

徐州市 GF-1 卫星气溶胶光学厚度反演与空间特征分析

薛兴盛¹, 郑 硕^{1*}, 白 杨², 吴艳兰¹

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475001)

摘 要: 目前, 基于国内外发射的各种卫星传感器观测数据的陆地气溶胶光学厚度 (AOD) 反演方法与应用研究已相对成熟。然而, 针对我国国产高空间分辨率 (如高分一号) 卫星数据的城市小区域尺度的反演与应用则相对较少。因此, 选择使用深蓝算法对我国重要的工业型城市——徐州市进行国产 GF-1 WFV 数据 AOD 反演与空间特征分析, 并利用地基 AERONET 同期数据进行反演结果验证。研究结果显示, 2015—2017 年 6 期的徐州市 AOD 整体空间格局稳定, 均以人口聚集的城区呈高值分布为特征, 不随季节变化, 说明该地区空气污染源极可能以城市人为排放为主; 与 AERONET 站点同期数据的相关性分析与时序分析结果表明, 基于 GF-1 WFV 高空间分辨率卫星数据的徐州市 AOD 反演结果质量良好。建议今后在大数据支撑下, 应充分利用时空数据融合及机器学习等先进技术手段, 弥补受云覆盖影响下单时间窗口 GF-1 卫星数据 AOD 反演的缺陷, 以期达到国产高分卫星的更高时间、更高空间分辨率以及实时监测与预测的更高业务目标。

关键词: 高分一号; 气溶胶光学厚度; 深蓝算法; 空间特征; 徐州市

中图分类号: X16; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)04-0689-08

Aerosol optical depth retrieval and spatial characteristics analysis of GF-1 satellite in Xuzhou

XUE Xingsheng¹, ZHENG Shuo¹, BAI Yang², WU Yanlan¹

(1. School of Resources and Environment Engineering, Anhui University, Hefei 230601;

2. The College of Environment and Planning of Henan University, Kaifeng 475001)

Abstract: At present, research on aerosol optical depth (AOD) retrieval over land and application is relatively mature, based on observational data from various sensors aboard domestic and foreign satellites. However, the studies of domestic satellite data with high spatial resolution (e.g. GF-1) in the urban or small area scale are few. Here, we selected Deep Blue algorithm for AOD retrieval of GF-1 WFV data and analyze AOD spatial characteristics of Xuzhou city which is one of important industrial city in China. Then, AERONET synchronous data were used for verifying retrieval results. The results showed that: the overall spatial pattern of AOD is stable in Xuzhou during six periods from 2015 to 2017 characterized by population in dense, urban areas with high values and does not change with seasons, which indicated that the main source of air pollution in this area is probably urban man-made discharge; Relevance analysis and time series analysis with AERONET data proved that AOD retrieval of GF-1 in Xuzhou city has good quality. Therefore, we suggested that some advanced technologies, such as spatio-temporal data fusion and machine learning, can supply the gap of AOD retrieval of GF-1 in single time window influenced by cloud cover, so that it can be expected to achieve the higher temporal and spatial resolution, real-time monitoring and prediction of domestic high-resolution satellites.

Key words: GF-1; AOD; Deep Blue algorithm; spatial characteristics; Xuzhou city

近年来, 随着我国经济不断快速的发展, 大气污染问题日益凸显, 引起了政府和社会各界的广泛关注。区域大气污染中, 气溶胶污染由于其对地球

气候变化、大气能见度和人体健康的影响受到了国内外学者的广泛关注^[1]。由于气溶胶分布具有高时空变异性, 现有的地面环境监测站点难以对大范围

收稿日期: 2018-09-03

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (1808085QD115), 安徽大学科研启动金 (J01003228) 和安徽省科技重大专项 (18030801111) 共同资助。

作者简介: 薛兴盛, 硕士研究生。E-mail: XXS6437xiaobai@163.com

* 通信作者: 郑 硕, 博士, 讲师。E-mail: xyzheng0407@163.com

区域进行有效的空间覆盖监测,而卫星遥感能够提供长时序及大范围气溶胶空间连续分布和变化信息,弥补了地面监测在空间上的不足^[2]。

气溶胶是指悬浮在地球大气中,具有一定稳定性,粒径范围在 $10^{-3}\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间的固体、液体微粒与大气组成的混合体系。气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)作为气溶胶最重要的参数之一,是指介质的消光系数在垂直方向上的积分,用以描述气溶胶对光的削弱作用,是表征大气浑浊度的关键物理量。国内外学者从20世纪70年代开始,开展了基于各种卫星传感器的AOD反演研究,70年代中期Griggs和Mekler最先利用搭载在ERTS-1卫星上的MSS(multispectral scanner)传感器进行气溶胶反演研究^[3-4],搭载在TIROS-N卫星上的AVHRR是世界上第一个用于业务化反演AOD产品的卫星传感器^[5]。随着传感器性能的不断升级,分别搭载于Orb View-2卫星的SeaWiFS(sea-viewing wide field-of-view sensor)、Terra和Aqua卫星的MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、Terra卫星的MISR(multi-angle imaging spectroradiometer)、PARASOL卫星的POLDER(POLarization and directionality of the earth reflectance)、国产环境一号(HJ-1)CCD(charge coupled device)和高分一号卫星(GF-1)WFV(wide field viewing)数据等,均可用于气溶胶的反演研究^[6-14]。目前,基于卫星遥感反演AOD较常用且较成熟的方法有暗像元法(dark dense vegetation, DDV)^[15-19]和深蓝算法(deep blue, DB)^[20-25]。暗像元法又称为浓密植被法,其原理是对于由稠密植被、湿土壤及水体覆盖区等统称为的暗像元,利用红蓝波段具有较小的地表反射率的特点,构建暗像元在红、蓝波段的线性关系,从表观反射率去除地表贡献,进而得到AOD。暗像元法在上述国内外卫星传感器的遥感反演研究中也取得了很好的应用效果^[26-30]。深蓝算法其原理则是对于植被覆盖率低的城市、沙漠等亮像元,利用蓝波段地表反射较弱和大气反射较强的特点,通过模拟蓝波段地表反射率实现对AOD的反演。Hsu等^[20]利用现有的邻近研究区的地表反射率替代当日的真实地表反射率构建地表反射率数据库,进行AOD的反演。王中挺等^[25]在此基础上采用MODIS地表反射率数据构建地表反射率数据库,利用深蓝算法基于国产HJ-1 CCD数据实现了北京地区的AOD反演。

相比之前以国外中低分辨率的卫星数据为主的研究,现阶段针对国产高分辨率卫星数据的城市区

域AOD反演研究相对较少。GF-1卫星于2013年4月发射成功,是国家高分辨率对地观测系统的首发星。GF-1有效载荷2台高分辨率全色多光谱相机,空间分辨率分别为2 m和8 m,4台中分辨率多光谱相机,空间分辨率为16 m,4台相机组合幅宽可达800 km,重访周期为4 d^[31]。目前,少数利用GF-1卫星遥感数据开展的气溶胶反演研究集中于京津冀、长三角和珠三角等重点经济工业区,而对于正处于中等发展水平且经济快速增长的城市大气气溶胶遥感监测相对更少。因此,本研究基于GF-1卫星WFV 16 m空间分辨率数据,以苏北重要能源型城市——徐州市为研究区,利用深蓝算法反演该城市及周边AOD,使用NASA全球气溶胶自动观测网(aerosol robotic network, AERONET)地基观测站点数据同位对比与验证反演结果,并结合空气质量数据进行时空特征研究。以期为经济快速增长的工业城市大气污染监测提供新的遥感实例,同时对于推广国产卫星在城市、气象和林业监测等领域的应用也具有一定意义。

1 数据与方法

1.1 研究区

选择江苏省徐州市($33^{\circ}43'N\sim 34^{\circ}58'N$, $116^{\circ}22'E\sim 118^{\circ}40'E$)为研究区,徐州位于苏、鲁、豫、皖四省交界地区,是淮海经济区的中心,中国第二大铁路枢纽。徐州面积 $1\ 125\ \text{km}^2$,地形以平原为主,中东部地区有少数丘陵与山地,海拔一般在 $100\sim 200\ \text{m}$ (图1),属暖温带半湿润季风季候,四季分明,雨热同期。徐州作为我国重要的煤炭产地、华东地区的电力基地,地区资源富集且综合条件优越,境内驻有国有大型企业和中煤建设公司。然而,随着经济的快速发展,徐州地区工业化的不断加剧与城市交通压力的加重,也不可避免地造成严重的大气环境污染。

1.2 数据使用

1.2.1 数据收集 本研究所用数据包括:GF-1卫星WFV 16m数据、全球200 m分辨率DEM数据、MODIS数据地表反射率产品(MOD09A1)、AERONET站点数据(XuZhou-CUMT)、徐州市行政区划及大气污染点源数据。如表1所示,通过遥感集市数据中心(<http://www.rscloudmart.com/>)获取徐州地区2013—2017年26景晴空少云条件下的GF-1卫星WFV数据。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)官网(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)

gov/) 获取与 GF-1 卫星 WFV 数据同期的徐州地区 MODIS 数据地表反射率产品 (MOD09A1)。AERONET 网络获取 XuZhou-CUMT 站点 (中心坐标: 34.217°N, 117.142°E) 全自动太阳光度计 CE-318

监测数据。此外, 选择徐州市对应研究时间内空气质量数据和气象数据, 空气质量数据来源于天气后报网 (<http://www.tianqihoubao.com/aqi/>)。

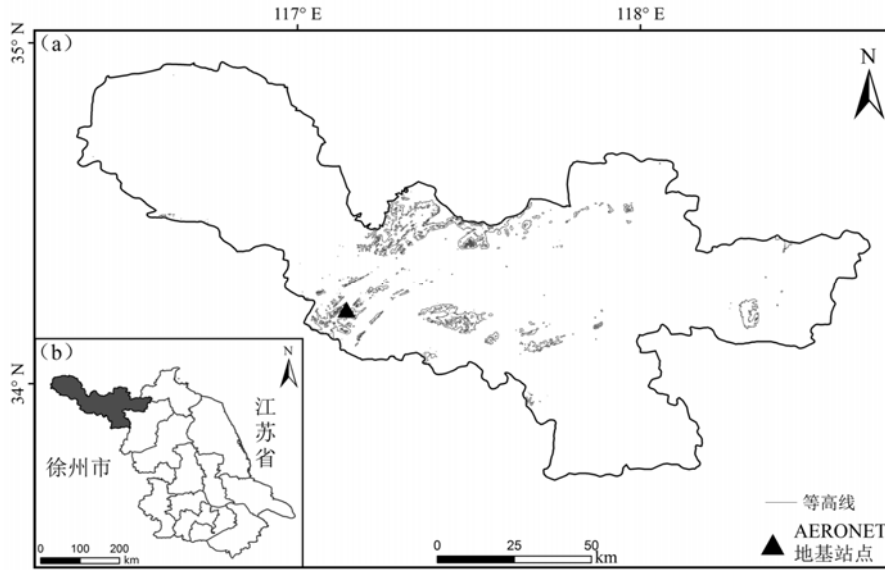


图 1 徐州市地形与 AERONET 站点位置

Figure 1 The topographic features and AERONET site location of Xuzhou city

表 1 GF-1 卫星 WFV 元数据信息

Table 1 GF-1 satellite WFV metadata information

序号 Sequence number	时间 Time	相机 Camera	云量/% Cloud	序号 Sequence number	时间 Time	相机 Camera	云量/% Cloud
1	2013-09-03	WFV3	0	14	2016-04-13	WFV3	1
2	2013-10-06	WFV4	1	15	2016-04-21	WFV2	5
3	2013-11-26	WFV1	0	16	2016-04-30	WFV4	0
4	2014-03-20	WFV1	3	17	2016-05-03	WFV1	0
5	2014-11-05	WFV2	5	18	2016-05-04	WFV3	0
6	2015-05-13	WFV3	0	19	2016-05-16	WFV3	0
7	2015-07-13	WFV1	5	20	2016-09-08	WFV3	2
8	2015-08-03	WFV3	0	21	2017-02-27	WFV3	0
9	2015-10-12	WFV4	0	22	2017-04-18	WFV4	0
10	2015-10-20	WFV4	0	23	2017-04-30	WFV4	0
11	2015-11-02	WFV3	2	24	2017-05-07	WFV2	0
12	2015-12-04	WFV3	0	25	2017-05-12	WFV4	1
13	2016-02-24	WFV3	3	26	2017-05-16	WFV3	0

1.2.2 数据预处理 GF-1 卫星 WFV 数据的预处理过程, 主要包括辐射定标, 表观反射率计算, 太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角和观测方位角计算, 云检测, 镶嵌, 重采样以及裁剪。首先, 根据中国资源卫星应用中心提供的 GF-1 卫星辐射定标系数和太阳辐照度值对 GF-1 卫星 WFV 数据进行辐射定标, 将 DN 值转换成表观反射率, 计算公式分别为:

$$L(\lambda) = Gain \times DN + Bias \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\pi \times L(\lambda) \times d^2}{E_{SUN} \times \cos \theta} \quad (2)$$

(1) 与 (2) 式中, Gain 为定标系数增益; $L(\lambda)$ 为定标后的辐亮度 ($W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$); 为卫星载荷观测值; Bias 为定标系数偏移量; ρ 为表观反射率; d 为天文单位的日地距离; E_{sun} 为各波段大气层外太阳辐照度值 ($W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$); θ 为太阳天顶角度值。

GF-1 卫星 WFV 数据头文件 XML 提供一组中心像元的太阳天顶角、方位角和观测天顶角、方位角及经纬度信息。利用中心像元的观测天顶角结合 WFV 相机瞬时视场角进行插值, 得到观测方位角数据。太阳天顶角和方位角的计算公式分别为:

$$\cos \theta = \sin(\text{lat}) \sin \delta + \cos(\text{lat}) \cos \delta \cos t \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \times \sin(\text{lat}) - \sin \delta}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \times \cos(\text{lat})} \quad (4)$$

(3) 与 (4) 式中, θ 为太阳天顶角; lat 为像元纬度; δ 为太阳赤纬角; t 为太阳时角; φ 为太阳方位角。

本研究采用阈值法进行云检测, Ackerman^[32] 的研究表明, 云像元在红光波段的反射率大于 0.2, 据此选择 0.2 作为云像元检测阈值。

对 MODIS 地表反射率数据产品 (MOD09A1) 进行预处理构建地表反射率数据库, 预处理包括蓝波段地表反射率提取, 利用 MRT 工具进行投影转换、裁剪和最小地表反射率提取后再进行真值转换处理。经过预处理获取的蓝波段地表反射率数据库需要与 GF-1 卫星 WFV 相机进行波段修正^[25,33], 从而获取 WFV 相机对应蓝波段的地表反射率。

AERONET 站点 AOD 观测数据主要有三个级别, 分别为 Level1.0 (未筛选, 未校准)、Level1.5 (云清除和质量控制) 和 Level2.0 (云清除、质量控制和前后场校准), 覆盖波段 340~1 640 nm。由于在本研究时相内, 徐州站点无 Level2.0 数据, 所以选用 Level1.5 数据验证 AOD 卫星反演结果。此外, AERONET 站点数据中对应 AOD 产品结果 550 nm 波段为空值, 需要通过 Ångström 公式^[34]插值获取 550 nm 波长处 AOD 值, Ångström 公式如下:

$$\tau_{\lambda} = \beta \times \lambda^{-\alpha} \quad (5)$$

(5) 式中, τ_{λ} 为气溶胶光学厚度; λ 为波长; β 为大气浑浊度系数, 反映的是气溶胶粒子浓度; α 为 Ångström 波长指数。

1.3 AOD 反演

1.3.1 基本原理 采用标量方法进行气溶胶反演研究时, 假设地表为均匀朗伯面, 大气水平均一, 卫星传感器接收到的辐射值 $L(\mu_v)$ 可以表示为^[35]:

$$L(\mu_v) = L_0(\mu_v) + \frac{r}{1-rS} \mu_s F_0 T(\mu_s) \times T(\mu_v) \quad (6)$$

(6) 式中, $L_0(\mu_v)$ 为观测方向的路径辐射项; r 为朗伯体地表反射率; S 为大气下界的半球反射率; $\mu_s F_0$ 为大气层顶与太阳光垂直方向的辐射通量密度; T 为大气透过率; $\mu_s = \cos \theta_s$, $\mu_v = \cos \theta_v$, θ_s 与 θ_v

分别为太阳天顶角与观测天顶角。

利用入射太阳辐射项 $\mu_s F_0$ 对 (6) 式进行归一化可得到大气层顶部反射率表达式为^[35]:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \varphi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_s(\mu_s, \mu_v, \varphi)}{[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \varphi)S]} \quad (7)$$

(7) 式中, ρ_0 为大气的路径辐射项等效反射率; ρ_s 为地表二向反射率, 当地表为朗伯体时为 r ; φ 为相对方位角。由 (7) 式可以看出, ρ_0 、 ρ_s 、 S 和 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 等参数是未知量。从 ρ_0 中提取气溶胶参数, 两个关键问题亟待解决: ①气溶胶模式, 即 ρ_0 、 S 和 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 参数本事是气溶胶的函数; ②地表反射噪声的去除直接依赖于 ρ_s 的估算精度。

问题①中, 参数 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 在公式中总是以乘积的形式出现, 因此可将 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 作为一个参数考虑。在实际的反演过程中, 通常会假设不同气溶胶模式和观测几何条件, 利用 6S (second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) 大气辐射传输模型^[35]计算 AOD 与 ρ_0 、 S 和 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 3 个参数之间的对应关系, 并以此建立查找表, 通过查找表获取 AOD^[36]。

对于问题②地表反射噪声的去除, 主要有两种方法, 一是对于植被密集的具有较低反射率的地表采用暗像元法, 二是对于植被覆盖度低的城区、沙漠和雪地等亮像元地表采用深蓝算法。由于本研究区域为常年大肆开采的煤矿区域, 城市工业化严重, 研究区内植被覆盖度偏低, 因此深蓝算法更适用于本研究。

1.3.2 深蓝算法 对于植被覆盖度低的非暗像元地区, 暗像元法并不适用于反演该地区 AOD。Hsu 等^[20]提出的针对亮像元地表的 AOD 反演方法——深蓝算法, 利用蓝波段在亮像元的地表反射率较小, 仅有可见光波段的 1/2~1/4 的特征, 通过模拟蓝波段的地表反射率实现地表反射率噪声的去除从而获取气溶胶信息。王中挺等^[25]从 Hsu 等^[20]提出的深蓝算法出发, 以 MODIS 地表反射率产品构建地表反射率数据库, 并根据 CCD 相机和 MODIS 波段响应函数进行波段修正, 进而实现地气解耦, 反演 AOD。本研究采用 GF-1 卫星 WFV 数据的蓝波段进行 AOD 反演, 采用 MODIS 地表反射率产品 MOD09A1 数据构建地表反射率数据库, 利用 6S 辐射传输方程构建蓝波段 AOD 与 ρ_0 、 S 和 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 3 个参数之间的对应关系的查找表, 开展徐州地区气溶胶反演研究。

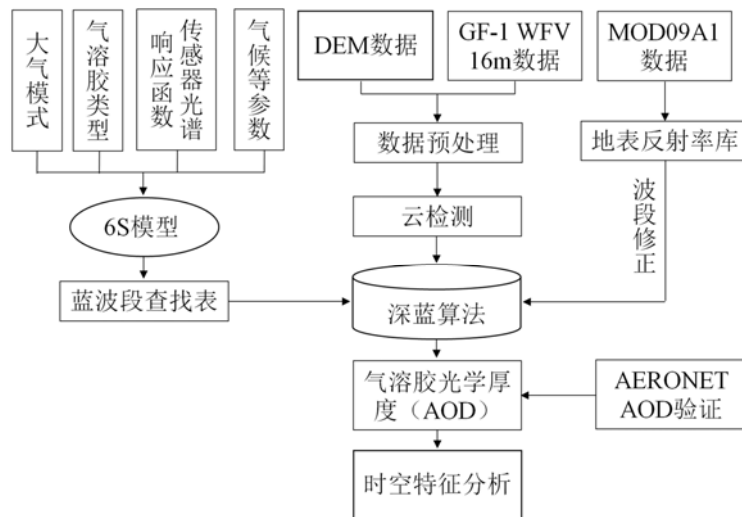


图 2 AOD 反演技术路线

Figure 2 Technology roadmap of AOD inversion

1.3.3 AOD 反演流程 本研究 AOD 反演技术流程如图 2 所示, 主要包括: 数据预处理、云检测、地表反射率数据库的构建和蓝波段查找表的生成。

蓝波段查找表的构建是基于 6S 辐射传输模型在不同大气模式、气溶胶类型、不同卫星传感器光谱响应函数及气候等参数条件下计算得到。其中, 观测几何参数包括: 9 个太阳天顶角为 0° 、 12° 、 24° 、 36° 、 48° 、 54° 、 60° 、 66° 、 72° ; 12 个观测天顶角 $0^\circ \sim 66^\circ$, 步长为 6° ; 16 个相对方位角 $0^\circ \sim 180^\circ$, 步长为 12° ; 设立了 11 个 550 nm 处 AOD 值: 0.001、0.25、0.5、0.75、1、1.25、1.5、1.75、2.0、2.25、2.5; 实验中气溶胶类型选择大陆型气溶胶。

AOD 反演实验的步骤为: ①根据徐州市 GF-1 卫星 WFV 数据选择对应时间蓝波段地表反射率数据库, 与 WFV 相机进行波段修正得到地表反射率; ②由 GF-1 卫星 WFV 数据获取观测几何参数, 在查找表中插值得到不同 AOD 下大气参数; ③将大气参数与地表反射率代入 (7) 式获取对应的表观反射率; ④利用 GF-1 卫星 WFV 相机蓝波段表观反射率进行线性插值求解 AOD。由于受 MODIS 地表反射率产品空间分辨率的限制, 构建地表反射率库的分辨率降为 500 m, 因此 AOD 反演运算结果的空间分辨率也对应设定为 500 m, 同时可以提高运算速度, 并减少噪声的影响。

2 结果与分析

2.1 AOD 空间特征

通过数据筛选, 分别选择徐州市 2015 年的 7 月 13 日和 10 月 20 日、2016 年 2 月 24 日和 4 月 30

日以及 2017 年 2 月 27 日和 5 月 7 日, 共 6 期 AOD 数据进行空间特征分析。由图 3 可以看出, 2015 年 7 月 13 日, 徐州地区气溶胶污染情况较严重, 呈现出中心城区和西北部高东南部低的特点, 与徐州地区空气污染状况相对应。至 2015 年 10 月 20 日空气质量状况较 7 月 13 日良好, 中心城区 AOD 明显降低, 仅城区西北部与东部略高。2016 年两期 AOD 反演结果差异明显, 经过云掩膜处理后, 除东部以外, 2 月 24 日徐州市全境 AOD 普遍表现为高异常, 尤其是西北部与南部空间呈现 AOD 超过 2.0 的高值条带, 查看当天的影像发现西北部与南部城区被大片薄云覆盖, 经过云检测去除了南部少部分厚云, 其它薄云的存在可能是造成异常高值带的原因之一。另外, 徐州市于 2016 年 2 月 23 日城建重点工程地铁 2 号线开工, 工程的实施产生的大量粉尘和车辆尾气也会造成 AOD 遥感反演的异常高值。而 4 月 30 日区域 AOD 反演结果则整体较低。2017 年两期影像虽然整体 AOD 数值差异较大, 但同样表现出与 2015 年、2016 年较一致的空间特征, 即各景 AOD 影像的高值异常区多集中在丰县、徐州市区、邳州市、新沂市和睢宁县, 均是人口分布密集、交通运输复杂和经济发展较好的区域 (图 4), AOD 平均数值达到 2.0 以上。另外, 由图 4 可知, 丰县相比于其它地区工厂、建筑工地和矿区更丰富, 人口聚集较多, 因而丰县与其它地区相比 AOD 均值高且高值覆盖范围大。而徐州地区东南部人类活动相对较少, 植被覆盖度较高使得这片区域具有较低的 AOD 值 (<0.8)。

总体上来看, GF-1 WFV 卫星数据 AOD 反演结

果基本可以获取徐州地区的城市型气溶胶稳定的空间分布特征, 季节变化并未影响 AOD 空间格局, AOD 增高均集中于城市人口聚集区, 说明徐州地区空气污染的气溶胶颗粒物主要来源于城市, 与人类

活动排放直接相关。此外, 由于 GF-1 数据具有高空间分辨率, 其更具有 AOD 反演城市地区细部空间特征的能力。

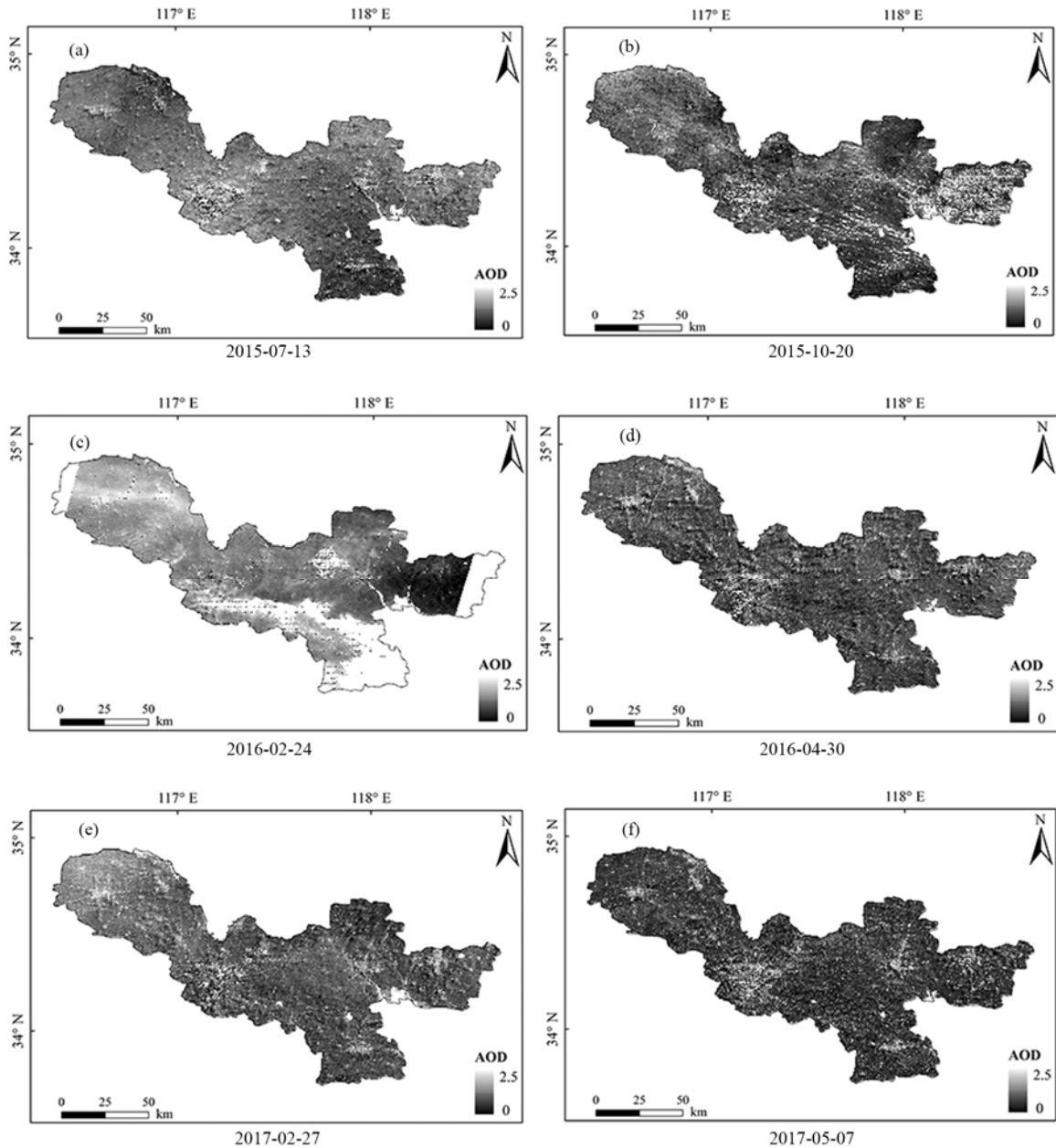


图 3 徐州市 AOD 反演结果
Figure 3 AOD inversion results of Xuzhou city

2.2 AOD 相关性分析

2.2.1 AOD 星-地验证 为了验证本实验 AOD 反演精度, 利用 AERONET 地基站点观测数据与 AOD 反演结果进行精度验证。采用 Ångström 公式^[33]对 AERONET 徐州站点 440 nm 和 870 nm 波段气溶胶观测数据进行插值得到与 AOD 反演结果对应的 550 nm 波段。为了减小气溶胶在时间和空间上的误

差, AERONET 站点观测数据采用 GF-1 卫星过境时间前后 1 h 的平均值, AOD 反演结果采用徐州地面站点 2 km 范围内的平均值进行回归分析。去除云、雨等天气影响造成的极端异常值后, AERONET 站点数据与 AOD 反演结果匹配共获得有效数据 22 对。

本研究采用一元线性回归方程、相关系数 (R^2)

和均方根误差 (root mean square error, RMSE) 对 AOD 反演结果和 AERONET 站点数据进行相关性分析。其中, RMSE 的公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

式中, x_i 为 AERONET 站点观测数据, y_i 为 AOD 反演结果。

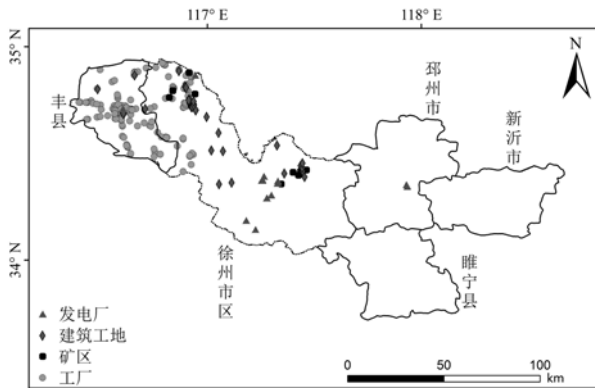


图 4 徐州行政区划及大气污染源

Figure 4 Xuzhou administrative division and point sources of atmospheric pollution

图 5 为 AERONET 站点数据与 AOD 反演结果验证结果。由图 5 可以看出, 本研究 AOD 反演结果与 AERONET 站点数据之间相关系数 R^2 达到 0.896, 斜率为 1.049, RMSE 为 0.111, 说明 AOD 反演结果与 AERONET 站点气溶胶光学厚度数据具有显著的相关性。AERONET 站点数据的平均值 0.453, AOD 反演结果的平均值也达到 0.439。

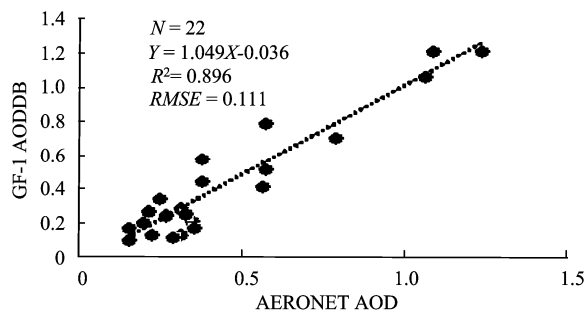


图 5 AERONET 站点数据与 AOD 反演结果对比

Figure 5 Comparison of AERONET site data and AOD inversion results

2.2.2 AOD 时间序列分析 本研究进一步对徐州市 GF-1 卫星 AOD 反演结果与同期 AERONET 站点数据进行了时间序列分析(图 6)。由图 6 可以看出, AOD 反演结果与 AERONET 具有良好的相关性, 2013—2017 年间 AOD 反演结果与 AERONET 站点数据变化趋势基本保持一致。图 6 同时显示, 徐州

地区自 2013 年至 2017 年 AOD 整体呈现下降趋势, 且 2013 年 9 月、2014 年 3 月、2015 年 7 月和 2016 年 2 月、4 月此类季节交替时期 AOD 呈现出高值, 可能原因是随着季节的交替, 气候和气温产生的变化带来的温差影响气溶胶的扩散和传播。

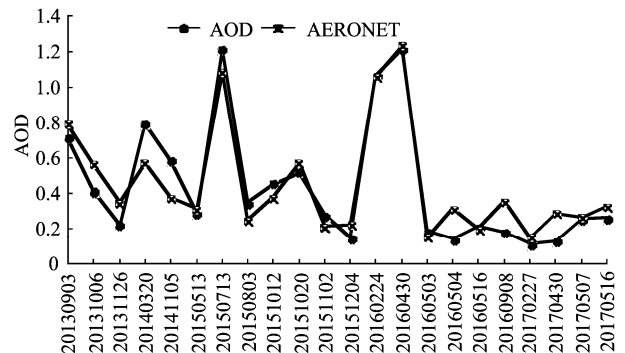


图 6 AERONET 站点数据与 AOD 反演结果时间序列对比 (2013-2017)

Figure 6 Time series comparison of AERONET site data and AOD inversion results (2013-2017)

3 讨论与结论

通过上述 AOD 反演与时空分析, 本研究结论如下:

(1) 2015—2017 年徐州市 AOD 整体空间格局稳定, 均以人口聚集的城区呈高值分布为特征, 不随季节变化, 说明徐州地区空气污染源极可能以城市人为排放为主;

(2) 与 AERONET 站点同期数据的验证证明, 基于 GF-1 WFV 高空间分辨率卫星数据的徐州市 AOD 反演结果质量良好, 具有推广应用价值;

(3) AOD 反演结果与 AERONET 自 2013 年至 2017 年时间序列分析表明, 两者相关性良好, 整体趋势变化基本一致, 季节交替时期 AOD 呈现高值, 可能是由温度差异所致。

综上所述, 受限于云覆盖的阴雨天气, 基于 GF-1 WFV 卫星数据的 AOD 反演无法保证时间维度上的连续监测, 后期在技术应用阶段还需在大数据支撑下充分利用时空数据融合甚至机器学习等先进技术手段弥补遥感 AOD 反演的不足, 以期达到国产高分卫星的高时间、高空间分辨率以及实时监测与预测的更高业务目标。

参考文献:

- [1] 高大伟, 徐宏辉, 郁珍艳, 等. MODIS 气溶胶光学厚度在临安大气颗粒物监测中的应用[J]. 环境科学研究, 2012, 25(7):739-744.
- [2] 薛文博, 武卫玲, 王金南, 等. 中国气溶胶光学厚度时

- 空演变特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(4):17-20.
- [3] GRIGGS M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data[J]. *Air Repair*, 1975, 25(6):622-626.
- [4] MEKLER Y, QUENZEL H, OHRING G. Relative atmosphere aerosol content from erts observations[M]//*Space Research: Elsevier*, 1978: 57-59.
- [5] STOWE L L, JACOBOWITZ H, OHRING G, et al. The advanced very high resolution radiometer (AVHRR) pathfinder atmosphere (PATMOS) climate dataset: initial analyses and evaluations[J]. *J Climate*, 2002, 15(11): 1243-1260.
- [6] GORDON H R, WANG M H. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. *Appl Opt*, 1994, 33(3): 443-452.
- [7] KING M D, KAUFMAN Y J, MENZEL W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS)[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 1992, 30(1): 2-27.
- [8] 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]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [9] DINER D J, ABDU W A, BRUEGGE C J, et al. MISR aerosol optical depth retrievals over southern Africa during the SAFARI-2000 dry season campaign[J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(16): 3127-3130.
- [10] HERMAN M, DEUZÉ J L, DEVAUX C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces including polarization measurements and application to POLDER measurements[J]. *J Geophys Res-Atmos*, 1997, 102(D14): 17039-17049.
- [11] DEUZÉ J L, BRÉON F M, DEVAUX C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [12] 孙林, 柳钦火, 陈良富, 等. 环境与减灾小卫星高光谱成像仪陆地气溶胶光学厚度反演[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5):770-776.
- [13] 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.
- [14] SUN K, CHEN X L, ZHU Z M, et al. High resolution aerosol optical depth retrieval using gaofen-1 WFV camera data[J]. *Remote Sens*, 2017, 9(1): 89.
- [15] FEDOSEJEVS G, O'NEILL N, ROYER A, et al. Aerosol optical depth for atmospheric correction of AVHRR composite data[R]. *Natural Resources Canada/ESS/Scientific and Technical Publishing Services*, 2000.
- [16] WANG Z T, CHEN L F, HUI G, et al. Modified DDV method of aerosol optical depth inversion over land surfaces from CBERS02B[J]. *J Remote Sens*, 2009, 13(6): 1053-1066.
- [17] NICHOL J, BILAL M. Validation of MODIS 3 km resolution aerosol optical depth retrievals over Asia[J]. *Remote Sens*, 2016, 8(328).
- [18] Levy R C, Remer L A, Kaufman Y J, et al. A New, Physically Based Algorithm, for Retrieving Aerosol Properties over Land from MODIS[J]. *American Geophysical Union*, 2004: 20040171556.
- [19] 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 等. 利用MODIS资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究[J]. *气象学报*, 2003, 61(5):580-591.
- [20] HSU N C, TSAY S C, KING M D, et al. Aerosol properties over bright-reflecting source regions[J]. *IEEE T Geosci Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569.
- [21] HSU N C, TSAY S C, KING M D, et al. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2006, 44(11): 3180-3195.
- [22] HSU N C, JEONG M J, BETTENHAUSEN C, et al. Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm: the second generation[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118(16): 9296-9315.
- [23] LI S S, CHEN L F, TAO J H, et al. Retrieval of aerosol optical depth over bright targets in the urban areas of North China during winter[J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55(9):1545-1553.
- [24] 邓孺孺, 田国良, 王雪梅, 等. 大气污染定量遥感方法及其在长江三角洲的应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(3):181-185.
- [25] 王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用深蓝算法从HJ-1数据反演陆地气溶胶[J]. *遥感学报*, 2012, 16(3):596-610.
- [26] VIDOT J, SANTER R. SeaWiFS level-3 products over land[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2004, 5235:357-365.
- [27] MARTONCHIK J V, DINER D J, CREAN K A, et al. Regional aerosol retrieval results from MISR[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2002, 40(7): 1520-1531.
- [28] VACHON F, ROYER A, AUBE M, et al. Remote sensing of aerosols over North American land surfaces from POLDER and MODIS measurements[J]. *Atmos Environ*, 2004, 38(21):3501-3515.
- [29] 李莘莘, 陈良富, 陶金花, 等. 基于HJ-1-CCD数据的地表反射率反演与验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(2):516-520.
- [30] 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.
- [31] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. *中国航天*, 2013(8): 5-9.
- [32] Ackerman S A, Strabala K I, Menzel W P, et al. Discriminating clear sky from clouds with MODIS[J]. *J Geophys Res-SPACE*, 1998, 103(D24):32141-32157.
- [33] 张璐. 基于国产遥感卫星数据的北京市气溶胶光学厚度反演研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [34] ÅNGSTRÖM A. The parameters of atmospheric turbidity[J]. *Tellus*, 1964, 16(1): 64-75.
- [35] VERMOTE E F, TANRÉ D, DEUZÉ J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview[M]// *The social & economic history of the Hellenistic world*, Oxford: Clarendon Press, 1997: 675-686.
- [36] KAUFMAN Y J, HOLBEN B N, TANRÉ D, et al. Will aerosol measurements from Terra and Aqua Polar Orbiting satellites represent the daily aerosol abundance and properties?[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(23): 3861-3864.