距离，构建三维坐标，能够同时考虑时空距离对各个变量的影响，能够更有效地应对 PM_{2.5} 的卫星反演问题；它在 GWR 模型结构中加入时间信息 t_s ，如式 (9) 所示，这进一步提高了模型的稳定性 (He 和 Huang, 2018a, 2018b)。Guo 等 (2017) 利用 GTWR 模型将北京 2013 年 4 月—2015 年 3 月 MODIS 3 km 空间分辨率的 AOD 值与地面 PM_{2.5} 进行拟合，结果表明 PM_{2.5} 的相关系数为 0.36—0.75，并提出建立每小时或每天连续的数据集，可有助于提高模型的预测能力。He 和 Huang (2018b) 利用 GTWR 估算日 PM_{2.5} 浓度，结果表明 GTWR 模型显著优于 GWR 模型，也证明了 GTWR 在没有 AOD-PM_{2.5} 配对样本情况下的预测能力；随后，He 和 Huang (2018a) 利用改进的 iGTWR (加入季节特征) 估算京津冀地区的 PM_{2.5} 浓度；对于有 AOD-PM_{2.5} 匹配的天数，其交叉验证 R^2 为 0.82，这与标准的 GTWR 性能相当；同时，iGTWR 在没有 AOD-PM_{2.5} 匹配样本的天数中表现出更好的预测能力，交叉验证 R^2 从 0.24 增加到 0.46。

$$PM_{2.5} = \beta_0(u_s, v_s, t_s) + \beta_{AOD}(u_s, v_s, t_s) \cdot AOD + \beta_X(u_s, v_s, t_s) \cdot X_s \quad (9)$$

(4) GAM。LME 模型和 GWR (GTWR) 模型都基于线性假设而建模，但卫星 AOD 与 PM_{2.5} 具有很强的非线性关系，GAM 模型虽然是简单线性模型的扩展，但是它引入了平滑函数能够很好地解释 AOD-PM_{2.5} 的非线性关系，其模型结构如式 (10) 所示， $S_{AOD}()$ 与 $S_X()$ 表示 AOD 与辅助变量的非线性函数 (Zou 等, 2017)。Paciorek 等 (2008) 使用 GAM 模型发现 RH、PBLH、PM_{2.5} 监测数据和 AOD 之间存在非线性关系。Liu 等 (2009a) 利用同样的模型方法，对 AOD 与气象变量应用了平滑函数，预测美国东北部的 PM_{2.5} 浓度，得到了较好的预测结果；Sorek-Hamer 等 (2013) 利用线性回归 (LR)、GAM 和多元自适应回归模型 (MARS) 估算 PM_{2.5} 质量浓度，结果表明简单的

LRs 在美国西部的相关性较差 ($R^2=0.2$)，GAM 和 MARS 的表现都优于简单的 LR，GAM 的反演效果最好 ($R^2=0.61$)。

$$PM_{2.5} = \beta_0 + S_{AOD}(AOD) + S_X(X) \quad (10)$$

(5) ML。由于 PM_{2.5} 浓度与诸多因素有关，如气象、土地利用类型、人口和路网等，这些因素增加了传统统计模型估算 PM_{2.5} 的难度；另外，卫星 AOD 与 PM_{2.5} 具有很强的非线性关系，而机器学习的优势在于强大的非线性描述能力。因此，机器学习是近年来 PM_{2.5} 估算研究的热点 (Gupta 和 Christopher, 2009; Brokamp 等, 2018; de Hoogh 等, 2018; Park 等, 2020)。2009 年，神经网络 NN (Neural Network) 被率先应用于 PM_{2.5} 估算，其模型性能相比传统的统计模型有很大的提高 (Gupta 和 Christopher, 2009)；随机森林 RF (Random Forest) (Brokamp 等, 2018)、支持向量机 SVM (Support Vector Machine) (de Hoogh 等, 2018) 和深度学习 DL (Deep Learning) (Park 等, 2020) 等机器学习模型也受到广泛应用。如 Wu 等 (2012) 利用贝叶斯正则化训练人工神经网络 ANN (Artificial Neural Network) 来估算中国东部的 PM_{2.5} 浓度；Li 等 (2017b) 在全国范围内利用广义回归神经网络 GRNN (Generalized Regression Neural Network) 估算了 2013 年—2014 年的 PM_{2.5}，并与传统的统计模型 (线性回归模型和多元线性回归) 进行比较，结果表明，GRNN 模型的预测性能由于传统统计模型。机器学习通常是用于描述数值间的对应关系，忽略了环境变量间的地理相关性。基于此，Li 等 (2017a) 考虑了 PM_{2.5} 的地理距离和时空相关性开发了地理智能深度学习模型；与原始深度学习模型相比，加入 PM_{2.5} 地理相关性后的模型精度显著提高， R^2 从 0.42 增加到 0.88；随后，Li 等 (2020) 同时考虑了 AOD-PM_{2.5} 关系的非线性和时空异质性，开发了基于地理和时间加权的神经网络 GTWNNs (Geographically and Temporally Weighted GRNN)，模型结构如图 2 所示。与以往的时空统计模型 (GWR 和 GTWR) 相比，GTWNNs 表现出良好的预测性能。

(6) 多种模型结合。AOD 和 PM_{2.5} 的关系具有时间和空间的复杂变化，只用一种模型难以兼顾这种复杂的时空变化，不能清晰地从机理上解释这些因素是如何通过影响颗粒物的消光特性来影响 AOD 和 PM_{2.5} 的相关性 (Hidy 等, 2012)，因此，

为了提高精度有研究将两种以上的模型相结合,以同时反映在时间和空间上的AOD-PM_{2.5}关系变化。如Hu等(2014)利用二阶高级模型(LME+GWR)估算了美国东南部2013年的PM_{2.5}质量浓度,研究结果显示第二级模型有效提高了第一级模型的精度, R^2 由0.66提高到0.69;Liang等(2018)开发了3层级高级预测模型预测了北京地区2004年—2014年的PM_{2.5}分布情况,第一级模型利用LME模型反映AOD-PM_{2.5}时间分布,第二级模

型利用GAM模型,采用平滑函数以反映模型空间上的连续性变异,第三级模型则是利用带有外部漂移的克里金法KED(Kriging with External Drift)插值前两级模型得到的PM_{2.5}残差,获得整个研究区上的残差,利用3层级模型预测,显著地改善了PM_{2.5}在空间覆盖上不足的问题,使得北京及周边地区11年的平均年度覆盖率从177天增加到279天,且精度较高。

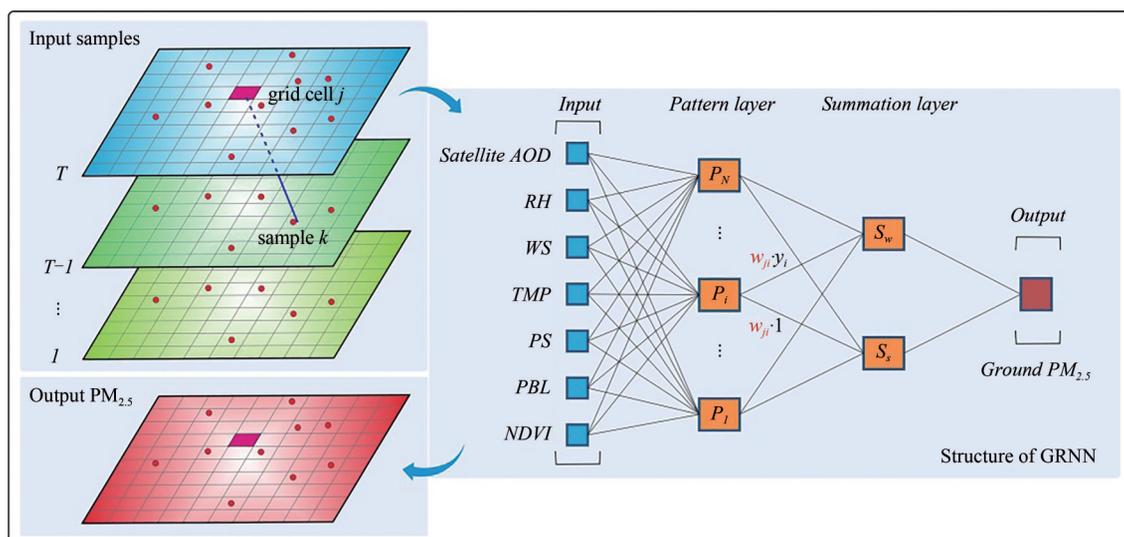


图2 GTW-GRNN模型示意图(Li等,2020)

Fig. 2 GTW-GRNN Model(Li et al.,2020)

比例因子法、物理机理模型和简单线性回归这3种方法均能在不同时期不同程度准确地估算PM_{2.5}质量浓度,代表了那个时期较为前沿的研究热点,但是这3种方法各有不足(表2)。比例因子法无需地面PM_{2.5}观测数据即可完成反演,但由于所需参数(自然或人为排放源清单)不完整或不易获取,造成该方法的准确性稍差;物理机理模型充分考虑了PM_{2.5}的理化特性,但缺点是需要进行先验假设,且一些参数(垂直廓线)在实际应用中不易获取,使用范围有一定的局限性;对于简单线性回归来说,它直接将卫星AOD与地面PM_{2.5}进行相关性分析,模型结构过于简单,无法准确描述AOD-PM_{2.5}的复杂关系。以上方法目前的应用较少,较为流行的是GWR、GTWR、LME和机器学习等统计模型,尤其是机器学习近年来取得飞速发展(Li等,2017a,2020);机器学习模型因其强大的非线性拟合能力而被广泛使用

(Gupta和Christopher,2009;Brokamp等,2018;de Hoogh等,2018;Park等,2020),但它对AOD-PM_{2.5}关系的物理机理和时空异质性考虑不足,倘若能够发展同时兼顾二者的机器学习模型,这将是一个新的发展趋势。

5 PM_{2.5}反演存在的问题

5.1 非随机缺失问题

常用的卫星传感器都可以较为准确地反演AOD产品,并获得比地面站点测量更广泛的空间观测信息(Yao和Lu,2014),但卫星AOD产品也存在一定的局限性。在空间覆盖方面,卫星AOD会受到云、高地表反照率(例如,冰和雪)(Levy等,2010)或沙漠和高浓度PM_{2.5}污染(Tao等,2012)的影响而缺失(图3);在时间覆盖方面,极轨卫星(如MODIS等)只能在过境时间对AOD进行采样,每天只有一次或两次(不在多云或积

雪区域) (Remer 等, 2005)。这种局限性会造成估算的PM_{2.5}数据缺失, 影响PM_{2.5}估算模型精度、空气质量评估和流行病学研究等 (Zeger 等, 2000)。很多学者做了相关研究以解决卫星 AOD 的局限问

题, 方法大致可分为两类: 一类是对卫星 AOD 进行融合填补; 一类是对地面站点的PM_{2.5}数据进行融合或插值填补。

表 2 PM_{2.5}估算模型的优势及不足

Table 2 Advantages and disadvantages of PM_{2.5} estimation model

模型	优势	不足	
比例因子法	无需地面PM _{2.5} 观测数据即可完成反演	模型结构与模拟过程十分复杂, 污染物排放清单不易获取	
物理机理	充分考虑了PM _{2.5} 的理化特性	需要进行先验假设, 垂直廓线等参数不易获取	
简单线性回归	结构简单, 易于实现	结构过于简单, 难以描述复杂关系	
统计模型	高级统计模型	可描述AOD-PM _{2.5} 关系的时间或时空异质性	基于线性假设, 无法描述AOD-PM _{2.5} 关系的非线性特征
	机器学习	具备强大的非线性描述能力	对物理特性和地理相关性考虑不足

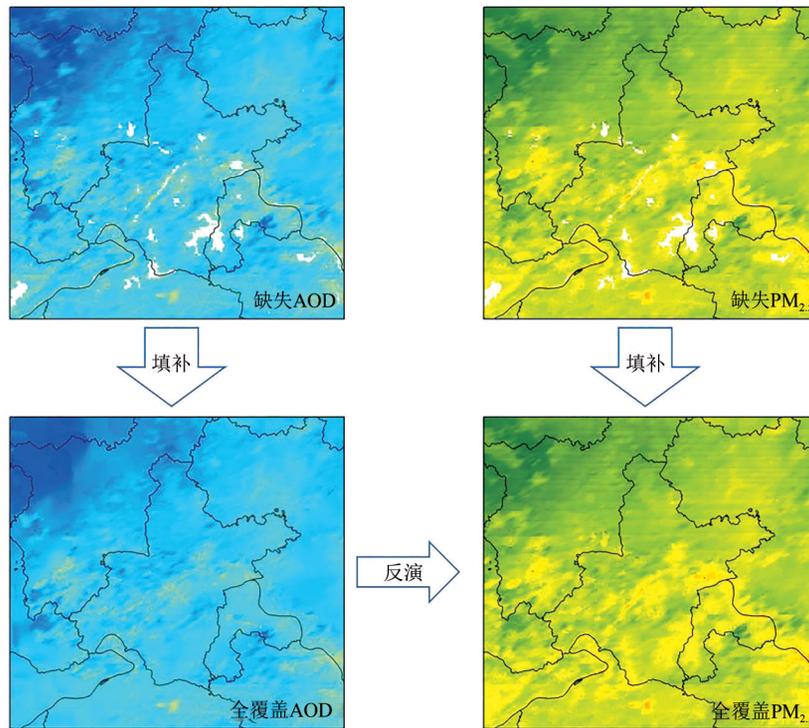


图 3 PM_{2.5}缺失数据填补示意图

Fig. 3 Schematic of PM_{2.5} data reconstruction

5.1.1 卫星 AOD 产品融合填补

对卫星 AOD 产品进行融合的方法主要有算法改进或合并、统计回归和机器学习及空间插值等。其中空间插值最早应用于 AOD 数据的融合填补, 它适用于小范围的缺失情况 (Ma 等, 2014)。Ma 等 (2016) 采用逆方差加权 (IVW) 的平均融合方法对 AOD 进行加权平均融合, 其融合后的 AOD 平均覆盖率提高了 80.6%; 考虑到多种 AOD 产品间的互补性, Wang 等 (2019b) 利用算法合并的

方法融合多种传感器的 AOD 产品及相同传感器不同算法的 AOD 产品, AOD 覆盖率增加了 123.9%; Van Donkelaar 等 (2011) 在极端事件 (莫斯科火灾) 期间的研究中, 采用算法改进放宽云过滤标准后检测的 AOD 显著提高了覆盖率, 增加了 21% 左右。机器学习近年来发展为主流方法, 通过构建 AOD 与其他辅助变量间的关系, 以对缺失区域的 AOD 数据进行预测, 如 Bi 等 (2019) 基于 RF 模型加入 MODIS 的云和雪特征分数和气象变量融合 AOD, 得到了全覆盖的 AOD 产品。

5.1.2 PM_{2.5}数据填补

对于PM_{2.5}数据的填补方法主要有两类：空间平滑插值方法和星地融合方法。空间平滑最早由(Kloog等, 2011, 2012)提出, 它通过构建AOD有效值与区域(或建立缓冲区)均值及空间位置的半参数回归方程对缺失数据进行预测; 但由于只利用了空间信息仅适用于缺失区域小的地区。空间插值可以有效利用已知数据估算邻近区域的未知值, 被广泛应用于空气污染研究中, 如Liang等(2017)利用克里金插值的方法在华北建立了10 km分辨率的PM_{2.5}日数据, 插值方法提供了高精度的PM_{2.5}浓度数据, 且华北地区的地面监测网络密度较大, 利用插值技术可得到可靠的预测结果。星地融合方法(Li等, 2018)即以卫星时空信息融合的思想(通过融合遥感数据高空间分辨率和高时间分辨率的特征, 以实现高空间分辨率数据在时间上的连续性(张良培和沈焕峰, 2016))为基础, 将卫星反演的PM_{2.5}数据与地面插值结果进行融合, 填补缺失信息。

5.2 反演模型精度

早期研究主要利用简单线性回归、比例因子法及物理机理等模型方法对PM_{2.5}进行反演, 这些方法在能在一定程度上准确估算PM_{2.5}质量浓度(Wang和Christopher, 2003; Van Donkelaar等, 2006; He等, 2016)。但由于其模型精度有限, 估算模型的应用发展受到了限制。如Engel-Cox等(2004)利用简单线性回归模型, 首次对全美陆地范围内的AOD和PM_{2.5}相关性进行研究, 得到了相关系数的全国分布图, 结果显示东北部地区相关系数达0.8以上, 西北部则低于0.2。可见简单的线性回归模型仅适用于特定的研究区, 当研究区范围过大时, 反演精度降低, 影响近地面的PM_{2.5}质量浓度反演。比例因子法和物理机理模型可解释多种如垂直廓线及湿度等参数的影响, 但由于所需的输入参数不完整或不易获取且需要先验假设(物理机理), 在应用上存在一定局限性, 如王静等(2010)的研究结果表明经垂直廓线订正后的AOD与地面PM_{2.5}的相关系数 R^2 虽有提高, 但提高幅度有限仅提高到0.61; Engel-Cox等(2004)使用雷达观测数据确定边界层高度, 利用其对AOD进行校正, 仅将模型精度提高了约5%。

随着PM_{2.5}估算研究的快速发展, 有学者不满

于早期估算模型的反演精度, 发展了高精度的统计模型及机器学习方法(Xie等, 2015; Guo等2017; Li等, 2018)。发展至今, PM_{2.5}常用的估算模型主要为高级统计模型和机器学习, 它们同时考虑影响AOD-PM_{2.5}关系的多种因素, 能从时间维度及空间维度更好地解释二者的复杂关系, 实现PM_{2.5}浓度的高精度反演(Xie等, 2015; Guo等2017; Li等, 2018)。然而, 目前存在的问题即为反演精度已到达一定高度, 难以进一步突破。各高级统计模型达到的反演精度范围如表3所示。

表3 各统计模型精度

Table 3 Accuracy of each statistical models

模型	研究区域	R^2	文献
LME	中国、美国	0.75—0.92	Xie等(2015); Lee等(2011)
GWR	中国、美国	0.79—0.82	Hu等(2013); Hu(2009)
GTWR	中国	0.75—0.82	Guo等(2017); He等(2018a, 2018b)
GAM	美国	0.79	Liu等(2009a)
ML	中国	0.88	Li等(2017a, 2017b, 2018)

5.3 PM_{2.5}化学成分估算

尽管PM_{2.5}卫星遥感的估算研究已发展到一定高度, 但以往对PM_{2.5}的反演研究主要是针对近地面总的PM_{2.5}浓度, 很少考虑到PM_{2.5}中化学成分对人体及大气环境的影响(Hu等, 2014; Liang等, 2018; Hoogh等, 2018)。越来越多的空气质量检测数据表明, 许多有毒物质在细颗粒物中累积, 这时的细颗粒物具有更高的氧化能力, 能穿透上皮细胞破坏线粒体对健康产生影响(Song等, 2017)。PM_{2.5}化学成分复杂, 由于不同的排放源、化学反应、物理作用及传输过程等, 导致其成分在时间和空间上都会发生变化, 但这种变化可提供有价值的信息, 确定特定来源的贡献(Kahn等, 2015)。已有研究使用卫星观测和化学传输模型绘制了气溶胶类型及组分的空间分布图, 这有助于阐明颗粒物成分的暴露负担(Lelieveld等, 2015)。虽然PM_{2.5}的化学成分可能与观察到的心血管健康影响有关, 但目前还没有足够的PM_{2.5}长期组分特征来评估特定的健康影响(Lepeule等, 2012)。近年来, 已有学者利用卫星AOD产品的组分信息对PM_{2.5}的化学成分进行估算(Liu等, 2007a, 2007b), 虽已成功捕捉到近地面PM_{2.5}化学成分(硫酸盐、硝酸盐、OC和EC)的热源及较精细的浓度梯度变

化 (Liu 等, 2007a, 2007b), 但由于使用的 AOD 产品分辨率较粗, 难以反映近地面更精细化的变化趋势。

6 结 语

PM_{2.5}作为一种环境污染物已经严重危害到大气环境和人类健康, 准确获取近地面 PM_{2.5}总浓度及各化学成分的时空分布有助于空气质量评估和流行病学的研究。基于卫星遥感的 PM_{2.5}估算研究经过十几年的快速发展, 已经取得了可观的成果。本文主要从估算的基本方法原理、主流的卫星 AOD 产品及估算模型等方面综述 PM_{2.5}浓度估算的研究进展。当前, 大气 PM_{2.5}的估算研究仍然是国内外研究的热点, 其未来的研究方向大致可为:

(1) PM_{2.5}的卫星遥感估算研究已经取得很大的进展, 但关于其精细化尺度上的研究仍有诸多不足。随着卫星遥感技术的发展, 新型的高空间 (如风云四号、高分五号)、高时间分辨率 (Himawari-8/-9) 卫星在 PM_{2.5}的精细化估算研究上具有很大优势。中国计划于“十四五”期间, 国控点位数量从 1436 个增加至 2000 个左右; 地面低成本的小传感器监测也已发展起来并成为 PM_{2.5}反演研究的热点之一 (Huang 等, 2019; Xu 等, 2019)。这些都为精细化尺度的 AOD-PM_{2.5}关系建模提供了大量的数据支持。同时, 随着大气探测技术的发展, 星载、机载及地基激光雷达都能够获取垂直分布信息, 搭载在无人机上的颗粒物传感器可实现 PM_{2.5}垂直方向上的监测 (Peng 等, 2015), 将其与光学遥感卫星数据及地面监测数据结合, 构建 PM_{2.5}的三维立体监测。

(2) 重建缺失的 AOD 数据对于有效提升卫星监测大气 PM_{2.5}的能力具有重要意义。目前使用的 4 种 AOD 数据融合方法, 都能不同程度地提高 AOD 的空间覆盖率, 同时也能保持 AOD 的精度甚至提高数据精度。但是在某些方面仍存在不足: 算法合并难以统一不同 AOD 产品的不确定性, 算法改进仅适用于特定的地区 (Van Donkelaar 等, 2011; Wang 等, 2019b); 插值方法无论是在 AOD 还是 PM_{2.5}中, 都没有考虑气溶胶或 PM_{2.5}浓度在时间上的变化, 只是依靠缺失像元与邻近像元的空间关系进行插值, 其准确性有限 (Ma 等, 2016)。未来在 AOD 和 PM_{2.5}缺失值融合填补方面的研究中需同时考虑时间及空间上的变化, 发展融合填补

的高精度先进模型, 为大气 PM_{2.5}的反演研究提供准确而有力的数据支持。

(3) PM_{2.5}化学成分信息对于分析污染成因、暴露特征等尤其重要, 其时空变化趋势研究是一个重要的发展方向 (Lelieveld 等, 2015)。化学传输模型模拟 PM_{2.5}组分信息、卫星遥感估算及地面监测是当前 PM_{2.5}组分信息研究的主要方法 (Van Donkelaar 等, 2019)。但是, 地面 PM_{2.5}组分观测网仍不完善, 如何克服卫星遥感估算中对地面站网的依赖, 实现 PM_{2.5}化学成分的高精度反演需要进一步研究。

(4) AOD-PM_{2.5}的关系具有时间和空间上的复杂变化, 单一模型难以兼顾这种复杂的时空变化 (Hidy 等, 2012)。因此, 综合考虑各先进模型的时间及空间精度优势, 将两种及两种以上的先进模型相结合, 发挥不同先进模型的优势, 同时在时间维度和空间维度上反映 AOD-PM_{2.5}的关系变化。另外, 机器学习近年来已发展为国内外 PM_{2.5}反演的研究热点 (Gupta 和 Christopher, 2009; Brokamp 等, 2018; de Hoogh 等, 2018; Park 等, 2020), 但它对 AOD-PM_{2.5}关系的物理机理和时空异质性考虑尚显不足, 目前在这方面的研究也尚少, 未来中如何训练好 PM_{2.5}物理关系的正则化约束条件, 构建准确的物理约束机器学习模型, 有待进一步研究。倘若能发展同时兼顾二者的机器学习模型, 这将是一个新的发展趋势。

参考文献 (References)

- Bassan P, Kohler A, Martens H, Lee J, Byrne H J, Dumas P, Gazi E, Brown M, Clarke N and Gardner P. 2010. Resonant mie scattering (RMieS) correction of infrared spectra from highly scattering biological samples. *Analyst*, 135(2): 268-277 [DOI: 10.1039/B921056C]
- Bi J Z, Belle J H, Wang Y J, Lyapustin A I, Wildani A and Liu Y. 2019. Impacts of snow and cloud covers on satellite-derived PM_{2.5} levels. *Remote Sensing of Environment*, 221: 665-674 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.002]
- Bilal M, Nazeer M and Nichol J E. 2017. Validation of MODIS and VIIRS derived aerosol optical depth over complex coastal waters. *Atmospheric Research*, 186: 43-50 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.11.009]
- Bovchaliuk A. 2013. The spatial variability of PM_{2.5} over Europe using satellite POLDER-3/PARASOL data. *Advances in Astronomy and Space Physics*, 3(2): 102-108 [DOI: <https://www.researchgate.net/>]

- publication/259658657]
- Brokamp C, Jandarov R, Hossain M and Ryan P. 2018. Predicting daily urban fine particulate matter concentrations using a random forest model. *Environmental Science and Technology*, 52(7): 4173-4179 [DOI: 10.1021/acs.est.7b05381]
- Cao J J, Shen Z X, Chow J C, Watson J G, Lee S C, Tie X X, Ho K F, Wang G H and Han Y M. 2012. Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 62(10): 1214-1226 [DOI: 10.1080/10962247.2012.701193]
- Chudnovsky A A, Kostinski A, Lyapustin A and Koutrakis P. 2013. Spatial scales of pollution from variable resolution satellite imaging. *Environmental Pollution*, 172: 131-138 [DOI: 10.1016/j.envpol.2012.08.016]
- Chudnovsky A A, Lee H J, Kostinski A, Kotlov T and Koutrakis P. 2012. Prediction of daily fine particulate matter concentrations using aerosol optical depth retrievals from the geostationary operational environmental satellite (GOES). *Journal of the Air and Waste Management Association*, 62(9): 1022-1031 [DOI: 10.1080/10962247.2012.695321]
- Colarco P R, Kahn R A, Remer L A and Levy R C. 2014. Impact of satellite viewing-swath width on global and regional aerosol optical thickness statistics and trends. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7): 2313-2335 [DOI: 10.5194/amt-7-2313-2014]
- Collaud Coen M, Andrews E, Asmi A, Baltensperger U, Bukowiecki N, Day D, Fiebig M, Fjaeraa A M, Flentje H, Hyvärinen A, Jefferson A, Jennings S G, Kouvarakis G, Lihavainen H, Lund Myhre C, Malm W C, Mihapopoulos N, Molenaar J V, O'Dowd C, Ogren J A, Schichtel B A, Sheridan P, Virkkula A, Weingartner E, Weller R and Laj P. 2013. Aerosol decadal trends-part 1: in-situ optical measurements at GAW and IMPROVE stations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(2): 869-894 [DOI: 10.5194/acp-13-869-2013]
- de Hoogh K, Héritier H, Stafoggia M, Künzli N and Kloog I. 2018. Modelling daily PM_{2.5} concentrations at high spatio-temporal resolution across Switzerland. *Environmental Pollution*, 233: 1147-1154 [DOI: 10.1016/j.envpol.2017.10.025]
- Deuzé J L, Bréon F M, Deschamps P Y, Devaux C, Herman M, Po-daire A and Roujean J L. 1993. Analysis of the POLDER (POLarization and directionality of earth's reflectances) airborne instrument observations over land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 45(2): 137-154 [DOI: 10.1016/0034-4257(93)90038-Y]
- Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, Goloub P, Herman M, Lafrance B, Maignan F, Marchand A, Nadal F, Perry G and Tanré D. 2001. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D5): 4913-4926 [DOI: 10.1029/2000JD900364]
- Engel-Cox J A, Holloman C H, Coutant B W and Hoff R M. 2004. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmospheric Environment*, 38(16): 2495-2509 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.01.039]
- Fan X H, Goloub P, Deuzé J L, Chen H B, Zhang W X, Tanré D and Li Z Q. 2008. Evaluation of PARASOL aerosol retrieval over north east Asia. *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 697-707 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.010]
- Franklin M, Kalashnikova O V and Garay M J. 2017. Size-resolved particulate matter concentrations derived from 4.4 km-resolution size-fractionated multi-angle imaging SpectroRadiometer (MISR) aerosol optical depth over southern California. *Remote Sensing of Environment*, 196: 312-323 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.002]
- Garay M J, Kalashnikova O V and Bull M A. 2017. Development and assessment of a higher-spatial-resolution (4.4 km) MISR aerosol optical depth product using AERONET-DRAGON data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(8): 5095-5106 [DOI: 10.5194/acp-17-5095-2017]
- Garay M J, Witek M L, Kahn R A, Seidel F C, Limbacher J A, Bull M A, Diner D J, Hansen E G, Kalashnikova O V, Lee H, Nastan A M and Yu Y. 2020. Introducing the 4.4 km spatial resolution multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) aerosol product. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(2): 593-628 [DOI: 10.5194/amt-13-593-2020]
- Glantz P, Kokhanovsky A, von Hoyningen-Huene W and Johansson C. 2009. Estimating PM_{2.5} over southern Sweden using space-borne optical measurements. *Atmospheric Environment*, 43(36): 5838-5846 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.05.017]
- Gong W, Huang Y S, Zhang T H, Zhu Z M, Ji Y X and Xiang H. 2017. Impact and suggestion of column-to-surface vertical correction scheme on the relationship between satellite AOD and ground-level PM_{2.5} in China. *Remote Sensing*, 9(10): 1038 [DOI: 10.3390/rs9101038]
- Guo H, Cheng T H, Gu X F, Chen H, Wang Y, Zheng F J and Xiang K S. 2016a. Comparison of four ground-level PM_{2.5} estimation models using PARASOL aerosol optical depth data from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(2): 180 [DOI: 10.3390/ijerph13020180]
- Guo J P, Deng M J, Lee S S, Wang F, Li Z Q, Zhai P M, Liu H, Lv W T, Yao W and Li X W. 2016b. Delaying precipitation and lightning by air pollution over the pearl river delta. Part I: observational analyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(11): 6472-6488 [DOI: 10.1002/2015JD023257]
- Guo Y X, Tang Q H, Gong D Y and Zhang Z Y. 2017. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model. *Remote Sensing of Environment*, 198: 140-149 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.001]
- Gupta P and Christopher S A. 2009. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: 2. A neural network approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D20): D20205 [DOI: 10.1029/2008JD011497]

- Hand J L and Malm W C. 2007. Review of aerosol mass scattering efficiencies from ground-based measurements since 1990. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D16): D16203 [DOI: 10.1029/2007JD008484]
- He Q Q and Huang B. 2018a. Satellite-based high-resolution PM_{2.5} estimation over the Beijing-Tianjin-Hebei region of China using an improved geographically and temporally weighted regression model. *Environmental Pollution*, 236: 1027-1037 [DOI: 10.1016/j.envpol.2018.01.053]
- He Q Q and Huang B. 2018b. Satellite-based mapping of daily high-resolution ground PM_{2.5} in China via space-time regression modeling. *Remote Sensing of Environment*, 206: 72-83 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.018]
- He Q S, Li C C, Geng F H, Zhou G Q, Gao W, Yu W, Li Z K and Du M B. 2016. A parameterization scheme of aerosol vertical distribution for surface-level visibility retrieval from satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 181: 1-13 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.016]
- Hidy G M, Brook J R, Chow J C, Green M, Husar R B, Lee C, Scheffe R D, Swanson A, and Watson J G. 2012. Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised land?. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(10): 1130-1139 [DOI: 10.3155/1047-3289.59.10.1130]
- Hoff R M and Christopher S A. 2009. Remote sensing of particulate pollution from space: have we reached the promised land? *Journal of the Air and Waste Management Association*, 59(6): 645-675 [DOI: 10.3155/1047-3289.59.6.645]
- Holz R E, Ackerman S A, Nagle F W, Frey R, Dutcher S, Kuehn R E, Vaughan M A and Baum B. 2008. Global moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) cloud detection and height evaluation using CALIOP. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D8): D00A19 [DOI: 10.1029/2008JD009837]
- Hsu N C, Lee J, Sayer A M, Kim W, Bettenhausen C and Tsay S C. 2019. VIIRS deep blue aerosol products over land: extending the EOS long-term aerosol data records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(7): 4026-4053 [DOI: 10.1029/2018JD029688]
- Huang K Y, Bi J Z, Meng X, Geng G N, Lyapustin A, Lane K J, Gu D F, Kinney P L and Liu Y. 2019. Estimating daily PM_{2.5} concentrations in New York City at the neighborhood-scale: implications for integrating non-regulatory measurements. *Science of the Total Environment*, 697: 134094 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134094]
- Hu X F, Waller L A, Al-Hamdan M Z, Crosson W L, Estes Jr M G, Estes S M, Quattrocchi D A, Sarnat J A and Liu Y. 2013. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern U.S. using geographically weighted regression. *Environmental Research*, 121: 1-10 [DOI: 10.1016/j.envres.2012.11.003]
- Hu X F, Waller L A, Lyapustin A, Wang Y J, Al-Hamdan M Z, Crosson W L, Estes Jr M G, Estes S M, Quattrocchi D A, Puttaswamy S J and Liu Y. 2014. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern United States using MAIAC AOD retrievals and a two-stage model. *Remote Sensing of Environment*, 140: 220-232 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.032]
- Hu Z Y. 2009. Spatial analysis of MODIS aerosol optical depth, PM_{2.5}, and chronic coronary heart disease. *International Journal of Health Geographics*, 8: 27 [DOI: 10.1186/1476-072X-8-27]
- Jeffrey I. Steinfeld. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Global Change*. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 40:7. 26. [DOI: 10.1080/00139157.1999.10544295]
- Kahn R A and Gaitley B J. 2015. An analysis of global aerosol type as retrieved by MISR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120: 4248 - 4281 [DOI: 10.1002/2015JD023322]
- Kahn R, Banerjee P and McDonald D. 2001. Sensitivity of multiangle imaging to natural mixtures of aerosols over ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16): 18219-18238 [DOI: 10.1029/2000JD900497]
- Kahn R, Banerjee P, McDonald D and Diner D J. 1998. Sensitivity of multiangle imaging to aerosol optical depth and to pure-particle size distribution and composition over ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24): 32195-32213 [DOI: 10.1029/98JD01752]
- Kaufman Y J, Gobron N, Pinty B, Widlowski J L and Verstraete M M. 2002. Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm - theory. *Geophysical Research Letters*, 29(23): 31-1-31-4 [DOI: 10.1029/2001GL014492]
- Kloog I, Koutrakis P, Coull B A, Lee H J and Schwartz J. 2011. Assessing temporally and spatially resolved PM_{2.5} exposures for epidemiological studies using satellite aerosol optical depth measurements. *Atmospheric Environment*, 45(35): 6267-6275 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.08.066]
- Kloog I, Nordio F, Coull B A and Schwartz J. 2012. Incorporating local land use regression and satellite aerosol optical depth in a hybrid model of spatiotemporal PM_{2.5} exposures in the Mid-Atlantic states. *Environmental Science and Technology*, 46(21): 11913-11921 [DOI: 10.1021/es302673e]
- Kloog I, Sorek-Hamer M, Lyapustin A, Coull B, Wang Y J, Just A C, Schwartz J and Broday D M. 2015. Estimating daily PM_{2.5} and PM₁₀ across the complex geo-climate region of Israel using MAIAC satellite-based AOD data. *Atmospheric Environment*, 122: 409-416 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.004]
- Koelemeijer R B A, Homan C D and Matthijsen J. 2006. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmospheric Environment*, 40(27): 5304-5315 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.044]
- Lee H J, Liu Y, Coull B A, Schwartz J and Koutrakis P. 2011. A novel calibration approach of MODIS AOD data to predict PM_{2.5} concentrations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(15): 7991-8002 [DOI: 10.5194/acp-11-7991-2011]
- Lee M, Kloog I, Chudnovsky A, Lyapustin A, Wang Y J, Melly S, Coull B, Koutrakis P and Schwartz J. 2016. Spatiotemporal pre-

- diction of fine particulate matter using high-resolution satellite images in the southeastern US 2003-2011. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 26(4): 377-384 [DOI: 10.1038/jes.2015.41]
- Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, Giannadaki D and Pozzer A. 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525(7569): 367-371 [DOI: 10.1038/nature15371]
- Lepeule J, Laden F, Dockery D and Schwartz J. 2012. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard six cities study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, 120(7): 965-970 [DOI: 10.1289/ehp.1104660]
- Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, Mattoo S, Ichoku C, Kahn R and Eck T F. 2010. Global evaluation of the collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(21): 10399-10420 [DOI: 10.5194/acp-10-10399-2010]
- Liang F C, Gao M, Xiao Q Y, Carmichael G R, Pan X C and Liu Y. 2017. Evaluation of a data fusion approach to estimate daily $PM_{2.5}$ levels in North China. *Environmental Research*, 158: 54-60 [DOI: 10.1016/j.envres.2017.06.001]
- Liang F C, Xiao Q Y, Wang Y J, Lyapustin A, Li G X, Gu D F, Pan X C and Liu Y. 2018. MAIAC-based long-term spatiotemporal trends of $PM_{2.5}$ in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 616-617: 1589-1598 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.155]
- Li C C, Mao J T, Lau A K H, Yuan Z B, Wang M H and Liu X Y. 2005. Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 48 (S2): 209-219 (李成才, 毛节泰, 刘启汉, 袁自冰, 王美华 刘晓阳. 2005. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 35(S1): 177-186) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2005.z1.017]
- Li S, Kahn R, Chin M, Garay M J and Liu Y. 2015. Improving satellite-retrieved aerosol microphysical properties using GOCART data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3): 1157-1171 [DOI: 10.5194/amt-8-1157-2015]
- Li S S, Garay M J, Chen L F, Rees E and Liu Y. 2013. Comparison of GEOS-chem aerosol optical depth with AERONET and MISR data over the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19): 11228-11241 [DOI: 10.1002/jgrd.50867]
- Li T W, Shen H F, Yuan Q Q and Zhang L P. 2020. Geographically and temporally weighted neural networks for satellite-based mapping of ground-level $PM_{2.5}$. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167: 178-188 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.06.019]
- Li T W, Shen H F, Yuan Q Q, Zhang X C and Zhang L P. 2017a. Estimating ground-level $PM_{2.5}$ by fusing satellite and station observations: a geo-intelligent deep learning approach. *Geophysical Research Letters*, 44(23): 11985-11993 [DOI: 10.1002/2017GL075710]
- Li T W, Shen H F, Zeng C, Yuan Q Q and Zhang L P. 2017b. Point-surface fusion of station measurements and satellite observations for mapping $PM_{2.5}$ distribution in China: methods and assessment. *Atmospheric Environment*, 152: 477-489 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.004]
- Li T W, Zhang C Y, Shen H F, Yuan Q Q and Zhang L P. 2018. Real-time and seamless monitoring of ground-level $PM_{2.5}$ using satellite remote sensing. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-3: 143-147 [DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-3-143-2018]
- Liu Y, Koutrakis P and Kahn R. 2007a. Estimating fine particulate matter component concentrations and size distributions using satellite-retrieved fractional aerosol optical depth: part 1—method development. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(11): 1351-1359 [DOI: 10.3155/1047-3289.57.11.1351]
- Liu Y, Koutrakis P, Kahn R, Turquety S and Yantosca R M. 2007b. Estimating fine particulate matter component concentrations and size distributions using satellite-retrieved fractional aerosol optical depth: part 2—a case study. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(11): 1360-1369 [DOI: 10.3155/1047-3289.57.11.1360]
- Liu Y, Paciorek C J and Koutrakis P. 2009a. Estimating regional spatial and temporal variability of $PM_{2.5}$ concentrations using satellite data, meteorology, and land use information. *Environmental Health Perspectives*, 117(6): 886-892 [DOI: 10.1289/ehp.0800123]
- Liu Y, Park R J, Jacob D J, Li Q B, Kilaru V and Sarnat J A. 2004. Mapping annual mean ground-level $PM_{2.5}$ concentrations using multiangle imaging spectroradiometer aerosol optical thickness over the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D22): D22206 [DOI: 10.1029/2004JD005025]
- Liu Y, Schichtel B A and Koutrakis P. 2009b. Estimating particle sulfate concentrations using MISR retrieved aerosol properties. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2(3): 176-184 [DOI: 10.1109/JSTARS.2009.2030153]
- Li X B, Xu Q S, Wei H L and Hu H L. 2008. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration. *Acta Optica Sinica*, 28(9): 1655-1658 (李学彬, 徐青山, 魏合理 胡欢陵. 2008. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究. *光学学报*, 28(9): 1655-1658) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-2239.2008.09.005]
- Li Z Q, Zhang Y, Shao J, Li B S, Hong J, Liu D, Li D H, Wei P, Li W, Li L, Zhang F X, Guo J, Deng Q, Wang B X, Cui C L, Zhang W C, Wang Z Z, Lv Y, Xu H, Chen X F, Li L and Qie L L. 2016. Remote sensing of atmospheric particulate mass of dry $PM_{2.5}$ near the ground: method validation using ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 173: 59-68 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.019]
- Lu X C, Yao T, Fung J C H and Lin C Q. 2016. Estimation of health and economic costs of air pollution over the Pearl River Delta re-

- gion in China. *Science of the Total Environment*, 566-567: 134-143 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.060]
- Lv Y, Fu Y, Xin S G and Wang Y. 2017. PM_{2.5} for the harm to the human body [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 46(6):618-620 (吕勇, 付玉, 辛士刚, 王莹. 2017. PM_{2.5}对人体的危害[J]. *辽宁化工*, 46(6): 618-620) [DOI: 10.14029/j.cnki.issn1004-0935.2017.06.034]
- Lyapustin A, Martonchik J, Wang Y J, Laszlo I and Korokin S. 2011a. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D3): D03210 [DOI: 10.1029/2010JD014985]
- Lyapustin A, Wang Y J, Korokin S and Huang D. 2018. MODIS collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5741-5765 [DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018]
- Lyapustin A, Wang Y, Laszlo I, Kahn R, Korokin S, Remer L, Levy R and Reid J S. 2011b. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D3): D03211 [DOI: 10.1029/2010JD014986]
- Mahmud A, Hixson M, Hu J, Zhao Z, Chen S H and Kleeman M J. 2010. Climate impact on airborne particulate matter concentrations in California using seven year analysis periods. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(22): 11097-11114 [DOI: 10.5194/acp-10-11097-2010]
- Ma Z W, Hu X F, Huang L, Bi J and Liu Y. 2014. Estimating ground-level PM_{2.5} in China using satellite remote sensing. *Environmental Science and Technology*, 48(13): 7436-7444 [DOI: 10.1021/es5009399]
- Ma Z W, Liu Y, Zhao Q Y, Liu M M, Zhou Y C and Bi J. 2016. Satellite-derived high resolution PM_{2.5} concentrations in Yangtze River Delta region of China using improved linear mixed effects model. *Atmospheric Environment*, 133: 156-164 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.040]
- Meng X, Garay M J, Diner D J, Kalashnikova O V, Xu J and Liu Y. 2018. Estimating PM_{2.5} speciation concentrations using prototype 4.4 km-resolution MISR aerosol properties over southern California. *Atmospheric Environment*, 181: 70-81 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.019]
- Mhawish A, Banerjee T, Broday D M, Misra A and Tripathi S N. 2017. Evaluation of MODIS collection 6 aerosol retrieval algorithms over Indo-Gangetic Plain: implications of aerosols types and mass loading. *Remote Sensing of Environment*, 201: 297-313 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.016]
- Moon T, Wang Y, Liu Y, and Yu B. 2015. Evaluation of a MISR-based high-resolution aerosol retrieval method using AERONET DRAGON campaign data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(8): 4328-4339. [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2395722]
- Nussenzweig H M and Wiscombe W J. 1980. Efficiency factors in mie scattering. *Physical Review Letters*, 45(18): 1490-1494 [DOI: 10.1103/PhysRevLett.45.1490]
- Omar A H, Winker D M, Tackett J L, Giles D M, Kar J, Liu Z, Vaughan M A, Powell K A and Trepte C R. 2013. CALIOP and AERONET aerosol optical depth comparisons: one size fits none. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10): 4748-4766 [DOI: 10.1002/jgrd.50330]
- Paciorek C J, Liu Y, Moreno-Macias H and Kondragunt S. 2008. Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth retrievals and ground-level PM_{2.5}. *Environmental Science and Technology*, 42(15): 5800-5806 [DOI: 10.1021/es703181j]
- Park Y, Kwon B, Heo J, Hu X F, Liu Y and Moon T. 2020. Estimating PM_{2.5} concentration of the conterminous United States via interpretable convolutional neural networks. *Environmental Pollution*, 256: 113395 [DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113395]
- Peng Z R, Wang D S, Wang Z Y, Gao Y and Lu S J. 2015. A study of vertical distribution patterns of PM_{2.5} concentrations based on ambient monitoring with unmanned aerial vehicles: a case in Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 123: 357-369 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.074]
- Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, Calle E E, Krewski D, Ito K and Thurston G D. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *The Journal of the American Medical Association*, 287(9): 1132-1141 [DOI: 10.1001/jama.287.9.1132]
- Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, Mattoo S, Chu D A, Martins J V, Li R R, Ichoku C, Levy R C, Kleidman R G, Eck T F, Vermote E, and Holben B N. 2005. The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4): 947-973. [DOI:10.1175/JAS3385.1]
- Remer L A, Mattoo S, Levy R C and Munchak L. 2013. MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 6: 69-112 [DOI: 10.5194/amt-6-69-2013]
- Saldiva P H N, Clarke R W, Coull B A, Stearns R C, Lawrence J, Murthy G G K, Diaz E, Koutrakis P, Suh H, Tsuda A and Godleski J J. 2002. Lung inflammation induced by concentrated ambient air particles is related to particle composition. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 165(12): 1610-1617 [DOI: 10.1164/rccm.2106102]
- Salwa K, Hassan, Mamdouh I, Khoder. 2017. Chemical characteristics of atmospheric PM_{2.5} loads during air pollution episodes in Giza, Egypt. *Atmospheric Environment*, 150: 346-355 [DOI:10.1016/j.atmosenv.2016.11.026]
- Smyth S C, Jiang W M, Roth H, Moran M D, Makar P A, Yang F Q, Bouchet V S and Landry H. 2009. A comparative performance evaluation of the AURAMS and CMAQ air-quality modelling systems. *Atmospheric Environment*, 43(5): 1059-1070 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.11.027]
- Song C B, He J J, Wu L, Jin T S, Chen X, Li R P, Ren P P, Zhang L and Mao H J. 2017. Health burden attributable to ambient PM_{2.5} in China. *Environmental Pollution*, 223: 575-586 [DOI: 10.1016/j.

- envpol.2017.01.060]
- Song W Z, Jia H F, Huang J F and Zhang Y Y. 2014. A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM_{2.5} estimation over the Pearl River Delta region in China. *Remote Sensing of Environment*, 154: 1-7 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.008]
- Sorek-Hamer M, Strawa A W, Chatfield R B, Esswein R, Cohen A and Broday D M. 2013. Improved retrieval of PM_{2.5} from satellite data products using non-linear methods. *Environmental Pollution*, 182: 417-423 [DOI: 10.1016/j.envpol.2013.08.002]
- Su X, Goloub P, Chiapello I, Chen H, Ducos F and Li Z. 2010. Aerosol variability over east Asia as seen by POLDER space-borne sensors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D24): D24215 [DOI: 10.1029/2010JD014286]
- Tang Y M, Deng R R, Liu Y M and Xiong L H. 2018. Research review of remote sensing for atmospheric aerosol retrieval. *Remote Sensing Technology and Application*, 33(1): 25-34 (汤玉明, 邓孺孺, 刘永明, 熊龙海. 2018. 大气气溶胶遥感反演研究综述. *遥感技术与应用*, 33(1): 25-34) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2018.1.0025]
- Tao M H, Chen L F, Su L and Tao J H. 2012. Satellite observation of regional haze pollution over the North China Plain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D12): D12203 [DOI: 10.1029/2012JD017915]
- Tao M H, Chen L F, Wang Z F, Tao J H and Su L. 2013. Satellite observation of abnormal yellow haze clouds over East China during summer agricultural burning season. *Atmospheric Environment*, 79: 632-640 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.033]
- Tao M H, Chen L F, Wang Z F, Tao J H, Che H Z, Wang X H and Wang Y. 2015. Comparison and evaluation of the MODIS Collection 6 aerosol data in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(14): 6992-7005 [DOI: 10.1002/2015JD023360]
- Tao M H, Chen L F, Wang Z F, Wang J, Che H Z, Xu X G, Wang W C, Tao J H, Zhu H and Hou C. 2017. Evaluation of MODIS deep blue aerosol algorithm in desert region of East Asia: ground validation and intercomparison. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(19): 10357-10368 [DOI: 10.1002/2017JD026976]
- Tao M H, Wang J, Li R, Chen L F, Xu X G, Wang L C, Tao J H, Wang Z F and Xiang J. 2020. Characterization of aerosol type over east Asia by 4.4 km MISR product: first insight and general performance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(13): e2019JD031909 [DOI: 10.1029/2019JD031909]
- Tao M H, Wang J, Li R, Wang L L, Wang L C, Wang Z F, Tao J H, Che H Z and Chen L F. 2019. Performance of MODIS high-resolution MAIAC aerosol algorithm in China: characterization and limitation. *Atmospheric Environment*, 213: 159-169 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.06.004]
- Tian J, Chen D. 2010. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 114(2):221-229. [DOI:10.1016/j.rse.2009.09.011]
- Toth T D, Zhang J L, Reid J S and Vaughan M A. 2019. A bulk-mass-modeling-based method for retrieving particulate matter pollution using CALIOP observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(3): 1739-1754 [DOI: 10.5194/amt-12-1739-2019]
- Tsai T C, Jeng Y J, Chu D A, Chen J P and Chang S C. 2011. Analysis of the relationship between MODIS aerosol optical depth and particulate matter from 2006 to 2008. *Atmospheric Environment*, 45(27): 4777-4788 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.10.006]
- Van Donkelaar A, Martin R V and Park R J. 2006. Estimating ground-level PM_{2.5} using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D21): D21201 [DOI: 10.1029/2005JD006996]
- Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, Kahn R, Levy R, Verduzco C and Villeneuve P J. 2010. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environmental Health Perspectives*, 118(6): 847-855 [DOI: 10.1289/ehp.0901623]
- Van Donkelaar A, Martin R V, Levy R C, da Silva A M, Krzyzanowski M, Chubarova N E, Semutnikova E and Cohen A J. 2011. Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: a case study of the Moscow fires in 2010. *Atmospheric Environment*, 45(34): 6225-6232 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.07.068]
- Van Donkelaar A, Martin R V, Li C and Burnett R T. 2019. Regional estimates of chemical composition of fine particulate matter using a combined geoscience-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental Science and Technology*, 53(5): 2595-2611 [DOI: 10.1021/acs.est.8b06392]
- Wang J, Aegerter C, Xu X G and Szykman J J. 2016. Potential application of VIIRS day/night band for monitoring nighttime surface PM_{2.5} air quality from space. *Atmospheric Environment*, 124: 55-63 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.013]
- Wang J and Christopher S A. 2003. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5,m} mass: implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 30(21): 2095 [DOI: 10.1029/2003GL018174]
- Wang J, Yang F M, Wang D Y and He K B. 2010. Characteristics and relationship of aerosol optical thickness and PM_{2.5} concentration over Beijing. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 27(1): 10-16 (王静, 杨复沫, 王鼎益, 贺克斌. 2010. 北京市MODIS气溶胶光学厚度和PM_{2.5}质量浓度的特征及其相关性. *中国科学院研究生院学报*, 27(1): 10-16)
- Wang W, Mao F Y, Du L, Pan Z X, Gong W and Fang S H. 2017. Deriving hourly PM_{2.5} concentrations from himawari-8 AODs over Beijing-Tianjin-Hebei in China. *Remote Sensing*, 9(8): 858 [DOI: 10.3390/rs9080858]
- Wang X M, Chen W H, Chen D H, Wu Z Y, and Fan Q. 2016. Long-term trends of fine particulate matter and chemical composition in the Pearl River Delta Economic Zone (PRDEZ), China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(1): 53-62 [DOI: 10.1007/s11783-014-0728-z]

- Wang X P, Sun W B, Zheng K N, Ren X Y and Han P W. 2020. Estimating hourly PM_{2.5} concentrations using MODIS 3 km AOD and an improved spatiotemporal model over Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Atmospheric Environment*, 222: 117089 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117089]
- Wang Y, Yuan Q Q, Li T W, Shen H F, Zheng L and Zhang L P. 2019a. Evaluation and comparison of MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth against AERONET over regions in China with multifarious underlying surfaces. *Atmospheric Environment*, 200: 280-301 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.023]
- Wang Y, Yuan Q Q, Li T W, Shen H F, Zheng L and Zhang L P. 2019b. Large-scale MODIS AOD products recovery: spatial-temporal hybrid fusion considering aerosol variation mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 157: 1-12 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.08.017]
- Wang Z F, Chen L F, Tao J H, Zhang Y and Su L. 2010. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 50-63 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.009]
- Wei J, Li Z Q, Peng Y R and Sun L. 2019. MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison. *Atmospheric Environment*, 201: 428-440 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.004]
- Winker D M, Vaughan M A, Omar A, Hu Y X, Powell K A, Liu Z Y, Hunt W H and Young S A. 2009. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(11): 2310-2323 [DOI: 10.1175/2009JTECHA1281.1]
- Wu Y R, Guo J P, Zhang X Y, Tian X, Zhang J H, Wang Y Q, Duan J and Li X W. 2012. Synergy of satellite and ground based observations in estimation of particulate matter in Eastern China. *Science of the Total Environment*, 433: 20-30 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.033]
- Xie Y Y, Wang Y Y, Zhang K, Dong W H, Lv B L and Bai Y Q. 2015. Daily estimation of ground-level PM_{2.5} concentrations over Beijing using 3 km resolution MODIS AOD. *Environmental Science and Technology*, 49(20): 12280-12288 [DOI: 10.1021/acs.est.5b01413]
- Xu S, Zou B, Lin Y, Zhao X G, Li S X and Hu C X. 2019. Strategies of method selection for fine-scale PM_{2.5} mapping in an intra-urban area using crowdsourced monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(5): 2933-2948 [DOI: 10.5194/amt-12-2933-2019]
- Yahya K, Zhang Y and Vukovich J M. 2014. Real-time air quality forecasting over the southeastern United States using WRF/Chem-MADRID: multiple-year assessment and sensitivity studies. *Atmospheric Environment*, 92: 318-338 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.04.024]
- Yamamoto G and Tanaka M. 1969. Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements. *Applied Optics*, 8(2): 447-453 [DOI: 10.1364/AO.8.000447]
- Yao F, Si M L, Li W F and Wu J S. 2018. A multidimensional comparison between MODIS and VIIRS AOD in estimating ground-level PM_{2.5} concentrations over a heavily polluted region in China. *Science of the Total Environment*, 618: 819-828 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.209]
- Yao F, Wu J S, Li W F and Peng J. 2019. A spatially structured adaptive two-stage model for retrieving ground-level PM_{2.5} concentrations from VIIRS AOD in China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151: 263-276 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.011]
- Yao L and Lu N. 2014. Spatiotemporal distribution and short-term trends of particulate matter concentration over China, 2006—2010. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(16): 9665-9675 [DOI: 10.1007/s11356-014-2996-3]
- Yu J H, Yu T, Wei Q, Wang X, Shi J G and Li H J. 2004. Characteristics of mass concentration variations of PM₁₀ and PM_{2.5} in Beijing Area. *Research of Environmental Sciences*, 17(1): 45-47 (于建华, 虞统, 魏强, 王欣, 时建纲, 李海军. 2004. 北京地区PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度的变化特征. *环境科学研究*, 17(1): 45-47) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-6929.2004.01.010]
- Yumimoto K, Nagao T M, Kikuchi M, Sekiyama T T, Murakami H, Tanaka T Y, Ogi A, Irie H, Khatri P, Okumura H, Arai K, Morino I, Uchino O and Maki T. 2016. Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation geostationary meteorological satellite. *Geophysical Research Letters*, 43(11): 5886-5894 [DOI: 10.1002/2016GL069298]
- Zang L, Mao F Y, Guo J P, Gong W, Wang W and Pan Z X. 2018. Estimating hourly PM₁ concentrations from Himawari-8 aerosol optical depth in China. *Environmental Pollution*, 241: 654-663 [DOI: 10.1016/j.envpol.2018.05.100]
- Zeger S L, Thomas D, Dominici F, Samet JM, Schwartz J, Dockery D, Cohen A. 2000. Exposure measurement error in time-series studies of air pollution: concepts and consequences. *Environmental Health Perspectives*, 108: 419e426 [DOI: 10.1289/ehp.00108419]
- Zhang J and Reid J S. 2006. MODIS aerosol product analysis for data assimilation: Assessment of over-ocean level 2 aerosol optical thickness retrievals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D22) [DOI: 10.1029/2005JD006898]
- Zhang J L and Reid J S. 2009. An analysis of clear sky and contextual biases using an operational over ocean MODIS aerosol product. *Geophysical Research Letters*, 36(15): L15824 [DOI: 10.1029/2009GL038723]
- Zhang L P and Shen H F. 2016. Progress and future of remote sensing data fusion. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1050-1061 (张良培, 沈焕锋. 2016. 遥感数据融合的进展与前瞻. *遥感学报*, 20(5): 1050-1061) [DOI: 10.11834/jrs.20166243]
- Zhang T X, Zang L, Wan Y C, Wang W and Zhang Y. 2019. Ground-level PM_{2.5} estimation over urban agglomerations in China with high spatiotemporal resolution based on Himawari-8. *Science of the Total Environment*, 676: 535-544 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.299]
- Zhang Z L, Chang L Y, Lau A K H, Chan T C, Chieh Chuang Y, Chan

- J, Lin C Q, Kai Jiang W, Dear K, Zee B C Y, Yeoh E K, Hoek G, Tam T and Qian Lao X. 2017. Satellite-based estimates of long-term exposure to fine particulate matter are associated with C-reactive protein in 30 034 Taiwanese adults. *International Journal of Epidemiology*, 46(4): 1126-1136 [DOI: 10.1093/ije/dyx069]
- Zhao X R, Shi H Q, Yu H and Yang P L. 2016. Inversion of nighttime $PM_{2.5}$ mass concentration in Beijing based on the viirs day-night band. *Atmosphere*, 7(10): 136 [DOI: 10.3390/atmos7100136]
- Zheng Y X, Zhang Q, Liu Y, Geng G N and He K B. 2016. Estimating ground-level $PM_{2.5}$ concentrations over three megalopolises in China using satellite-derived aerosol optical depth measurements. *Atmospheric Environment*, 124: 232-242 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.06.046]
- Zou B, Chen J E, Zhai L, Fang X, and Zheng Z. 2017. Satellite based mapping of ground $PM_{2.5}$ concentration using generalized additive modeling. *Remote Sensing*, 9(1): 1. [DOI:10.3390/rs9010001]

Progress of near-surface $PM_{2.5}$ concentration retrieve based on satellite remote sensing

XIANG Juan¹, TAO Minghui¹, GUO Ling², CHEN Liangfu³, TAO Jinhua³, GUI Lu¹

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430000, China;
2. Tianjin Meteorological Service, Tianjin 127563, China;
3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) is a dynamic and complex mixture of particle matter with an aerodynamic diameter equal or less than $2.5 \mu m$ that can seriously affect the air quality and public health. High spatial and temporal resolution $PM_{2.5}$ data is a basic requirement for public health risk assessment and epidemiological research. Compared with ground-based datasets, satellite remote sensing provides continuous, wide space coverage and low-cost observation, and the $PM_{2.5}$ mass concentrations retrieval based on the satellite aerosol optical depth (AOD) has become a popular topic. This paper systematically scrutinizes the research on the near-surface $PM_{2.5}$ concentration retrieved based on satellite AOD products. The basic method of estimating the $PM_{2.5}$ concentration based on satellite AOD products is introduced, and the main satellite AOD products used for $PM_{2.5}$ retrieval and their accuracy are described in detail. The existing $PM_{2.5}$ estimation methods and their pros and cons are also discussed. Finally, the problems identified in $PM_{2.5}$ retrieval research and the development direction of $PM_{2.5}$ retrieval research are presented in the future.

The scale factor method and the physical mechanism and statistical models can accurately estimate the $PM_{2.5}$ concentrations at different degrees in different periods, but the scale factor method and the physical mechanism model are less used than the statistical model because of their limitations. Statistical models have been widely used and improved due to their unique descriptive ability of temporal or spatiotemporal heterogeneity and strong nonlinear description ability. However, the current $PM_{2.5}$ retrieve research has three main limitations: 1. the non-random missing problem of satellite AOD causes missing $PM_{2.5}$ data; 2. inaccuracy of retrieval models, and 3. Poor chemical composition estimation of $PM_{2.5}$. Therefore, to accurately reveal the spatial and temporal trends of near-ground $PM_{2.5}$ and improve the accuracy of the near-ground $PM_{2.5}$ calculated from satellite AOD products, we predict several future research directions. First, the AOD products of new high-spatial-resolution (such as FY-4 and GF-5) and high-temporal-resolution (HIMAWARI-8/-9) satellites could greatly promote the research on $PM_{2.5}$ estimation, which is of great significance to the reconstruction of $PM_{2.5}$ concentrations with high spatial-temporal resolutions. Second, with the development of atmospheric detection technology, satellite-based, airborne, and ground-based lidar can obtain vertical distribution information, and the particle matter sensor carried on UAVs can achieve the vertical monitoring of $PM_{2.5}$, which can be combined with optical remote sensing satellite and ground monitoring data to achieve three-dimensional $PM_{2.5}$ concentration retrieval. Finally, $PM_{2.5}$ chemical component information is particularly important for analyzing the cause of pollution and exposure characteristics, and its space-time change trend research is an important development direction. However, the ground $PM_{2.5}$ component observation network is still imperfect, and overcoming the dependence on ground station network in satellite remote sensing estimation and achieving the high-precision retrieval of chemical composition need further study.

This study is helpful in further understanding the principles, advantages, and disadvantages of different $PM_{2.5}$ estimation methods, providing inspiration for the new development direction of near-surface $PM_{2.5}$ concentrations retrieval based on satellite AOD products, and improving the accuracy and spatial-temporal resolution of near-surface $PM_{2.5}$ concentrations retrieval.

Key words: $PM_{2.5}$, satellite remote sensing, AOD, estimation methods

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41871262); Key Points of the National Natural Science Foundation of China (No. 41830109)