

京津冀地区 1 km 分辨率 AOD 产品精度验证及与大气污染的相关性分析

贾臣, 孙林*, 王永吉, 张熙空

山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590

摘要 京津冀地区的大气颗粒物污染非常严重,对气候环境和人类健康产生直接影响。为了使用遥感技术对京津冀地区的颗粒物污染进行快速、准确的评价,验证了 NASA 近期发布的全球 1 km 分辨率的 MCD19A2 气溶胶光学厚度(AOD)产品在京津冀地区的精度,明确了卫星产品在该区域应用的可靠性,并分析了 AOD 产品与空气质量指数(AQI)的相关性,探讨其对空气污染的指示作用。获取 2014~2018 年京津冀地区的 MCD19A2 AOD 空间分布数据,以及同步的 AERONET 实测数据,对两类数据进行了时空转化等处理,以实现数据间的精确匹配。验证结果表明,MCD19A2 产品在该区域达到较高的精度及稳定性,相关系数、均方根误差、平均绝对误差和期望误差范围分别为 0.9504、0.1243、0.0863 和 82.26%。基于不同尺度 AOD 结果,与 AQI 数据进行相关性分析,二者具有较高的相关性,表明 MCD19A2 数据对空气污染状况具有直接的指示作用。该研究可为气溶胶特性研究、空气质量监测等方面的工作提供一定的参考。

关键词 遥感;气溶胶监测;气溶胶光学厚度;MCD19A2 数据;京津冀地区;空气污染

中图分类号 P236

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.232802

Accuracy Validation of 1 km Resolution AOD Products in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Correlation Analysis with Air Pollution

Jia Chen, Sun Lin*, Wang Yongji, Zhang Xikong

Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract The pollution of atmospheric particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region is very serious, which has an impact on the climate, environment, and human health. To quickly and accurately evaluate particulate pollution in the BTH region using remote sensing technology, this article verifies the accuracy of the global 1 km resolution MCD19A2 aerosol optical depth (AOD) product released by NASA and analyzes its reliability in the BTH region. At the same time, the correlation between the AOD product and the air quality index (AQI) is analyzed to explore the indication function for air pollution. The spatial distribution data of MCD19A2 AOD and the measured data of aerosol robotic network (AERONET) in the BTH region from 2014 to 2018 are obtained for validation, and the two types of data are processed by space-time transformation to achieve accurate matching. Validation results show that MCD19A2 products have achieved higher accuracy and stability in the BTH region. It's correlation coefficient, root mean square error, mean absolute error, and within expected errors are 0.9504, 0.1243, 0.0863, and 82.26%, respectively. Based on AOD results at different scales, correlation analysis performed with AQI data suggests higher correlation, which indicates that the MCD19A2 data has a direct indication of air pollution. This study can provide some references for the research of aerosol characteristics and air quality monitoring.

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-05-09; 录用日期: 2020-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(41771408)、山东省自然科学基金(ZR201702210379)、国防科工局十三五民用航天技术预先研究项目

* E-mail: sunlin6@126.com

Key words remote sensing; aerosol detection; aerosol optical depth; MCD19A2 data; Beijing-Tianjin-Hebei region; air pollution

OCIS codes 280.1100; 280.1200

1 引言

中国京津冀地区(北京市、天津市和河北省)由于经济发达和人口密集,通过燃料燃烧、工业废气及交通尾气排放等途径,气溶胶等大气污染物的排放日益增加^[1];且受地势和海陆风环流影响,造成污染物的扩散阻碍和循环累积^[2]。京津冀地区严重的大气污染状况特别是气溶胶污染,对气候变化和人体健康等都产生不同程度的影响^[3-4]。故准确监测和研究该地区气溶胶污染的特征,对分析气候变化、城市空气质量等与人类生活密切相关的环境问题,具有非常重要的意义。

卫星遥感以其大范围观测、长时间序列、短更新周期等特点,在气溶胶监测和分析工作中发挥重要作用^[5-6]。为满足不同区域气溶胶研究的需求,不同传感器平台均发布相应的气溶胶产品数据,主要包括 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)、OMI (Ozone Monitoring Instrument) 和 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)等^[7]。MODIS 气溶胶产品已经积累超过 15 年的全球气溶胶观测数据,为不同区域、长时间序列的气溶胶研究提供了良好的数据基础^[8]。MCD19A2 是最新的 MODIS C6 版本气溶胶数据,采用多角度大气校正(MAIAC)算法生产每日 1 km 空间分辨率的全球气溶胶产品。MAIAC 算法是针对 MODIS 数据开发的一种通用算法^[9],基于时间序列分析和图像处理进行气溶胶反演和大气校正。该算法的基本思想是,假设地表特性在空间上变化迅速而在时间上变化相当缓慢,气溶胶则相反。基于该思想,MAIAC 通过 25×25 像元固定大小的 16 天连续影像,分离地表贡献并推导出 1 km 分辨率下的地表双向反射分布函数(BRDF)和光谱回归系数(SRC);进而根据各个波段已知的 BRDF 和 SRC,在最新影像中反演 1 km 分辨率气溶胶结果。MAIAC 算法包括内部的云掩模^[10]、动态陆地-水-雪分类和地表类型覆盖^[11],可应用于不同地表实现气溶胶反演。相关研究^[12-13]证明,MAIAC 和 MOD04 的气溶胶结果在黑暗地表和植被覆盖区域具有相似精度,而由于 SRC 和 BRDF 的反演,在较亮地表 MAIAC 具有更

高精度。MCD19A2 提供了高时间频次、高空间分辨率的全球气溶胶数据,满足环境效应分析、空气质量分析等不同应用需求。

京津冀地区高异质性特点给气溶胶精度带来了巨大挑战^[14]。首先,由于京津冀地区地表类型复杂以及浓密植被少、地表反射率较高,大气与地表信息难以有效分离,将严重限制气溶胶反演的精度;同时,该地区气溶胶的来源和类型比较复杂,也会对气溶胶结果精度产生影响。故在使用气溶胶产品数据时应开展相关验证工作,以验证气溶胶结果的精度和可靠性,分析产品在研究区的适用性。

国内外众多学者已针对气溶胶产品的验证和分析工作开展了一系列研究。Chu 等^[15]利用全球范围内 30 多个站点的 AERONET (Aerosol Robotic Network)数据,对 MODIS C004 版本气溶胶产品进行验证,发现两者存在较大的偏差;周春艳等^[16]使用 Beijing 和 Yulin 站点 AERONET 数据,对比验证了 MODIS C004 和 C005 版本气溶胶产品的精度,并分析了两种产品在中国北方地区的适用性,结果表明,该产品所使用的暗目标算法不适用于亮地表;Wong 等^[7]使用位于香港的三个太阳光度计地面观测站点数据,对 MODIS、MISR (Multiangle Imaging SpectroRadiometer)、OMI 和 CALIPSO 气溶胶产品分别进行了验证,结果表明,这些产品可以为香港地区空气质量监测需求提供较为准确可靠的气溶胶数据;Bilal 等^[17]利用巴基斯坦地区的 AERONET 站点数据对 MODIS C051 和 C006 版本气溶胶产品进行验证和对比,分析了两种产品的精度以及在不同区域的适用性;Wang 等^[18]通过 MODIS C006 和 AERONET 气溶胶数据,在武汉地区对 VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) IP (Intermediate Product)气溶胶数据的精度开展了验证和分析。其他学者也分别针对不同区域开展了 MODIS、NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 和 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)等气溶胶产品的精度验证和适用性评价工作^[19-22]。上述研究均采用 AERONET、CSHNET (Chinese Sun Hazemeter Network)等气溶胶地基观测数据,对气溶胶产品进行验证和分析,在产品的性能评价、应用等方面具有

重要意义。

在气溶胶和空气污染的相关性分析方面,国内外学者也开展了大量的研究。Guo 等^[23]提出地理和时间加权回归模型,运用 MOD04 AOD、气象和土地利用信息数据估算了北京每日 3 km 空间分辨率的地面细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度,并说明了卫星气溶胶和 $PM_{2.5}$ 之间的时空变化关系;Soni 等^[24]研究发现卫星气溶胶与地面可吸入颗粒物的较高相关性,并使用多元回归统计模型估算了印度斋浦尔地区的可吸入颗粒物参数;刘璇等^[25]基于卫星遥感和地面观测资料分析长江三角洲地区一次严重霾污染过程,研究发现 AOD 与 $PM_{2.5}$ 、空气质量指数(AQI)的变化趋势相似,相关系数分别为 0.732、0.718,说明 AOD 能较好地反映该次霾污染过程;Huff 等^[26]提出卫星遥感 AOD 与 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物浓度有相关关系,AOD 值越高,颗粒物浓度越高,故 AOD 适用于环境空气质量应用,AOD 可用于识别和跟踪空气污染事件;Mei 等^[27]基于 AOD 与大气浊度系数之间的关系,提出卫星 AOD 影像可用于监测空气质量,并通过分析典型空气污染事件发现 AOD 与空气污染的实际情况可以很好吻合。

在上述研究的基础上,为明确卫星遥感反演的 AOD 与空气污染之间的关系,本文分析了 AOD 与环境保护部门提供的 AQI 之间的相关性。AQI 是根据 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 等六项污染物的浓度综合评价空气污染,通过主要污染物来确定污染程度。京津冀地区各个城市在一年中的绝大部分时间其主要的污染物是大气颗粒物,因此 AOD 和 AQI 的相关性可以在一定程度上反应 AOD 对空气污染的指示作用,为 AOD 用于空气污染的分析提供一定支持。

本文以京津冀地区为研究区域,开展 MCD19A2 产品气溶胶光学厚度的精度验证工作。首先选择 2014 年京津冀地区的 MCD19A2 数据,与精确的 AERONET 站点气溶胶实测数据进行对比,验证气溶胶结果的精度和可靠性。同时对 2014~2018 年 MCD19A2 和 AQI 数据进行相关性分析,研究 MCD19A2 数据的 AOD 对空气污染的指示作用。

2 研究区与数据源

2.1 研究区介绍

京津冀地区($36^{\circ}\sim 42^{\circ}N$, $112^{\circ}\sim 121^{\circ}E$)位于中国东部,地处华北平原,北面和西面分别为燕山和太行山,其余为张北高原和河北平原,整体地形复杂;

气候为典型的暖温带大陆性季风气候,四季分明,不同季节的温度和湿度差别较大;行政区划包括北京、天津和河北省的石家庄、保定、廊坊、唐山、邯郸、衡水、邢台、沧州、张家口、承德、秦皇岛共计 13 个城市。京津冀地区人口众多、城市聚集,作为全国重要的经济中心之一,近年来经济发展迅速,实现了高度城镇化。但快速的经济和城市化发展,以及频繁的人类活动,导致气溶胶等污染物的排放日益增加,形成严重的大气污染现状^[28]。京津冀地区已成为气溶胶监测、空气污染评价等环境问题的热点研究区域^[29]。故本文选择京津冀地区作为研究区,开展 MCD19A2 气溶胶产品的精度验证工作,并研究该产品对空气污染的指示作用。

2.2 数据源

本研究使用的数据包括 MCD19A2 气溶胶产品、AERONET 站点气溶胶实测数据和空气质量指数数据。

2.2.1 MCD19A2 数据

MCD19A2 数据是 NASA 最新发布的 MODIS C6 版本气溶胶光学厚度产品,以高空间分辨率和高时间频次实现了对全球陆地区域的气溶胶监测。空间分辨率为 1 km,数据集包括 550 nm 波段 AOD、气溶胶模型和不确定因子等气溶胶参数。MCD19A2 采用 MAIAC 算法,基于时间序列分析和图像处理进行气溶胶反演;且 MAIAC 算法包括内部的云掩模、动态陆地-水-雪分类和地表类型覆盖,产品可为不同地表类型提供准确和稳定的空间覆盖。本文选择 2014~2018 年覆盖京津冀地区的 7176 景 MCD19A2 数据(HDF 格式),开展相关研究工作。

对 MCD19A2 数据的处理主要包括影像格式转化、剔除无效值、拼接和裁剪。格式转化是指将 HDF 格式数据转化为 Tiff 影像,并赋投影信息;剔除无效值是指对 AOD 结果影像中大于 2 的像元进行剔除,不参与研究;拼接是指将分幅影像拼接为能覆盖京津冀地区的整幅影像;裁剪是指根据矢量裁剪整幅影像,获取京津冀地区以及每个城市的影像。处理完成获得京津冀地区的气溶胶结果,时间分辨率为 1 天,空间分辨率为 1 km。图 1 为在气溶胶结果中随机挑选的云覆盖较少的 AOD 空间分布,4 景数据的成像时间分别为 2014-03-16、2014-08-14、2014-09-04、2014-01-03,分别分布在春夏秋冬四个季节。图 1 所示为 MCD19A2 数据在晴空条件下为京津冀地区提供连续空间覆盖的 AOD 结果。

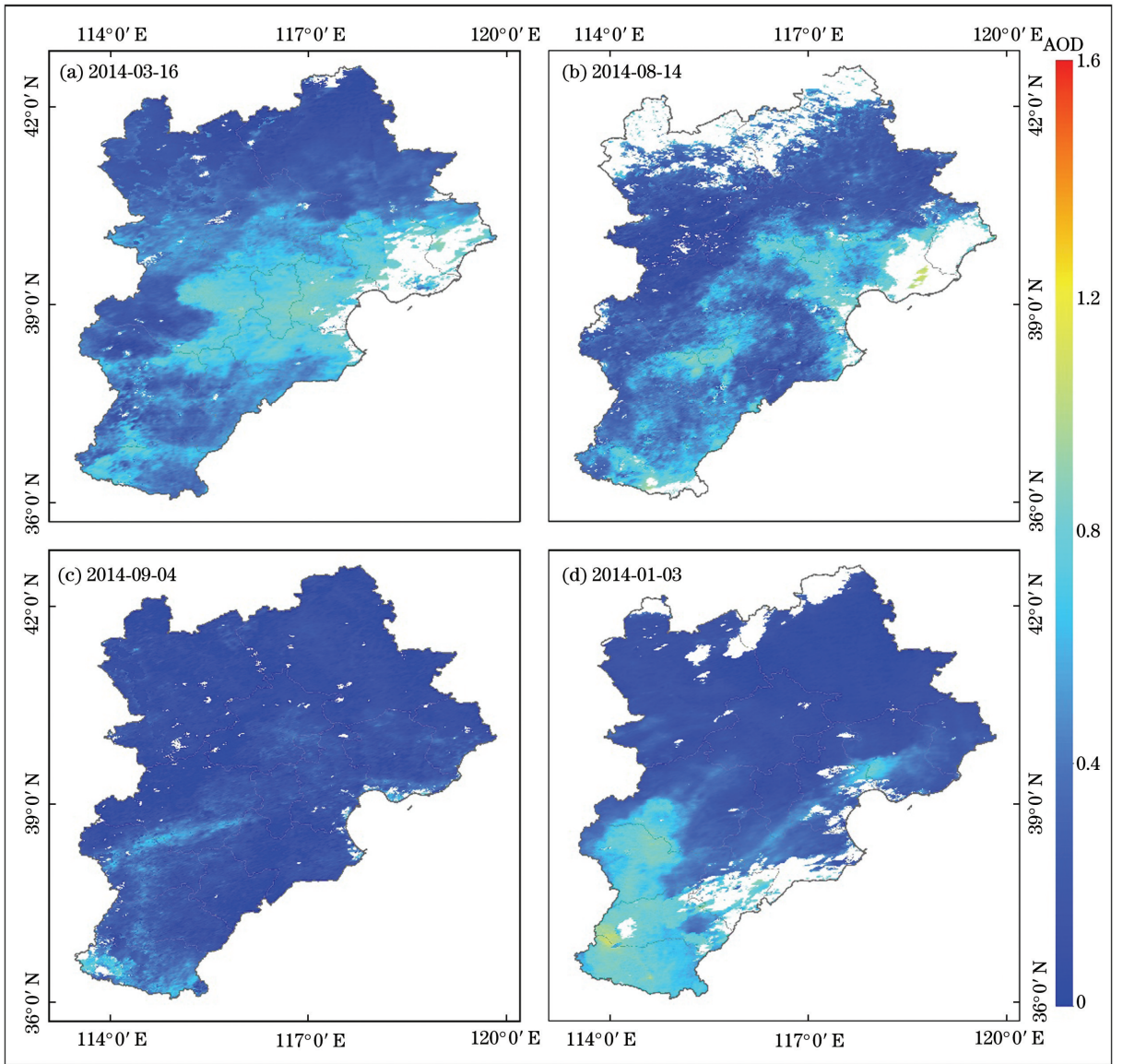


图1 京津冀地区的MCD19A2数据AOD空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of MCD19A2 AOD in the Beijing-Tianjin-Hebei region

2.2.2 AERONET 数据

AERONET 是由法国科研中心和美国航空航天局共同建立的气溶胶地基观测网络^[30], 提供全球主要区域超过 1500 个站点的气溶胶地基观测值。使用 CIMEL CE318 全自动太阳光度计作为基本观测仪器, 可提供 440 nm、675 nm、870 nm 和 1020 nm 等波段的 AOD 实测值。气溶胶观测数据时间分辨率为 15 min, 共包括三个质量级别: Level1.0(未筛选)、Level1.5(云筛选和质量控制)和 Level2.0(质量保证), 级别越高精度越高。本文选择位于京津冀地区共计 6 个站点的 Level2.0 级别(Level2.0 不存在时用 Level1.5 代替) AOD 实测数据, 对 MCD19A2 气溶胶结果进行定量的精度验证。所选择的 AERONET 站点及数据信息在表 1

中展示。

表 1 AERONET 站点及数据信息

Table 1 Site and data information of AERONET

Number	Site name	Longitude/ (°E)	Latitude/ (°N)	Level
1	Beijing	116.3814	39.9769	2.0
2	Beijing-CAMS	116.3167	39.9333	2.0
3	Beijing-RADI	116.3786	40.0048	1.5
4	Shijiazhuang-SZF	114.4583	38.0167	1.5
5	Shijiazhuang-CHEY	114.5500	38.0000	1.5
6	XiangHe	116.9615	39.7536	2.0

选择 AERONET 数据验证 MCD19A2 气溶胶产品, 但由于 AERONET 未提供 550 nm 波段处的

AOD测量值,需要对AOD实测数据进行波段转换。在440 nm、675 nm、870 nm和1020 nm四个波段的数据中,选择距离550 nm较近且可获取数据的两个波段,使用Angstrom经验方程插值获得550 nm处的气溶胶光学厚度。

$$\tau(\lambda_0) = \beta \lambda_0^{-\alpha}, \quad (1)$$

$$\alpha = -\frac{\ln[\tau(\lambda_1)/\tau(\lambda_2)]}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\tau(\lambda_1)}{\lambda_1^{-\alpha}}, \quad (3)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 为波长 λ 处气溶胶光学厚度; α 为波长指数; β 为Angstrom浑浊度系数; λ_0 表示波长550 nm; λ_1 、 λ_2 表示所选择两个波段的波长。

2.2.3 AQI数据

空气质量指数AQI是用于定量描述空气质量状况的无量纲指数,参与空气质量评价的主要污染物为细颗粒物($PM_{2.5}$)、可吸入颗粒物(PM_{10})、二氧化硫(SO_2)、二氧化氮(NO_2)、臭氧(O_3)和一氧化碳(CO)^[31-32]。AQI用于描述空气的污染程度以及对健康的影响,适合于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势,并指导空气污染的控制和管理。AQI数值越大说明空气污染状况越严重,对人体健康的危害也就越大。首要污染物是指AQI大于50时空气质量分指数(IAQI)最大的空气污染物。空气质量指数计算公式为

$$IAQI_P = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_P - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo}, \quad (4)$$

$$AQI = \max(IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n), \quad (5)$$

式中: $IAQI_P$ 为污染物 P 的空气质量分指数; C_P 为污染物 P 的质量浓度值; BP_{Hi} 和 BP_{Lo} 分别为与 C_P 相近的污染物浓度限值的高位数和低位数; $IAQI_{Hi}$ 为与 BP_{Hi} 对应的空气质量分指数; $IAQI_{Lo}$ 为与 BP_{Lo} 对应的空气质量分指数; $IAQI_i$ 为第 i 项污染物的空气质量分指数; n 为污染物项目。

本文选择2014~2018年京津冀地区13个城市的日平均和月平均AQI数据,与MCD19A2数据联合分析,研究MCD19A2 AOD对空气污染情况的指示作用。

3 与AERONET实测数据的精度验证

为了验证MCD19A2数据AOD结果的精度和

可靠性以及在京津冀地区的适用性,选择2014年京津冀地区6个AERONET站点的AOD实测数据开展验证工作,并选择相关误差指标进行精度评价和分析。

3.1 时空匹配

MCD19A2提供的AOD结果为传感器成像时间的影像,而AERONET提供的AOD结果为不同站点时间分辨率为15 min的实测值。为保证验证的可靠性,需要对两种数据的AOD结果进行时间和空间的匹配。

时间上,取MODIS传感器过境时间的AERONET站点AOD实测值作为真实值,若MODIS传感器过境时间没有实测值,则以前后30 min范围内至少两次实测AOD值的平均值代替。空间上,以AERONET站点经纬度为中心的 5×5 像素取样窗口,在MCD19A2气溶胶影像中获取气溶胶结果,取平均值作为MCD19A2的反演值。根据时间和空间匹配方法,可获取反演值与真实值的AOD点对,用于进行精度验证和对比分析。

3.2 验证方法

为了准确、全面地评价MCD19A2数据气溶胶反演结果的精度和可靠性,选择皮尔森相关系数(R)、相对平均偏离(RMB)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)和均方根误差(RMSE)五个指标,定量验证气溶胶反演精度。 R 用于衡量反演值与真实值之间的线性相关程度, $|R|$ 数值越大说明相关性越大,反演结果越准确;RMB用于评价反演值与真实值之间的偏离程度,RMB越接近于1说明偏离越小,反演结果越准确;MAE表示反演值与实测值之间绝对误差的平均值,用于衡量反演结果绝对误差的整体大小,MAE越小说明反演结果越准确;MRE表示反演值与真实值之间相对误差的平均值,用于衡量反演结果平均误差的整体大小,MRE越小说明反演结果越准确;RMSE表示反演值和真实值之间差异(称为残差)的样本标准差,用于衡量反演值和真实值之间的偏差,RMSE越小说明反演结果越准确。

同时选择线性回归模型($y = kx + b$)和气溶胶反演期望误差(EE)分析反演结果与真实值之间的整体分布情况。 k 越接近于1说明反演值越精确, b 越接近于0说明反演值偏离越小;以 $=/ > / <$ EE分别表示AOD反演结果在期望误差EE范围内、以上和以下的百分比, $=EE$ 越大、 $> / < EE$ 越小说明反演结果与真实值的一致性越好,反演结果越精确。

并以散点图形式更加直观地展示 MCD19A2 数据的 AOD 结果和验证精度。

R、RMB、MAE、MRE、RMSE、EE 的计算公式为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

$$E_{RMB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i / y_i, \quad (7)$$

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad (8)$$

$$E_{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{y_i}, \quad (9)$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (10)$$

$$E_{EE} = \pm (0.05 + 0.2 \times y_i), \quad (11)$$

式中： x 、 y 分别表示 MCD19A2 反演值和 AERONET 真实值； n 表示验证组数。

3.3 验证结果及评价

根据时空匹配方法，共获取 698 组 MCD19A2 和 AERONET 的 AOD 验证点对。图 2 为 AOD 点对的散点分布展示，以及所选择精度验证指标的统计，其中 N 为所获取 AOD 点对的组数。

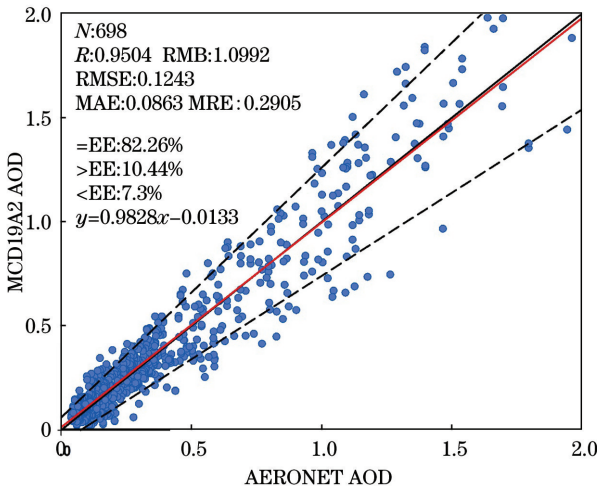


图 2 AOD 点对的散点分布

Fig. 2 Scatter distribution of AOD point pairs

根据精度验证指标的统计可得：相关系数 ($R = 0.9504$) 和相对平均偏离 (RMB 为 1.0992) 非常接近于 1，说明反演结果与实测值之间相关性很好；均方根误差、平均绝对误差和平均相对误差均较小 (RMSE 为 0.1243, MAE 为 0.0863, MRE 为 0.2905)，多方面说明反演结果误差较小；82.26% 的反演结果在期望误差范围内，高估和低估的比例分

别为 10.44% 和 7.3%，说明大部分结果满足误差精度要求。同时，根据 AOD 点对的散点分布可得：验证点对均匀分布在 $y = x$ 直线的两侧，所存在的部分高估和低估结果也非常接近于误差限，线性回归直线的斜率趋近于 1 ($k = 0.9828$) 且截距较小 ($b = 0.0133$)，说明反演值和实测值的一致性较好。

综上验证结果和分析整体说明，MCD19A2 气溶胶结果的精度较高，且与 AERONET 实测值间具有较高的一致性。因此，MCD19A2 产品精度较高且适用于京津冀地区，选择其 AOD 结果表达京津冀地区的气溶胶分布是准确和可靠的。

4 与 AQI 数据的相关性分析

根据 2014 ~ 2018 年覆盖京津冀地区的 MCD19A2 数据，进行格式转化、赋投影信息、剔除无效值、拼接和裁剪处理，获取京津冀地区 2014 ~ 2018 年每日的 550 nm 波段 AOD 影像 (Tiff 格式)；并按照不同年份的数据，逐像元采用均值合成方法，分别获取逐年合成影像和多年合成影像。基于不同级别的气溶胶合成影像与 AQI 数据进行相关性分析，分别在不同尺度上研究 MCD19A2 气溶胶结果对空气污染的指示作用。图 3 为实验中对 MCD19A2 数据的具体处理流程。

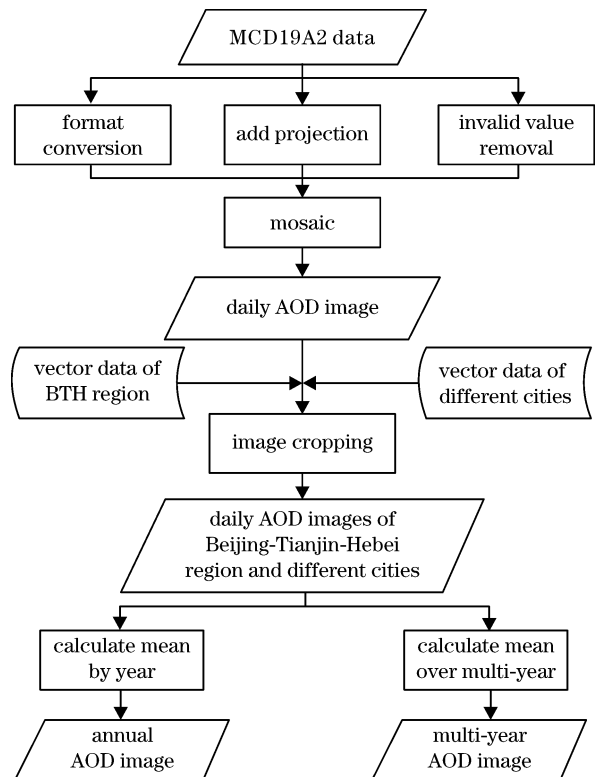


图 3 MCD19A2 数据的处理流程

Fig. 3 Processing flow of MCD19A2 data

4.1 多年平均数据的相关性分析

基于 MCD19A2 数据,获取 2014~2018 年京津冀地区 AOD 多年平均值的空间分布,如图 4 所示。京津冀地区的 AOD 呈现出“南高北低,东高西低”的空间分布特征,且由西北到东南呈现较小幅度的逐渐增大趋势。同时获取 2014~2018 年京津冀地区 13 个城市的 AQI 月均值统计数据,与 AOD 空间分布结果进行联合分析。根据每个城市 2014~2018 年共计 60 个月的 AQI 数据,统计不同等级的频率及百分比,并绘制柱状图(图 5)以更直观的显示。需要说明的是,由于本文使用的 AQI 数据中“优”、“重度污染”及“严重污染”等级出现频率较低,为方便柱状图显示,图 5 中按照 3 个等级显示统计结果。图 5 中城市由左至右的排序,大致按照京津冀地区地理位置由西北到东南。与 AOD 空间分布中由西北到东南逐渐增大的趋势相一致,图 5 中城市空气质量由左至右也逐渐变差;AOD 越大的城市空气质量越差,反之,则相反。说明 MCD19A2 产品 AOD 与空气质量之间存在一定的关系,空气质量

直接反映了空气污染的情况,而空气污染又在一定程度上决定了 AOD 数值的大小。

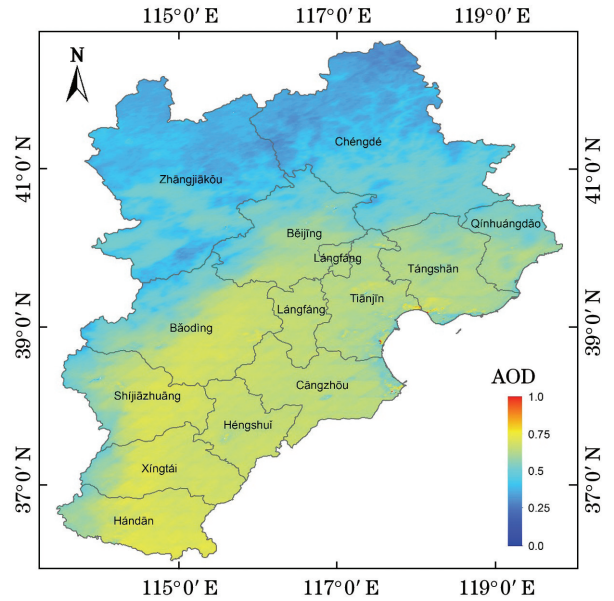


图 4 2014~2018 年京津冀地区 AOD 多年平均值的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of AOD multi-year mean value in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2018

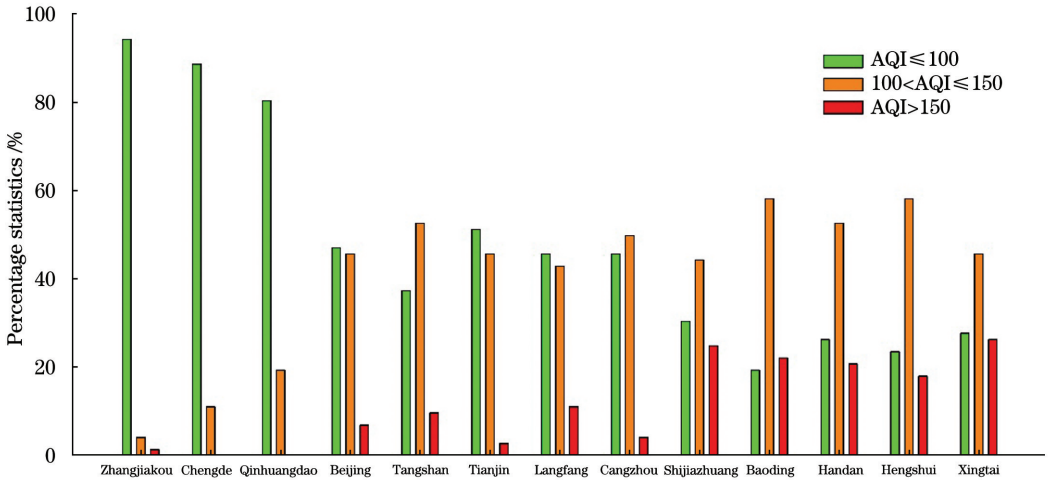


图 5 2014~2018 年京津冀地区城市空气质量等级统计

Fig. 5 Statistics of urban air quality levels in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2018

同时根据获取的 AQI 数据和 MCD19A2 气溶胶结果,计算京津冀地区 13 个城市的 AOD 和 AQI 的多年平均值,如表 2 所示。两行数据间的相关性

系数为 0.8339, AOD 与 AQI 之间具有较高正相关关系。进一步证明了空气质量与 MCD19A2 气溶胶之间的相关关系。

表 2 2014~2018 年京津冀地区各城市的 AQI 和 AOD 多年均值

Table2 Multi-year mean value of AQI and AOD by cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2018

City	Baoding	Beijing	Cangzhou	Chengde	Handan	Hengshui	Langfang	Qinhuangdao	Shijiazhuang	Tangshan	Tianjin	Xingtai	Zhangjiakou
AQI	137.80	109.87	109.98	82.08	128.12	128.63	113.08	83.55	133.25	116.05	105.47	134.18	73.62
AOD	0.4699	0.3591	0.5374	0.2131	0.6036	0.5767	0.5406	0.3774	0.5236	0.4604	0.4926	0.5864	0.2070

相关研究已证明,气溶胶遥感反演可以为空气质量分析提供一定参考和支持^[23-27]。而上述结果进一步证明:MCD19A2 产品 AOD 与 AQI 数据具有较高的相关性,MCD19A2 气溶胶结果可以在一定程度上直接反映城市空气质量,对城市空气污染情况具有直接的指示作用。与实测的空气质量数据相比,MCD19A2 产品具有较大范围的空间覆盖和较好的空间连续性,可为大范围、连续空间的空气质量分析工作提供一定支持。

4.2 逐年平均数据的相关性分析

基于 MCD19A2 数据,获取 2014~2018 年京津冀地区 AOD 逐年平均值的空间分布,如图 6 所示。

同时计算 13 个城市 AOD 和 AQI 的逐年平均数据,绘制二者随年份变化的折线图,如图 7 所示。根据气溶胶结果计算可得,2014~2018 年整个地区的逐年 AOD 平均值分别为 0.4557、0.4249、0.3880、0.3577、0.3540,呈现逐年下降趋势;根据气溶胶影像的空间分布(图 6)和逐年均值变化[图 7(a)],各城市 AOD 也具有明显的逐年下降趋势。根据 AQI 的逐年均值变化[图 7(b)]可以看出,各城市空气质量逐年提高,AQI 呈现出与 AOD 相类似的逐年下降趋势。同时计算城市年平均 AOD 和 AQI 数据的相关系数为 0.8145,说明两种数据具有较高的相关性。

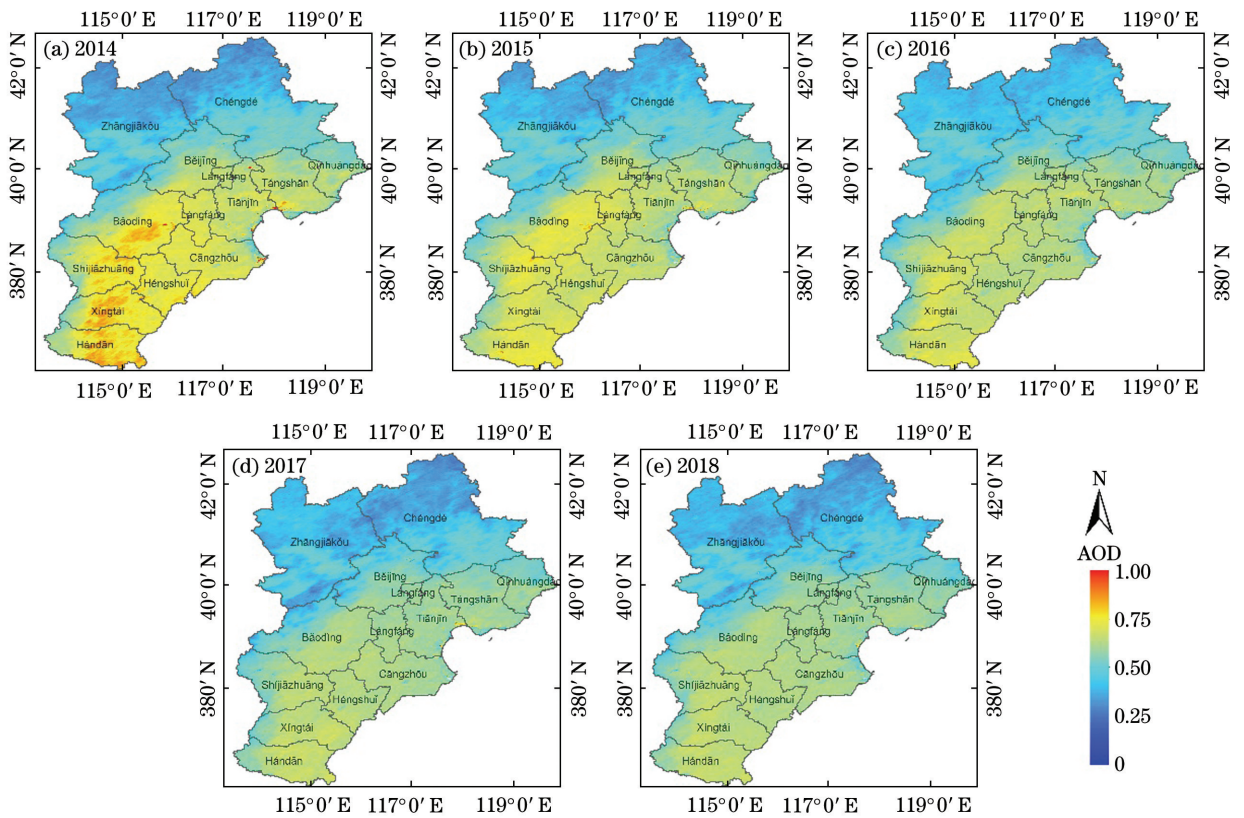


图 6 2014~2018 年京津冀地区 AOD 逐年平均值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of AOD annual mean value in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2018

综上,长时间序列的 MCD19A2 气溶胶数据和 AQI 数据呈现相一致的变化趋势,且具有较高相关性。再次证明 MCD19A2 产品对空气污染状况的指示作用,MCD19A2 产品可为长时间序列的城市空气污染分析提供支持和参考。

5 结 论

本文选择大气污染严重的京津冀地区为研究区,对 MCD19A2 气溶胶光学厚度产品的精度进行验证和分析;并将 AOD 数据与城市 AQI 数据进行

联合分析,研究 MCD19A2 气溶胶数据对空气污染的指示作用。

选择 AERONET 站点的 AOD 实测数据对 MCD19A2 产品气溶胶结果进行验证,并选择 RMB、MRE、RMSE 等精度验证指标进行评价。验证结果表明,误差较小且与实测数据的一致性较好($R=0.9504$,RMB 为 1.0992, RMSE 为 0.1243, MAE 为 0.0863, MRE 为 0.2905, $\pm EE$ 为 82.26%),说明 MCD19A2 数据具有较高的精度和稳定性,其所表达的京津冀地区气溶胶信息是准确和可靠的。同时对

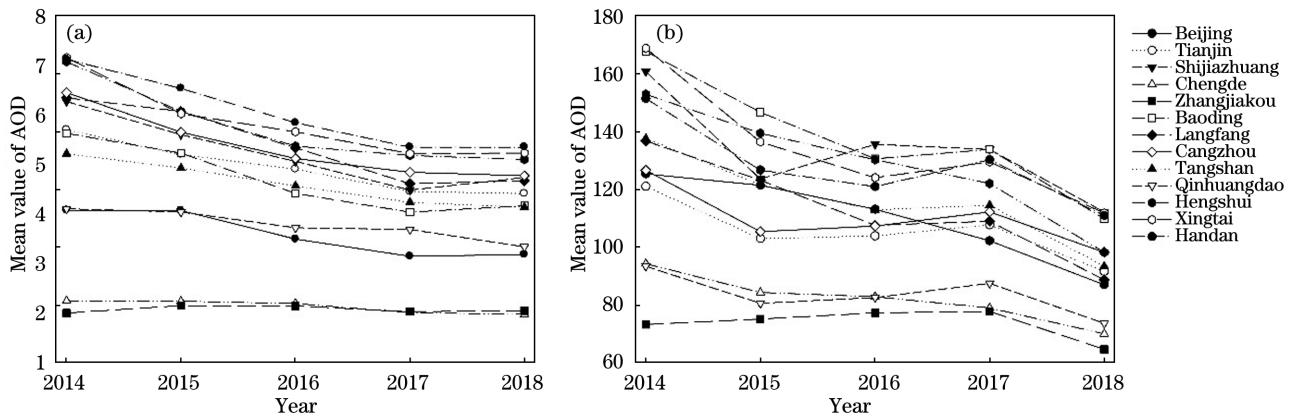


图7 2014~2018年京津冀地区各城市 AOD 和 AQI 年平均值变化

Fig. 7 Annual mean value of AOD and AQI by cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2014 to 2018

2014~2018年京津冀地区的 MCD19A2 AOD 数据和城市 AQI 数据进行联合分析,结果表明 AOD 和 AQI 相关性较高,且两种数据在空间分布和时间序列尺度上具有相一致的变化趋势;证明 MCD19A2 气溶胶数据对空气污染具有直接的指示作用,可为城市空气污染的监测和分析工作提供一定支持。

本文工作为京津冀地区及更多地区的气溶胶研究工作提供了相关参考,在气溶胶特性研究、城市空气污染监测及评价等方面具有重要意义。

致谢 感谢 NASA 网站(<https://www.nasa.gov/>)提供 MCD19A2 气溶胶产品数据;感谢 AERONET 网站(<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)提供相关站点的气溶胶地基观测数据。

参 考 文 献

- [1] Wang L, Zhang F Y, Pilot E, et al. Taking action on air pollution control in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region: progress, challenges and opportunities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(2): 306.
- [2] Bei N F, Zhao L N, Wu J R, et al. Impacts of sea-land and mountain-valley circulations on the air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH): a case study[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 429-438.
- [3] Sokolik I N, Toon O B. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols [J]. *Nature*, 1996, 381(6584): 681-683.
- [4] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 1992, 255(5043): 423-430.
- [5] Kokhanovsky A A, Breon F M, Cacciari A, et al.

Aerosol remote sensing over land: a comparison of satellite retrievals using different algorithms and instruments [J]. *Atmospheric Research*, 2007, 85 (3/4): 372-394.

- [6] Fan J, Guo B F, He H C. Retrieval of aerosol optical thickness with MODIS data over Hangzhou[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0101001.
范娇, 郭宝峰, 何宏昌. 基于 MODIS 数据的杭州地区气溶胶光学厚度反演 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0101001.
- [7] Wong M S, Shahzad M I, Nichol J E, et al. Validation of MODIS, MISR, OMI, and CALIPSO aerosol optical thickness using ground-based sunphotometers in Hong Kong [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(3): 897-918.
- [8] Remer L A, Kaufman Y J, Tanre D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(4): 947-973.
- [9] Lyapustin A, Wang Y, Laszlo I, et al. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D3): D03211.
- [10] Lyapustin A, Wang Y, Frey R. An automatic cloud mask algorithm based on time series of MODIS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D16): D16207.
- [11] Lyapustin A, Tedesco M, Wang Y J, et al. Retrieval of snow grain size over Greenland from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113 (9): 1976-1987.
- [12] Chudnovsky A, Tang C, Lyapustin A, et al. A critical assessment of high-resolution aerosol optical depth retrievals for fine particulate matter predictions

- [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(21): 10907-10917.
- [13] Superczynski S D, Kondragunta S, Lyapustin A I. Evaluation of the multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC) aerosol algorithm through intercomparison with VIIRS aerosol products and AERONET [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(5): 3005-3022.
- [14] Wei J, Sun L. Comparison and evaluation of different MODIS aerosol optical depth products over the Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(3): 835-844.
- [15] Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(12): MOD2-1-MOD2-4.
- [16] Zhou C Y, Liu Q H, Tang Y, et al. Comparison between MODIS aerosol product C004 and C005 and evaluation of their applicability in the north of China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(5): 854-872.
- 周春艳, 柳钦火, 唐勇, 等. MODIS 气溶胶 C004、C005 产品的对比分析及其在中国北方地区的适用性评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(5): 854-872.
- [17] Bilal M, Nichol J E, Nazeer M. Validation of aqua-MODIS C051 and C006 operational aerosol products using AERONET measurements over Pakistan [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(5): 2074-2080.
- [18] Wang W, Mao F Y, Pan Z X, et al. Validation of VIIRS AOD through a comparison with a Sun photometer and MODIS AODs over Wuhan [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 403.
- [19] Ignatov A M, Stowe L L, Sakerin S M, et al. Validation of the NOAA/NESDIS satellite aerosol product over the North Atlantic in 1989 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D3): 5123-5132.
- [20] Xie Y, Zhang Y, Xiong X X, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(33): 5970-5978.
- [21] Sayer A M, Munchak L A, Hsu N C, et al. MODIS collection 6 aerosol products: comparison between aqua's e-deep blue, dark target, and "merged" data sets, and usage recommendations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(24): 13965-13989.
- [22] Liu J J, Liu Y, Wang G Y, et al. Applicability of MODIS C061 aerosol optical depth products in Xi'an region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1001004.
- 刘晶晶, 刘芸, 王国英, 等. MODIS C061 气溶胶光学厚度产品在西安地区的适用性研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1001004.
- [23] Guo Y X, Tang Q H, Gong D Y, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 140-149.
- [24] Soni M, Payra S, Verma S. Particulate matter estimation over a semi arid region Jaipur, India using satellite AOD and meteorological parameters [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(5): 949-958.
- [25] Liu X, Zhu B, Hou X W, et al. Analysis of haze events based on satellite remote sensing and field observations: a case study of severe haze pollution over the Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(3): 641-651.
- 刘璇, 朱彬, 侯雪伟, 等. 基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析: 以长江三角洲地区一次严重霾污染过程为例 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(3): 641-651.
- [26] Huff A K. VIIRS aerosol optical depth (AOD) products for air quality applications [C]// AGU Fall Meeting Abstracts, 2014.
- [27] Mei L L, Xue Y, Guang J, et al. Aerosol optical depth retrieval over land using MODIS data and its application in monitoring air quality [C]// 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 12-17, 2009, Cape Town, South Africa. New York: IEEE Press, 2009: V-421-V-424.
- [28] Bo G Y, Xie C B, Wang B X, et al. Observational study of aerosol distribution over Jing-Jin-Ji area using airborne lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0901007.
- 伯广宇, 谢晨波, 王邦新, 等. 机载激光雷达探测京津冀地区气溶胶的空间分布 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0901007.
- [29] Wang G, Cheng S Y, Li J B, et al. Source apportionment and seasonal variation of PM_{2.5}

- carbonaceous aerosol in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(3): 1-13.
- [30] Holben B N, Tanré D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106 (D11): 12067-12097.
- [31] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Ambient air quality standards: GB 3095—2012 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [32] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical regulation on ambient air quality index (on trial): HJ 633—2012 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行): HJ 633—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.