

利用 FY-4A 卫星光学数据对中国近地面 PM_{2.5} 浓度的估算和检验分析*

江 琪^{1,2} 迎 春³ 王 飞⁴ 张天航¹ 何佳宝⁵ 桂海林¹ 张碧辉¹ 徐 冉¹
JIANG Qi^{1,2} YING Chun³ WANG Fei⁴ ZHANG Tianhang¹ HE Jiabao⁵ GUI Hailin¹ ZHANG Bihui¹ XU Ran¹

1. 国家气象中心, 北京, 100081
2. 上甸子国家大气本底站, 北京, 101507
3. 内蒙古自治区锡林郭勒盟气象局, 锡林郭勒, 026000
4. 中国气象科学研究院, 北京, 100081
5. 宁波市环境监测中心, 宁波, 315012

1. *National Meteorological Centre, Beijing 100081, China*
2. *Shangdianzi National Atmosphere Background Station, Beijing 101507, China*
3. *Meteorological Bureau of Xilinguole League of Inner Mongolia, Xilinguole 026000, China*
4. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*
5. *Environment Monitoring Center of Ningbo, Ningbo 315012, China*

2020-06-16 收稿, 2021-02-24 改回.

江琪, 迎春, 王飞, 张天航, 何佳宝, 桂海林, 张碧辉, 徐冉. 2021. 利用 FY-4A 卫星光学数据对中国近地面 PM_{2.5} 浓度的估算和检验分析. 气象学报, 79(3): 492-508

Jiang Qi, Ying Chun, Wang Fei, Zhang Tianhang, He Jiabao, Gui Hailin, Zhang Bihui, Xu Ran. 2021. Estimates and verification of surface PM_{2.5} mass concentration in China based on FY-4A satellite optical products. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3):492-508

Abstract In this study, the aerosol optical depth (AOD) products of the FY-4A satellite are evaluated base on the satellite data, gridded distribution of near surface PM_{2.5} mass concentration in China is retrieved using the improved PMRS method. The results show that the FY-4A satellite retrieved AOD and AERONET observations agree well at various sites, although there exist certain underestimates or overestimates. The correlation ranges from 0.54 to 0.87. FMF is divided by the criterion of 0.4. When FMF > 0.4, the fitting results are closer to the observations of AERONET than that when FMF ≤ 0.4; however, when FMF ≤ 0.4, the AOD stability of satellite retrievals is better than that when FMF > 0.4. By introducing the size of AOD, the estimation algorithm for VE_f is improved when FMF > 0.4. Using the improved PMRS method, hourly retrievals of China near-surface PM_{2.5} are better correlated with the surface observation. Among all the results, the correlations between retrievals and observations are higher than 0.7 at Urumqi, Shijiazhuang and Xuzhou. However, there are overestimates or underestimates in the retrievals and the errors are determined by various factors. Regarding the spatial distribution, the national average of near-surface PM_{2.5} of satellite retrievals has a good correspondence with the results of near-surface observations in 2019. The monthly variation trends of the two are basically the same, which can basically reflect the spatial distribution of the near-surface PM_{2.5} in China. Specifically, in autumn and winter, satellite retrievals over the areas around Beijing-Tianjin-Hebei, the Fen-Wei Plain and other high-pollution areas all correspond well with ground observations.

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2019YFC0214602)、国家自然科学基金项目(41875181)、中国气象局气象预报业务关键技术发展专项(YBGJXM(2019)02-02)、上甸子国家大气本底站开放研究课题(SDZ2020613)。

作者简介: 江琪, 主要从事环境气象预报和研究工作。E-mail: Jiangqi89@163.com

通信作者: 迎春, 主要从事沙尘研究和预报工作。E-mail: nmgxrk@163.com

Key words FY-4A, Satellite inversion, FMF, AOD, PM_{2.5}

摘 要 对 FY-4A 卫星的气溶胶光学厚度(AOD)产品进行检验,并根据卫星相关观测资料,通过改进后的 PMRS 方法,反演得到中国近地面 PM_{2.5} 质量浓度网格化分布。结果表明, FY-4A 卫星反演不同站点 AOD 与地基观测网(AERONET)观测结果吻合较好,但存在一定的低估或高估现象,相关系数区间为 0.54—0.87。将细粒子比(FMF)以 0.4 为界进行划分, FMF>0.4 时,拟合结果较 FMF≤0.4 时更接近于 AERONET 观测结果;但 FMF≤0.4 时,卫星反演的 AOD 稳定性优于 FMF>0.4 时。通过引入 AOD 的大小,改进 FMF>0.4 时对细粒子柱状体消光比(VE_p)的估算算法,并通过改进后的 PMRS 方法对中国近地面 PM_{2.5} 浓度进行逐时反演,其反演结果和地面观测结果相关较好,其中,乌鲁木齐、石家庄和徐州观测点的相关系数均高于 0.7,但数值上仍存在高估或低估,误差结果由多种因素决定。空间分布中,卫星反演的中国 2019 年近地面 PM_{2.5} 浓度月均值与近地面观测的结果有较好的对应关系,二者逐月演变趋势基本一致,基本可以反映出中国近地面大气细粒子的空间分布,特别是秋、冬季京津冀周边区域、汾渭平原等污染高值区均与地面观测对应较好。

关键词 FY-4A, 卫星反演, 细粒子比, 气溶胶光学厚度, PM_{2.5}

中图法分类号 P405 P412.27

1 引 言

快速发展的经济和城市化进程使得大气污染物排放量居高不下(江琪等, 2018)。以霾为代表的空气污染严重危害人体健康(Pope III, et al, 2009)和大气环境(Han, et al, 2017; Wang, et al, 2018)。细颗粒物(PM_{2.5})可以吸附大量的有毒有害物质,在大气中停留时间长,且可以远距离输送,对大气消光贡献显著,是霾形成的关键因素。

中国幅员辽阔,下垫面条件复杂,气溶胶的时空分布决定了地基观测站难以获取全面的气溶胶分布特征。而卫星遥感手段可以提供广阔背景条件下的大气污染监测(Bellouin, et al, 2005; Colarco, et al, 2010),通过遥感方法监测可以保留颗粒物的原有特性不被物理手段破坏,因而在污染空间分布监测和远距离输送上具有广阔的应用前景。气溶胶的光辐射特性可以通过光学厚度、复折射指数和谱分布等参数表征。其中,通过遥感手段获取的大气气溶胶光学厚度(Aerosol optical depth, AOD)可以比较全面地反映整层大气气溶胶的消光特征和含量,是大气校正和气溶胶特征中的重要参数之一。同时,AOD 的相关数据已经可以较为方便的获取。Xue 等(2014)通过联合使用 Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)/Terra 和 MODIS/Aqua 数据气溶胶特性协同反演算法,产生了亚洲区域长时间序列的 AOD 数据集。AERONET (Aerosol Robotic Network)地基观测网可以提供超过 300 个长期观测站的 AOD 数据。中国在遥感气溶胶光学厚度领域发展较快,其中,第二代极轨气

象卫星(FY-3)和风云四号气象卫星(FY-4A)均可通过多通道的光谱信息,高精度定量反演气溶胶光学厚度。

垂直方向上的大气光学特性与地表污染物浓度的关系是影响卫星、地基遥感等反演近地面 PM_{2.5} 浓度的关键因素。利用 AOD 反演细颗粒物的研究已有很多,但均存在一定的局限性(Kahn, et al, 2010),例如多种数学统计方法(Koelemeijer, et al, 2006; Li, et al, 2017; Ma, et al, 2016)应用最为广泛但忽略了变量间的内在机理;耦合模型法(Wang J, et al, 2010)在一定程度上提高了 AOD 与细颗粒物的相关,但是由于模型参数较多应用起来较为复杂;以及基于垂直订正和湿度订正开展的物理学方法等(Engel-Cox, et al, 2006; Hutchison, et al, 2008; Wang Z F, et al, 2010)。Physical PM_{2.5} remote sensing (PMRS)方法(Zhang, et al, 2015)是基于物理学开展的统计方法,主要通过易获取的卫星遥感和常规地面观测参数,从不同污染水平下的瞬时遥感测量资料中估算地表逐时 PM_{2.5} 浓度,时空分辨率和时效性均较高,可以满足高精度、规范化的业务需要。同时,基于卫星反演近地面颗粒物的研究多基于极轨卫星开展,无法全面反映细颗粒物的时、空动态变化和日变化等特征,而利用静止卫星在相关方面开展工作可以弥补这一不足。

本研究利用风云四号静止气象卫星首发星(FY-4A)的光学遥感数据,包括气溶胶光学厚度、细粒子比(Fine mode fraction, FMF)等,结合地面观测资料,基于改进的 PMRS 方法,估算中国网格化地表 PM_{2.5} 质量浓度,并对其不确定性进行评

估, 以为大气环境监测和预报提供更有力的数据支撑。

2 数据和方法

2.1 数据

文中使用的卫星遥感参量包括气溶胶光学厚度(550 nm)、大气细粒子比等数据均来自于风云四号气象卫星首发星搭载的多通道扫描成像辐射计(AGRI)观测数据的相关试验产品, 其空间分辨率为4 km, 时间分辨率为1 h, 产品信息参见 Zhang P 等(2019)和 Zhang X Y 等(2020)。PM_{2.5} 浓度近地面观测数据来自于中国环境监测总站网站(<http://www.cneme.cn/>)。文中使用的气象要素逐时数据由中国气象局国家气象观测站提供。文中使用自然邻域法将地面观测的各气象要素、PM_{2.5} 浓度以及质量控制后的卫星遥感参量等数据统一插值成0.25°×0.25°的网格数据。

此外, 文中使用的太阳-天空辐射计(CE318)观测资料来自于全球气溶胶地基观测网 AERONET 的 2.0 级数据, 由于 AERONET 测量波段中没有 550 nm 的观测值, 使用前进行了波长转化。

2.2 PMRS 方法原理

假设粒子遵循吸湿增长方程 $f_0(\text{RH}) = a(1 - \text{RH}/100)^{-b}$, 在定义细粒子柱状体积消光比 ($\text{VE}_f = \text{细粒子柱状体积}/\text{细粒子的光学厚度}$) 后, 经过公式推导, 可得到如下近地面 PM_{2.5} 浓度的推算公式, 相关推算方法和具体原理详见 Zhang 等(2015)。

$$\text{PM}_{2.5} = \text{AOD} \times \left(\frac{\text{FMF} \times \text{VE}_f \times \rho_{f,\text{dry}}}{\text{PBLH} \times f_0(\text{RH})} \right)$$

式中, RH 为大气相对湿度, $\rho_{f,\text{dry}}$ 为干细粒子密度, PBLH 表示粒子的边界层高度 (Planetary boundary layer height, PBLH), FMF 和 AOD 分别表示气溶胶粒子的大气细粒子比和气溶胶光学厚度。

由于主要的研究区域为中国大陆, 吸湿增长方程中参数 a 和 b 的值采用 Liu 等(2008)对大陆背景的研究结果, 其中 $a=0.97$, $b=0.23$ 。文中采用的密度值 ($\rho_{f,\text{dry}}$) 为 1.6 g/cm³, 选取原因和误差分析将在下文做详细介绍。由于光学计算中常使用体积等效直径 (d_p), 而细粒子中粒径 2.5 μm 的阈值为空气动力学直径 (d_a), 二者的转化与气溶胶密度有关, d_p 在不同地区的测量值略有差异, 本研究采用

Gao 等(2007)对北京的测量值 $d_p=2.18$ μm、上海地区测量值 $d_p=2.09$ μm、Hand 等(2002)对美国 Texas 观测结果 $d_p=2.04$ μm 和 McMurry 等(2002)对美国 Atlanta 观测值 $d_p=2.07$ μm 的均值 $d_p=2.1$ μm 作为细粒子截断粒径。

由于缺乏覆盖中国范围的边界层相关高度的观测值, 本研究采用罗氏法计算的混合层高度结果进行替代。该方法详见饶晓琴等(2008)。

2.3 PMRS 反演算法的改进

PMRS 反演算法中, VE_f 是未知量, 也是整个算法的核心点。Zhang 等(2015)的研究认为 VE_f 和 FMF 存在一定的相关关系, 并利用 8 个 AERONET 的观测站点, 根据 FMF 建立了一套 VE_f 的拟合模型 (未考虑气溶胶粒径), 其拟合曲线的离散点较多, 最终反演得到的 PM_{2.5} 浓度和地面观测值的相关系数 (R) 仅为 0.5。为了更为准确地估算 VE_f 值、提高 PM_{2.5} 浓度反演结果的准确度, 并扩大反演模型的适用范围, 本研究对 Zhang 等(2015)建立的相关拟合算法进行改进, 一方面, 选取的研究站点数增大到东亚区域的 24 个 AERONET 站点, 另一方面, 通过对细颗粒物和粗颗粒物的划分, 建立了两套不同的拟合模型, 并针对细颗粒物估算模型中对估算结果影响较大的离散点进行分析, 通过引入 AOD 值, 进一步对细粒子分别建立 $\text{AOD} \leq 0.1$ 和 $\text{AOD} > 0.1$ 的两套估算模型。

文中随机选取 AERONET 中 24 个东亚区域的观测站点数据, 对其中的气溶胶粒子的体积谱分布分别进行分析。由图 1 可见, 不同地区气溶胶体积谱分布存在一定差异, 主要可以划分为 4 类, 分别为粗粒子和细粒子 (沙尘和霾) 混合型、粗粒子 (沙尘) 型、清洁型以及细粒子 (霾) 型。选取的 24 个站点粒子谱分布均表现为双峰型, 其中, 粗粒子代表站共有 7 个 (图 1a, 包括 Dunhuang (中国敦煌)、Minqin (中国民勤)、Zhangye (中国张掖)、Jaipur (印度)、Gual_Pahari (印度)、Amity (印度) 和 Kanpur (印度)), 其谱分布表现为粗模态粒子峰值浓度为细粒子的 2—10 倍, 其中 Dunhuang 站的粗模态粒子 (> 1 μm) (Hussein, et al, 2004) 占总粒子体积比达到 80%。细粒子的代表站共有 4 个 (图 1b, 包括 Hongkong (中国香港)、Kaiping (中国开平)、Maeson (泰国) 以及 Yufa (中国榆堡)), 其谱分布特

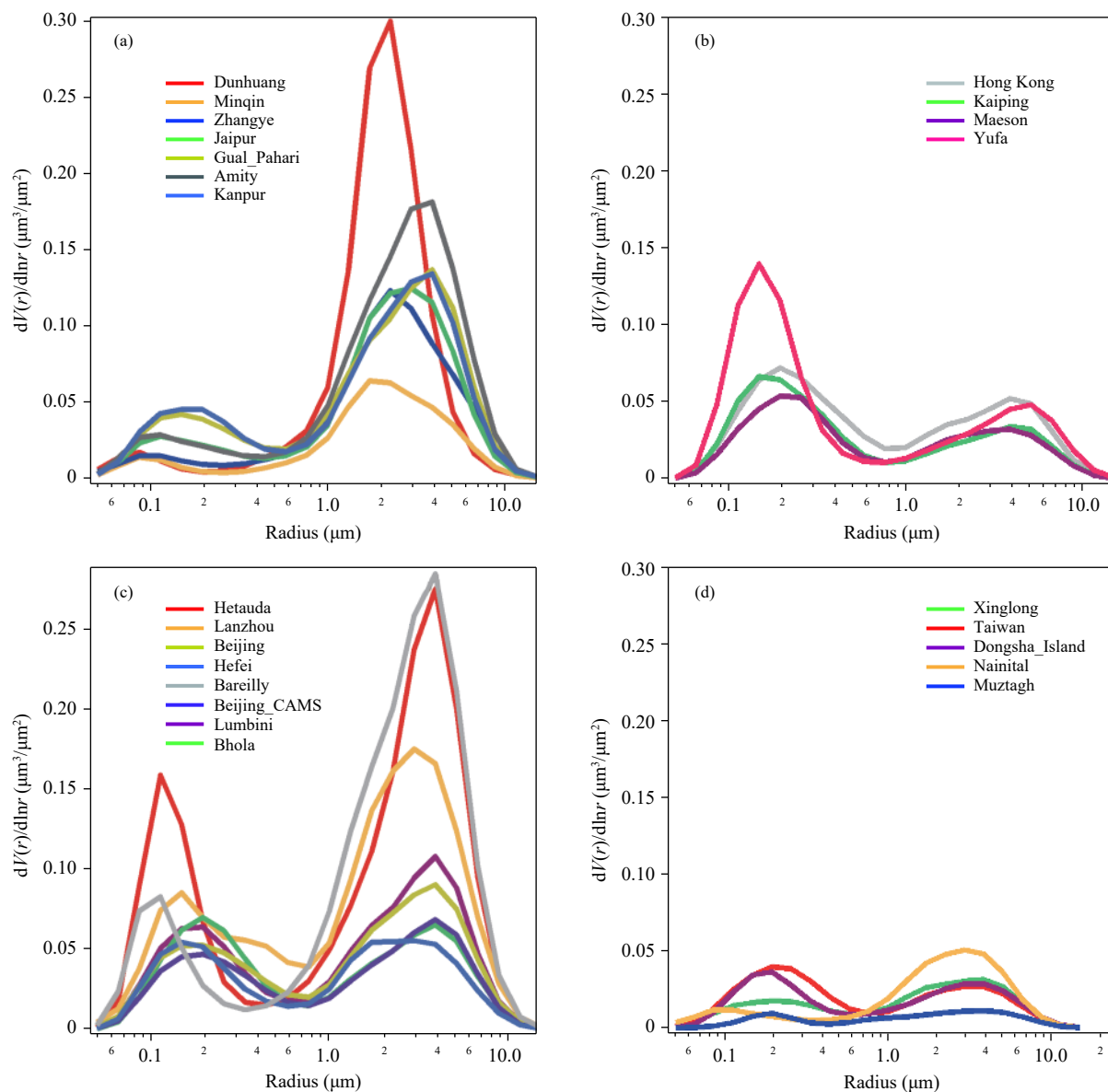


图 1 AERONET 选取的 24 个不同站点中四类气溶胶粒子的平均体积谱分布
(a. 粗粒子型, b. 细粒子型, c. 混合型, d. 清洁型)

Fig. 1 Average volume spectrum distributions of four types of aerosol particles at 24 different sites of AERONET
(a. dust, b. haze, c. mixed and d. clean)

征表现为细模态粒子的体积浓度峰值高于粗模态粒子,其中 Yufa 站的谱分布最为典型,其细粒子模态峰值约为粗模态峰值的 3 倍。混合型站点数最多,共 8 个(图 1c,包括 Hetauda(尼泊尔)、Lanzhou(中国兰州)、Beijing 和 Beijing_CAMS(中国北京)、Hefei(中国合肥)、Bareilly(印度)、Lumbini(尼泊尔)、Bhola(孟加拉国)),其细模态粒子和粗模态对应的两个峰值均较为显著,且相较于粗粒子型,细模态的峰值浓度均高于 $0.05 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ 。共有

5 个站点(图 1d,包括 Xinglong(中国兴隆)、Taiwan(中国台湾)、Dongsha_Island(中国东沙岛)、Nainital(印度)和 Muztagh(中国木孜塔格))的体积谱分布体现为清洁型,其两个峰值浓度相当,且均较低($<0.05 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)。

将 AERONET 选取的 24 个不同站点的 FMF 值和计算所得的 VE_f 进行相关性分析(图 2),各个站点的 FMF 和 VE_f 均位于相近的区间中,无论站点类型为细粒子型、粗粒子型、混合粒子型或是清洁

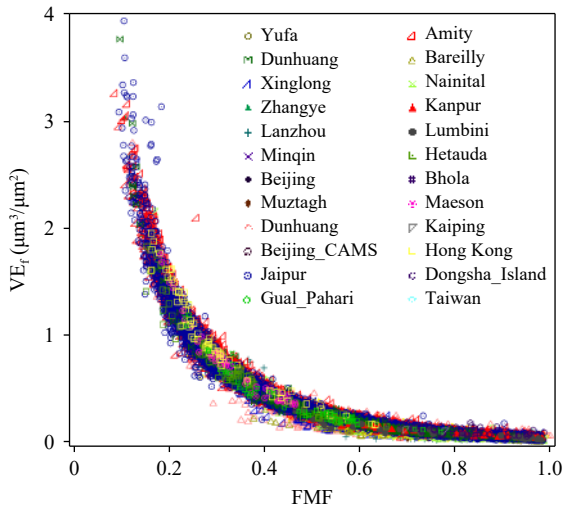


图2 选取的24个AERONET观测点FMF和 VE_f 散点
Fig. 2 Correlation between FMF and VE_f at 24 observation stations of AERONET

型, FMF和 VE_f 均表现为较为一致的相关关系。本研究以 $FMF=0.4$ 为界, 对FMF和 VE_f 的相关进行分段拟合, 0.4的阈值选择有两个原因, 其一, 通过多种拟合方案的对比, 以0.4为界有较好的拟合效果和较高的回算相关, 其二, 粗粒子污染的代表站, 如Dunhuang站, 研究时段内, FMF(AERONET)均值为0.27, Minqin站FMF均值为0.34, Zhangye站FMF均值为0.36, 此类区域的FMF普遍小于0.4,

而霾型以及沙尘和霾混合的地区, 如沙尘和霾混合型的Lanzhou, FMF均值为0.65, 再如Beijing的FMF均值为0.70, FMF普遍高于0.4。

由于 $FMF \leq 0.13$ 的观测数据低于总样本量的0.01%, 且对拟合结果影响较小, 故不对其进行研究。对 $FMF \geq 0.4$ 和 $0.13 < FMF < 0.4$ 时FMF和 VE_f 的相关关系分别进行二次多项式拟合(图3), 拟合曲线为 $VE_f = m \times FMF^2 + n \times FMF + p$ 。其中, $0.13 < FMF < 0.4$ 时, $m=23.2 \pm 1.2, n=-18.9 \pm 0.7, p=4.3 \pm 0.09$, 通过该拟合方程回算得到的 VE_f ($VE_{f_predict}$)与AERONET实测的 VE_f ($VE_{f_AERONET}$)结果较为吻合, 斜率为0.98, 决定系数(R^2)可达0.96(图3a)。 $FMF \geq 0.4$ 时, 拟合方程中, $m=1.3 \pm 0.02, n=-2.4 \pm 0.03, p=1.1 \pm 0.01$, 通过该拟合得到的 $VE_{f_predict}$ 与 $VE_{f_AERONET}$ 的决定系数($R^2=0.81$)低于 $0.13 < FMF < 0.4$ 的决定系数, 同时, 存在一定的低估(图3b)。为了提高 $FMF \geq 0.4$ 估算的准确度, 对比了4种不同类型的大气代表站 $FMF \geq 0.4$ 时的FMF和 VE_f 的相关关系, 由图3c可见, 对相关产生影响的离散分布点(方框)主要为清洁站点和一部分沙尘站点, 这样的离散分布点相对较少, 仅占到统计点的0.5%, 但对于统计结果却有较大影响。在引入AOD后(图3d)发现, 离散点均对应较低的AOD(≤ 0.1), 对应整层大气非常清洁时的拟合结果不够理想, 因而, 文中

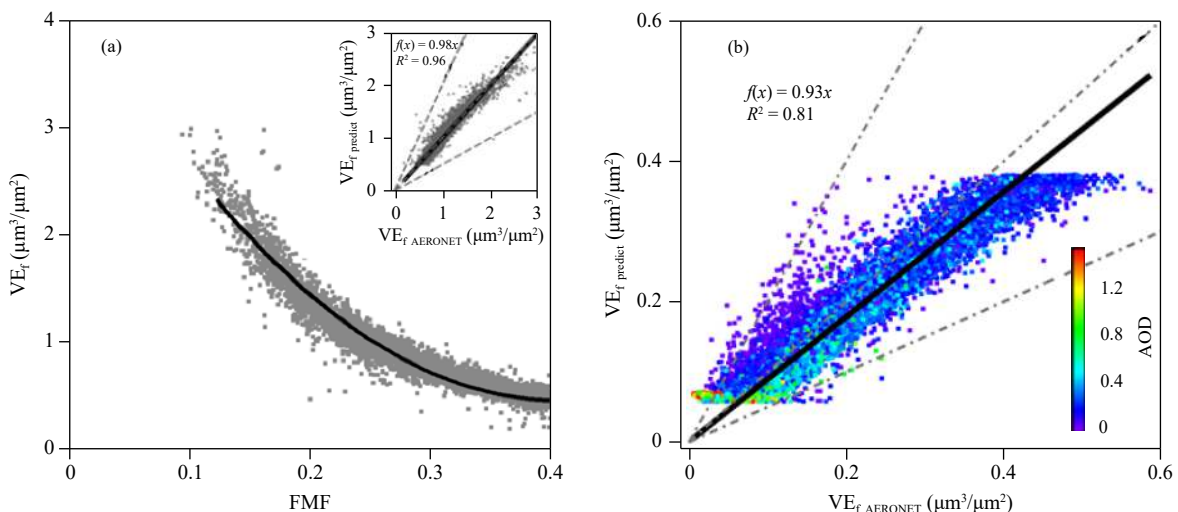
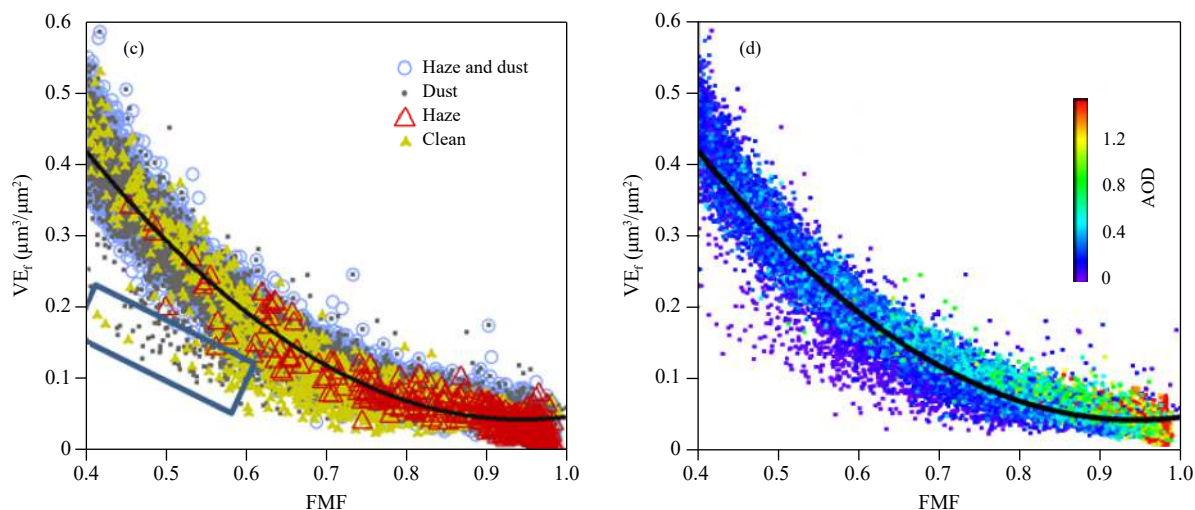


图3 0.13<FMF<0.4时FMF和 VE_f 的拟合曲线(a, 内图为估算的 $VE_{f_predict}$ 和 $VE_{f_AERONET}$ 对比), $FMF \geq 0.4$ 时 $VE_{f_predict}$ 和 $VE_{f_AERONET}$ 对比(b)及不同类型气溶胶粒子(c)、不同AOD条件下(d)FMF与 VE_f 的相关关系
Fig. 3 Fitting curves of FMF and VE_f (a. $0.13 < FMF < 0.4$), (b) correlations between $VE_{f_predict}$ and $VE_{f_AERONET}$ when $FMF \geq 0.4$, correlations between FMF and VE_f when $FMF \geq 0.4$ under four different types (coarse particles, fine particles, mixed type and clean type)(c), and AOD (d)



续图 3

Fig. 3 Continued

对 $FMF \geq 0.4$ 时的拟合方程做进一步改进, 分为 $AOD > 0.1$ (图 4a) 和 $AOD \leq 0.1$ (图 4b) 两种情况。其中, $AOD > 0.1$ 时, 拟合方程中系数分别为: $m=1.45 \pm 0.09$, $n=-2.7 \pm 0.18$, $p=1.3 \pm 0.06$, 此时, $VE_{f \text{ predict}}$ 与 $VE_{f \text{ AERONET}}$ 的决定系数提高到 0.96, 斜率也更接近于 1 (0.98)。 $AOD \leq 0.1$ 时正常大气处于非常洁净的状态, 其分布相对较为离散, 该条件下拟合方程系数为 $m=1.62 \pm 0.10$, $n=-2.69 \pm 0.13$, $p=1.17 \pm 0.04$, $VE_{f \text{ predict}}$ 与 $VE_{f \text{ AERONET}}$ 也存在较好的相关 ($R^2=0.78$)。

3 结果与讨论

3.1 FY-4A 卫星气溶胶光学产品评估

在利用卫星反演近地面 PM_{2.5} 浓度前, 需对 FY-4A 卫星的相关光学产品进行评估检验。使用前, 对 FY-4A 的 AOD (AOD FY-4A) 和 FMF (FMF FY-4A) 产品进行了数据质量控制: 首先对原始 AOD FY-4A 和 FMF FY-4A 产品 (4 km 分辨率) 的逐 5×5 网格内的 25 个点进行判别, 如果该网格内有值的像元点数少于 4 个, 则认为可能是由次网格

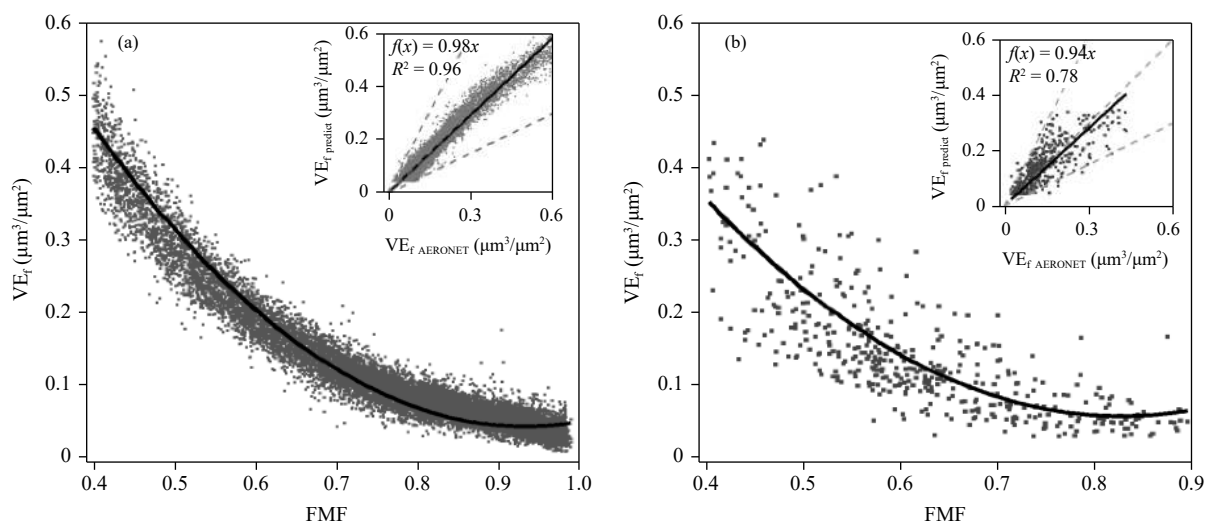


图 4 $AOD > 0.1$ (a) 和 $AOD \leq 0.1$ (b) 两种条件下 $FMF \geq 0.4$ 时 FMF 和 VE_f 的拟合曲线和估算得到的 $VE_{f \text{ predict}}$ 和 $VE_{f \text{ AERONET}}$ 相关对比

Fig. 4 Fitting curves of FMF and VE_f when $FMF \geq 0.4$ under $AOD > 0.1$ (a) and $AOD \leq 0.1$ (b) and correlation between $VE_{f \text{ predict}}$ (estimated according to the fitting curve) and $VE_{f \text{ AERONET}}$ respectively

云或信噪比较差导致的,计算时将被剔除;而后,对3×3网格内的像元点求取方差,如果该像元的值和均值的差异大于3倍方差,则认为其为异常噪点,并对其剔除(曾湧等,2015)。对质量控制后的AOD进行检验评估。随机选取AERONET东亚区域10个观测站用于检验AOD FY-4A结果。对比时段为2017年7月1日至2019年12月31日。其中AERONET的AOD(AOD AERONET)的波段已换算为550 nm。由于卫星AOD结果基于像元,需将

AERONET地基观测资料与AOD FY-4A结果进行匹配,选取整点,将AERONET观测结果±30 min内的数据进行平均,同时,选取FY-4A卫星空间上以AERONET站点为中心的9个格点内的有效结果进行平均,且要求像元数量不少于5个。

FY-4A卫星反演的AOD产品采用暗目标算法,与AERONET站点对比结果如图5所示,AERONET选取站点的相关信息及其与FY-4A卫星反演AOD的拟合结果详见表1。由于AERONET

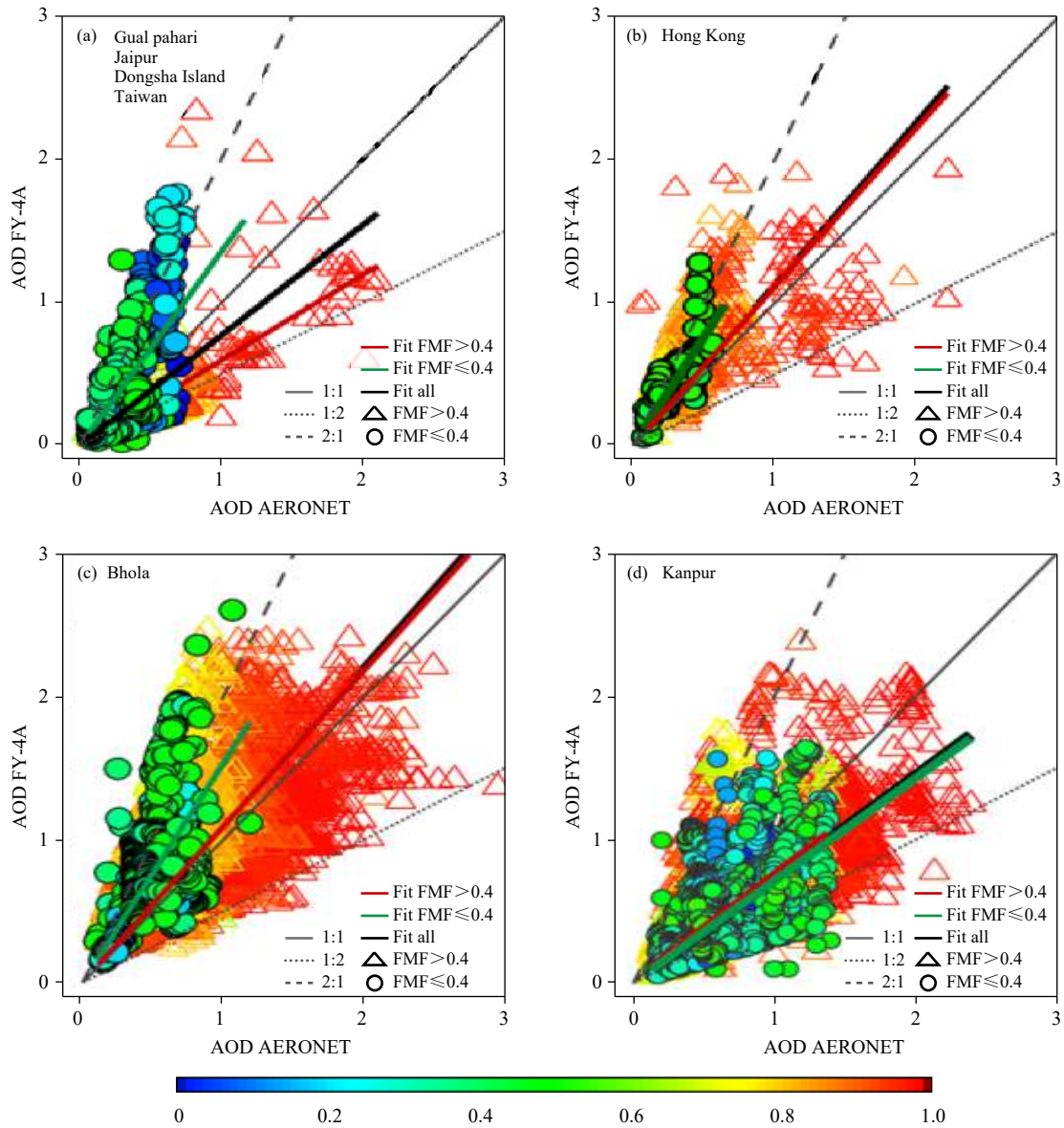
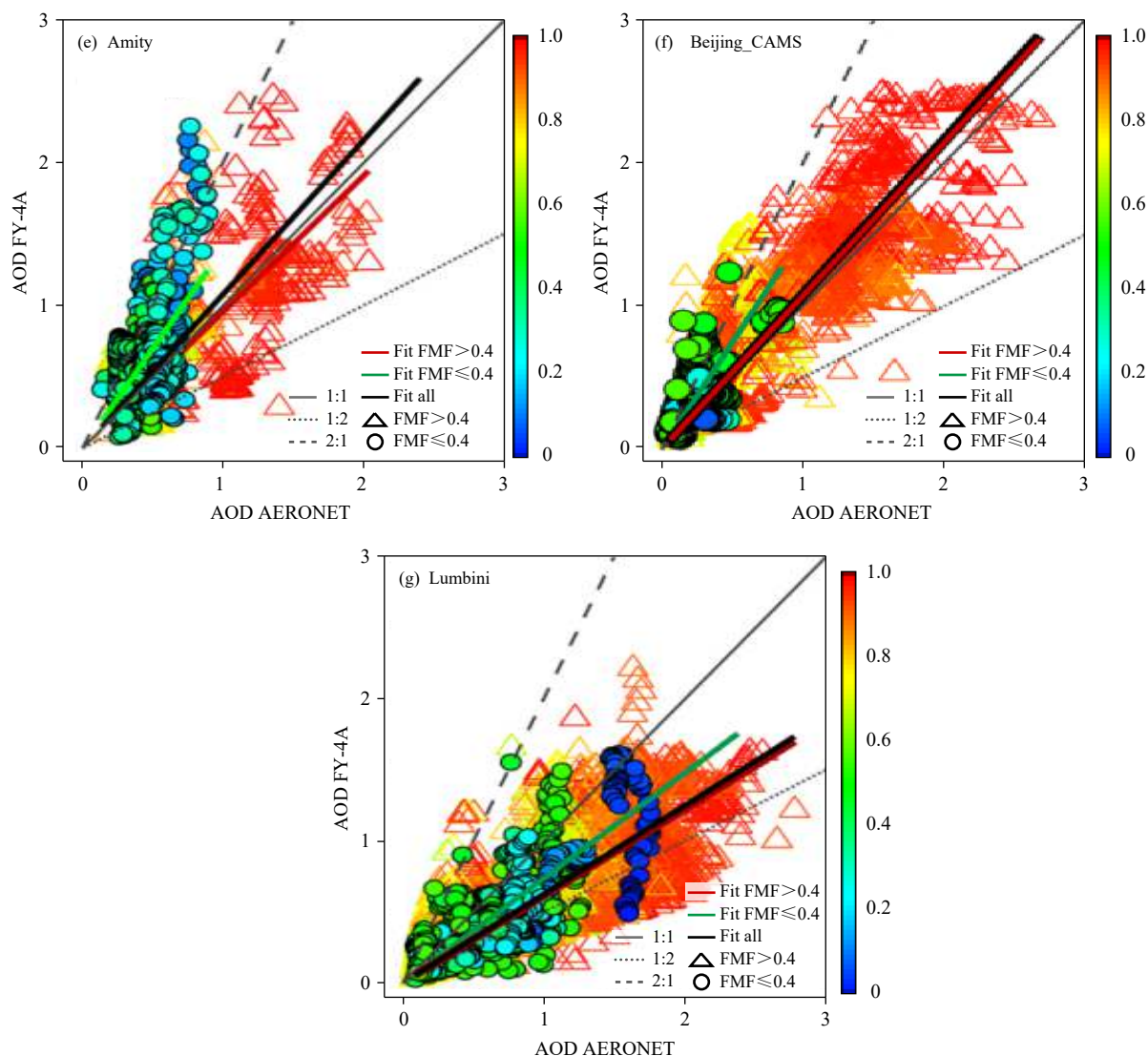


图5 不同站点 AOD FY-4A 与地基 AOD AERONET 结果对比(拟合线为黑色,色标为 FMF AERONET;对 FMF>0.4(三角形,拟合线为红色)和 FMF≤0.4(圆形,拟合线为绿色)两种情况的相关分别进行拟合)

Fig. 5 The correlation between AOD FY-4A and AOD AERONET (the fitting line is black, the colored symbols denote FMF AERONET; The correlations when FMF>0.4 (triangles, fitting line is red) and FMF≤0.4 (circles, fitting line is green) are fitted separately)



续图 5

Fig. 5 Continued

中 Jaipur、Gual_Pahari、Dongsha_Island 和 Taiwan 四个站点与 FY-4A 卫星 AOD 的可匹配点个数相对较少, 故将 4 个站点数据叠加进行分析。为方便对比, 建立的线性拟合方程为 $y=af(x)$, a 为斜率, 截距设置为 0。对所有匹配数据进行相关性分析 (图 5, 黑色拟合线) 可以看出, a 的变化范围为 0.67—1.13, R 区间为 0.54—0.87, FY-4A 卫星反演的不同站点 AOD 结果整体较好, 但较地基观测结果还是存在一定的低估或高估, 其中, Beijing_CAMS 的拟合效果最佳, AOD FY-4A 较地基观测结果略高 (a 为 1.08), R 为 0.87。FMF 可以反映大气中细粒子的比例, FMF 大时, 表示大气中细颗粒占比较高,

反之细颗粒物占比低于粗颗粒物。对所有匹配点根据 AERONET 中 FMF (FMF AERONET) 进行颜色分类 (图 5) 可见, 除了 Kanpur 和 Lumbini 两个站点 FMF 的颜色分布较为集中外, 其他各站点较低的 FMF 和较高 FMF 时 AERONET 和 FY-4A 卫星的 AOD 散点分布具有显著的差异。将 FMF 以 0.4 为界 (FMF > 0.4 为细粒子比重较大时段 (红色拟合线), FMF ≤ 0.4 为粗颗粒物主导时段 (绿色拟合线)) 进行分段拟合。分段拟合后, 两种情况下相关系数均高于 0.62 (表 1)。FMF > 0.4 时 Hongkong、Bhola、Amity 和 Beijing_CAMS 四个站点的拟合结果较 FMF ≤ 0.4 时更接近于 AERONET 观测结果

表 1 文中 AERONET 站点信息及其与 AOD FY-4A 的相关性结果
Table 1 AERONET sites information and their correlations with AOD FY-4A

名称	AERONET 站点信息				FY-4A 和 AERONET 的 AOD 相关性结果								
	经度 (°E)	纬度 (°N)	海拔 (m)	匹配站 点数	拟合方程斜率(a)			R			RMSE		
					FMF >0.4	FMF ≤0.4	总	FMF >0.4	FMF ≤0.4	总	FMF >0.4	FMF ≤0.4	总
Jaipur	75.80	26.91	450	921	0.60	1.36	0.77	0.74	0.72	0.54	0.33	0.29	0.40
Gual_Pahari	77.15	28.43	250										
Dongsha_Island	116.73	20.70	5										
Taiwan	121.00	24.78	99										
Hong Kong	114.26	22.21	80	937	1.11	1.53	1.13	0.62	0.73	0.68	0.28	0.33	0.36
Bhola	90.76	22.23	7	13149	1.09	1.54	1.11	0.60	0.63	0.58	0.29	0.38	0.33
Kanpur	80.23	26.51	123	7729	0.75	0.72	0.73	0.63	0.69	0.64	0.22	0.25	0.24
Amity	76.92	28.32	285	1846	0.96	1.4	1.08	0.75	0.62	0.66	0.25	0.33	0.27
Beijing_CAMS	116.32	39.93	106	2340	1.07	1.49	1.08	0.85	0.72	0.87	0.20	0.25	0.17
Lumbini	83.28	27.49	110	9666	0.65	0.74	0.67	0.75	0.80	0.75	0.26	0.20	0.21

(a 更接近于 1); 但 $FMF \leq 0.4$ 时, 大多数站点的散点分布更为集中, 反演稳定性优于 $FMF > 0.4$ 时。

FMF FY-4A 产品的反演方法采用与 MODIS 卫星相同的模态组合算法, 此算法存在的不确定性较高, 其中 FMF MODIS 在陆地上空精度存在显著的偏差 (Zhang, et al, 2015; Li, et al, 2016), 均方根误差 (RMSE) 为 0.61 左右。对 2017 年 7 月至 2019 年 12 月的 FY-4A 卫星和 FMF AERONET 做比较, 结果如图 6 所示。6 个选取站点 (Amity、Taiwan、Gual_Pahari、Hong Kong、Jaipur 和 Beijing_CAMS), FMF FY-4A 和 FMF AERONET 的相关系数为 0.27—0.77, 均方根误差小于 0.7。综上, FMF FY-4A 和 AOD FY-4A 产品仍存在一定的不确定性, 其产品的准确度仍有待从地表反射率的参数化以及气溶胶模型两方面加强和提高。

对 2019 年 AOD FY-4A (550 nm) 进行逐半年平均, 结果如图 7。2019 年上半年, 中国 AOD 高值区域 (> 0.8) 主要集中于华中、京津冀中南部、长江三角洲、川渝、汾渭平原和珠江三角洲一带, 2019 年下半年, AOD 高值区域范围显著减小, 但山东西部、江苏北部一带的 AOD 较上半年略有增大。AOD 的半年均值分布与近地面大气污染有一定的对应关系, 中国环境监测总站的观测数据显示, 上半年, 全国和 2+26 个城市地面观测 $PM_{2.5}$ 质量浓度均值分别为 43.01 和 63.78 $\mu g/m^3$, 下半年有显著降低, 质量浓度均值为 33.92 和 46.13 $\mu g/m^3$ 。2019 年全年, FY-4A 卫星反演的中国区域 AOD 均

值为 0.41, 与基于地面光度计观测中国区域的年均值 (0.43) 相当 (Xin, et al, 2007), 其中上半年和下半年均值分别为 0.45 和 0.38。

由于 FY-4A 卫星采用暗目标算法反演 AOD, 难以实现在亮地表上空的反演。中国大陆地区下垫面地表类型复杂, 其中西北区域广泛分布高反射率的沙漠以及干旱和半干旱的裸露地表, 同时, 秋冬季西北、东北等地的部分地区长时间的地面积雪覆盖均使得上述区域 AOD 反演结果存在大量无值区, AOD 半年均值不能对其实际情况进行全面的反映。同时, 由于新疆南疆盆地常年存在高频率的扬沙或浮尘天气, 大气对流活动相对旺盛, 常有云体覆盖, 非晴空像元概率较大, 使得 AOD 反演出现长时间缺失。AOD 半年均值图中, 特别是上半年西北区域沙尘活动相对频繁, 青海、内蒙古、甘肃等地的 AOD 高值区可能与沙尘气溶胶有关。

与日本葵花 8 卫星同时段的 AOD (AOD H8) 均值结果进行对比 (图 8) 可以看出, H8 和 FY-4A 反演的 AOD 结果整体较为接近。其中, 2019 年上半年, AOD H8 和 AOD FY-4A 均在京津冀中南部、山东西部和河南中东部一带呈现高值, AOD H8 的数值略高于同区域 AOD FY-4A。广东和广西一带, AOD H8 和 AOD FY-4A 的反演结果也较为吻合。但长江三角洲一带, AOD H8 明显低于 AOD FY-4A。由上半年至下半年, AOD H8 和 AOD FY-4A 的变化趋势一致, 下半年中东部的 AOD 数值明显低于上半年, 但 AOD FY-4A 在中东部的结果略

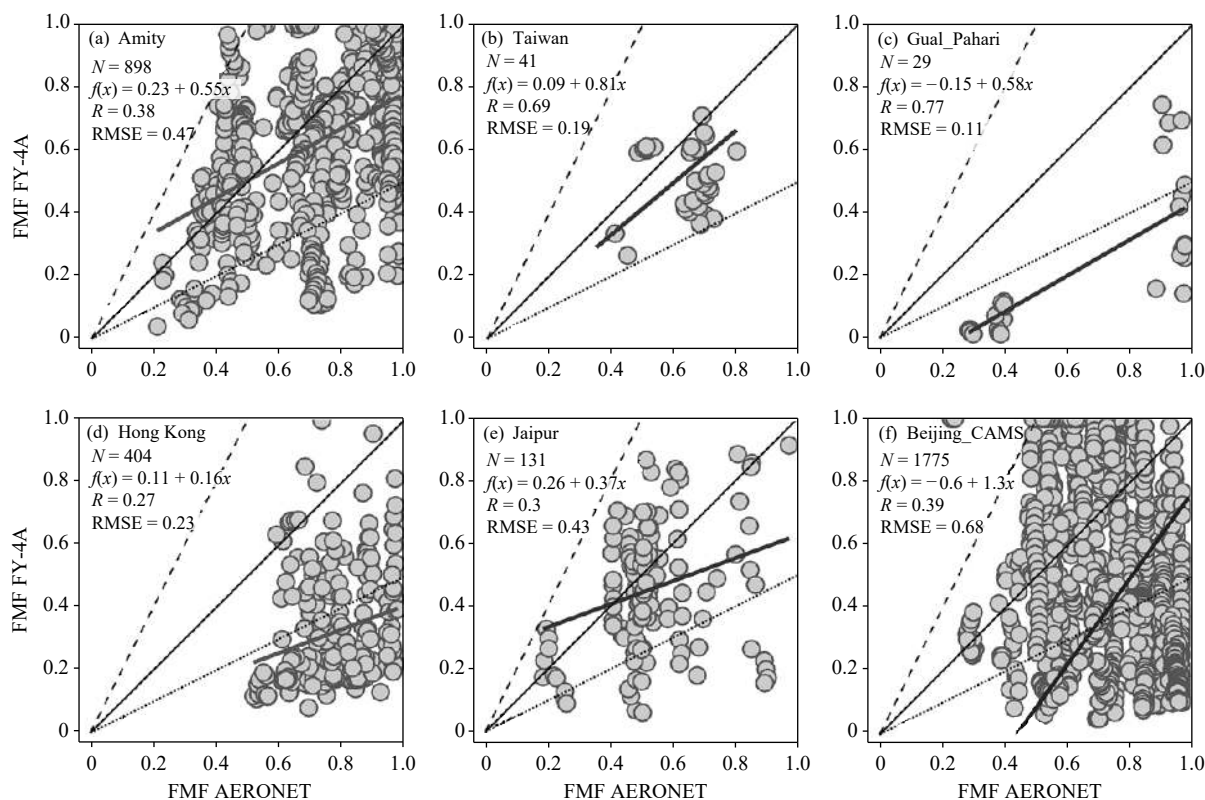


图6 不同站点FMF FY-4A与FMF AERONET结果对比

Fig. 6 The correlations between FMF FY-4A and FMF AERONET at various sites

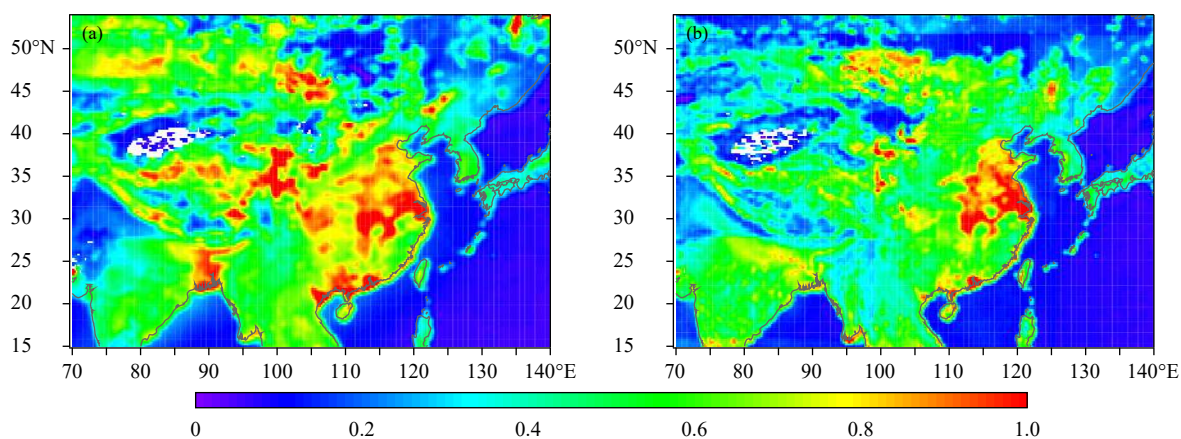


图7 2019年1—6月(a)和7—12月(b)FY-4A卫星平均AOD(色阶)空间分布(空白为无值区)

Fig. 7 Average spatial distributions of FY-4A satellite AOD (colour) from January to June (a) and from July to December (b) 2019 (Blank means no value)

高于AOD H8。

3.2 改进后的PMRS反演中国近地面PM_{2.5}浓度

根据改进后的PMRS反演算法,利用FY-4A卫星的光学产品,反演得到中国逐时 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的网格化近地面PM_{2.5}浓度分布。图9和10分别

为2019年FY-4A卫星反演得到的中国近地面PM_{2.5}浓度以及全国城市空气质量实时发布平台监测的PM_{2.5}浓度的逐月均值。卫星在有云遮挡时不能很好地对整层大气进行探测,云层较厚地区以及地表反射率较高的区域AOD可能存在缺测的现

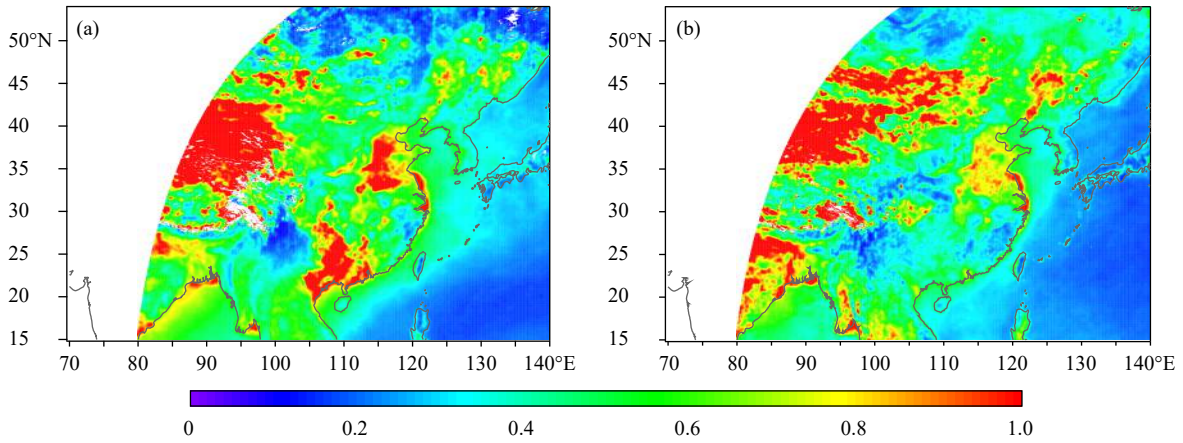


图 8 2019 年 1—6 月 (a) 和 7—12 月 (b) 葵花 8 卫星平均 AOD (色阶) 空间分布 (空白为无值区)

Fig. 8 Average spatial distributions of Himawari-8 satellite AOD (colour) from January to June (a) and from July to December (b) 2019 (Blank means no value)

象,同时,通过 FY-4A 卫星反演的 $PM_{2.5}$ 浓度在夜间没有数值。为使地面观测和卫星反演结果的样本有统一的时间匹配,对地面观测 $PM_{2.5}$ 浓度结果

和卫星反演的 $PM_{2.5}$ 浓度结果进行如下筛选:(1)剔除夜间地面观测的 $PM_{2.5}$ 浓度结果,保留 07—19 时的 $PM_{2.5}$ 浓度值;(2)分别对 08—20 时卫

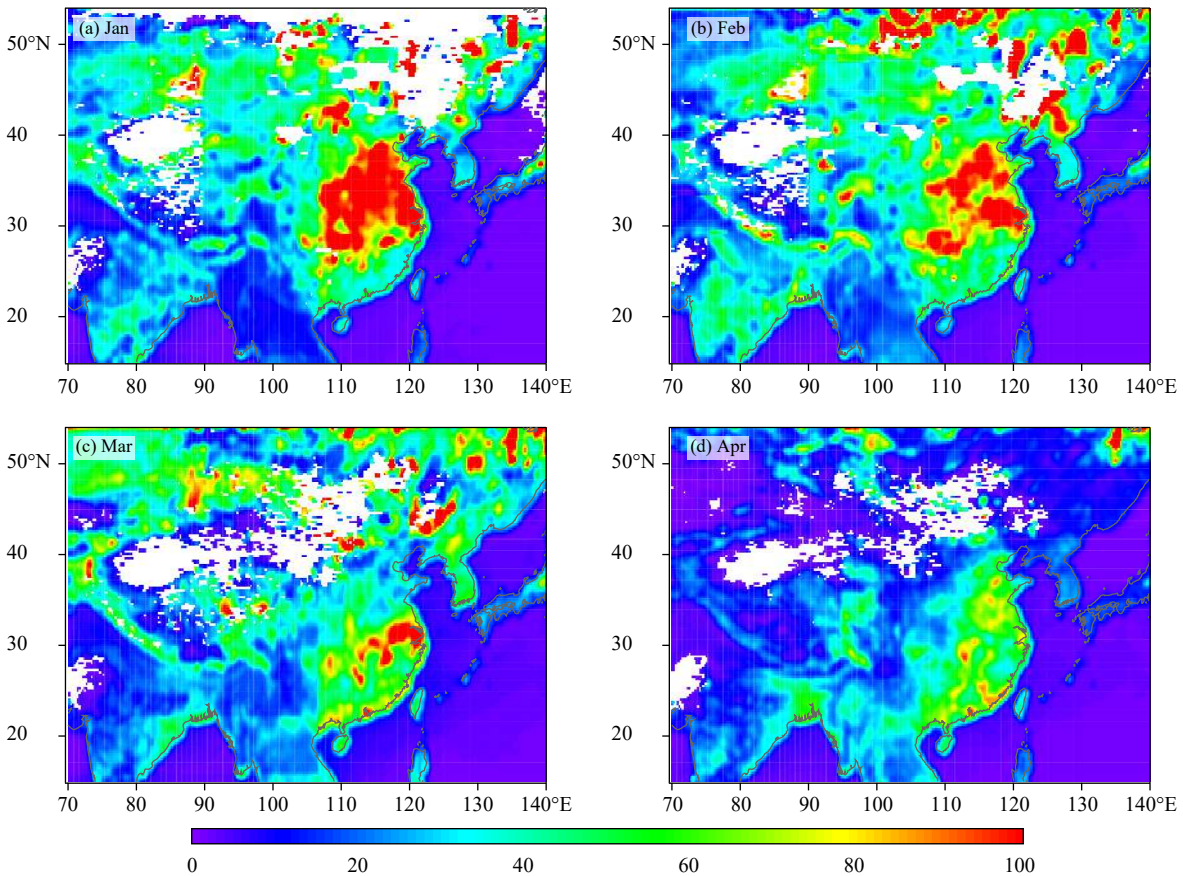
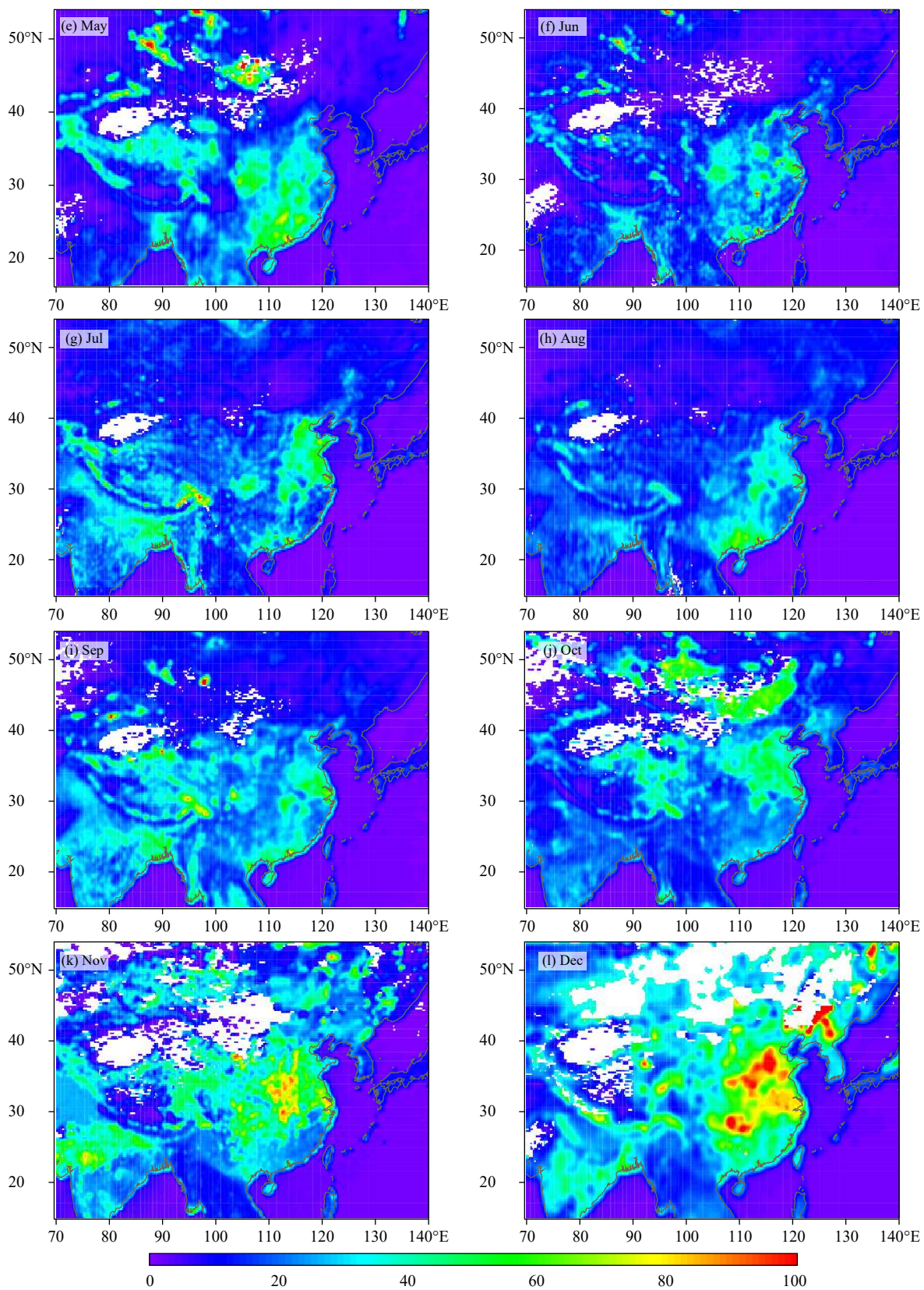


图 9 FY-4A 卫星反演的 2019 年近地面 $PM_{2.5}$ 浓度 (色阶,单位: $\mu g/m^3$) 逐月 (a—l) 月均值 (空白为无值区)

Fig. 9 Monthly averages of near-surface $PM_{2.5}$ mass concentration (colour, unit: $\mu g/m^3$) of the FY-4A satellite retrievals from January to December 2019 (a—l) (Blank is no value)



续图 9

Fig. 9 Continued

星反演结果和地面观测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行逐时匹配, 匹配方法为以地面站点为中心, 逐一对该站点所在网格内 9 个格点的 FY-4A 卫星反演 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度结果进行判别, 如果 9 个格点中有卫星反演结果, 则该点的地面观测数据保留, 否则记为空。进行时间匹配后的地面观测显示(图 10), 2019 年初(1—2 月), 中国中东部空气质量较差, 特别是 1 月, 京津冀及

周边区域、汾渭平原、苏皖北部、江汉等地的月均值均高于 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 部分区域的月均值高于 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3 月开始中国大部分区域空气质量显著好转, 而进入到年底的秋冬季(11—12 月), 中国中东部大气扩散条件虽再次转差, 但较同年的 1—2 月, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)分布区范围显著减小, 特别是 11 月, 中国中东部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度月均

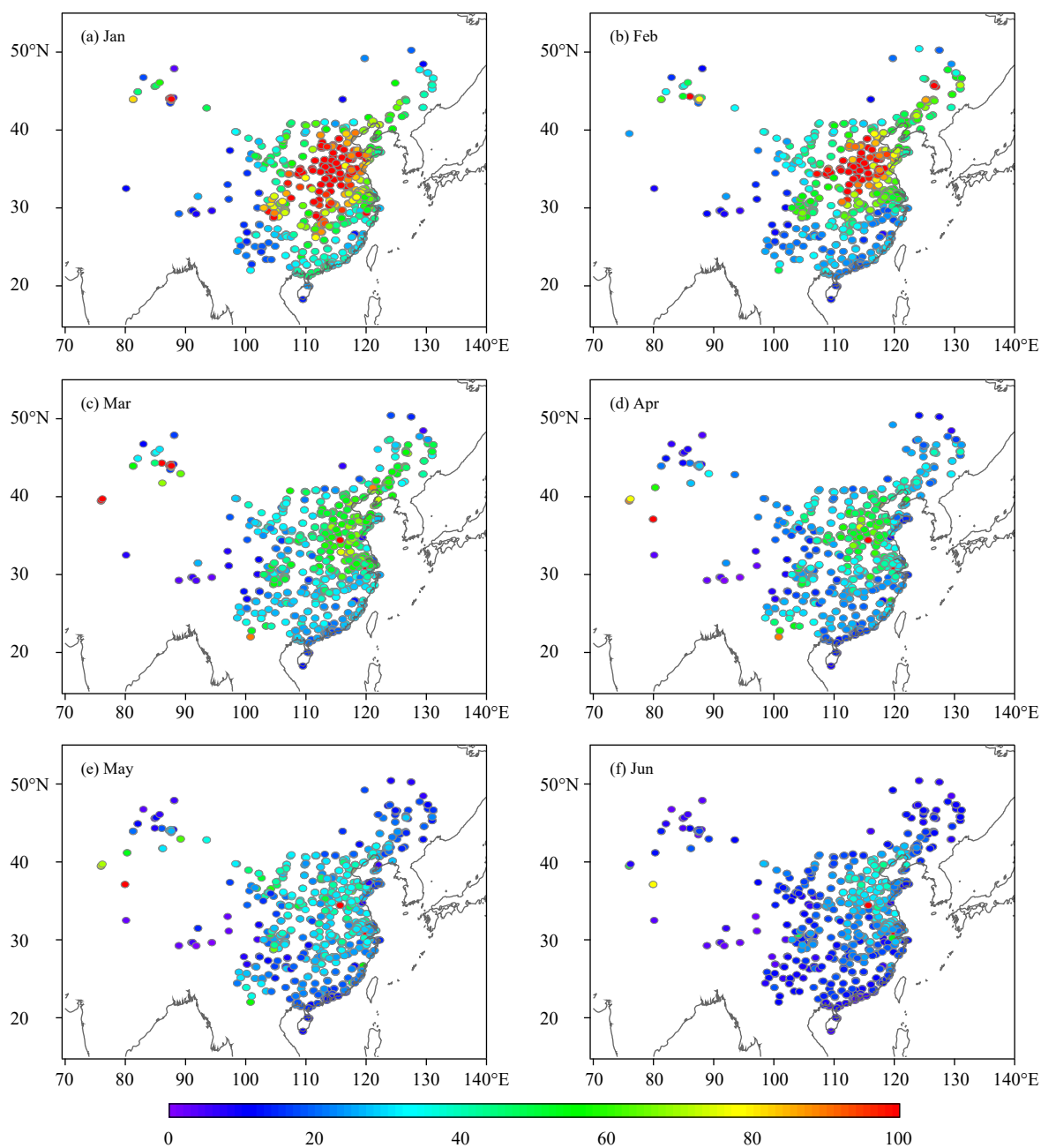
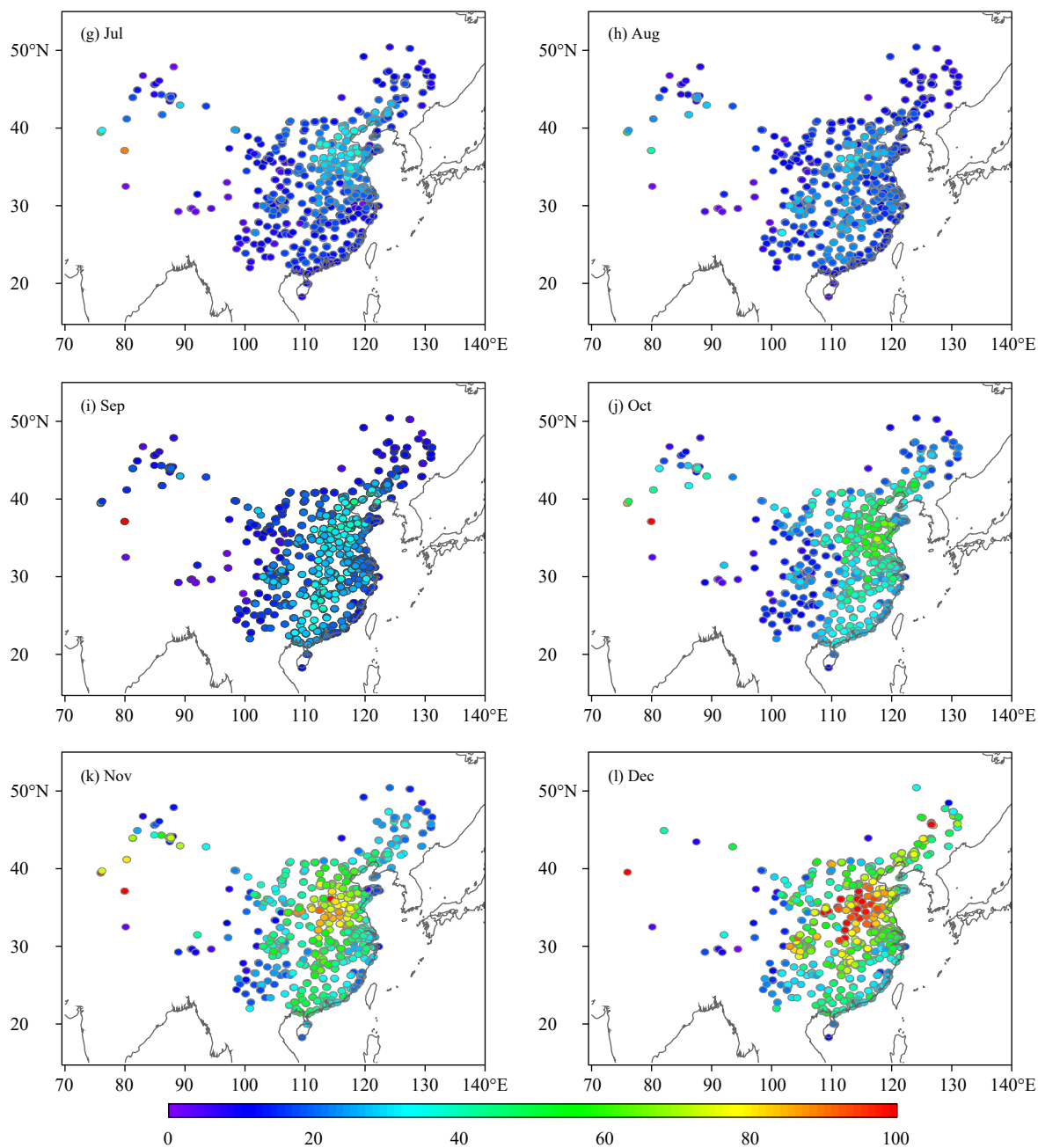


图 10 全国城市空气质量实时发布平台监测的 2019 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 (色阶, 单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 实况数据逐月 (a—f) 均值
 Fig. 10 Monthly averages of live $\text{PM}_{2.5}$ data (colour, unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$) monitored by the national city air quality real-time release platform from January to December 2019 (a—f)



续图 10

Fig. 10 Continued

值基本低于 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。进入 12 月后,中国中东部污染区范围有所增大,但污染较重的区域仅分布在京津冀及周边区域等地,污染物浓度和范围显著低于 1—2 月。卫星反演的 PM_{2.5} 浓度月均值(图 9)与近地面观测的结果有较好的对应关系,与地面观测的逐月演变趋势基本一致,基本可以反映出中国近地面大气细粒子的空间分布。秋、冬季,京津冀周边区域、汾渭平原等污染高值区均与地面观测对应较

好,但不同区域间也存在一定的低估或高估,其中,苏皖中南部、贵州和江西等地反演结果普遍高于地面观测,而河南东南部、北京等地的反演结果较地面观测偏低。同时,区域峰值浓度的反演结果与地面观测也较为一致,如,1 月卫星反演京津冀中南部峰值浓度在 $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,与地面观测结果基本吻合。5—10 月的反演结果中,长江以南的反演结果略偏高,但京津冀及周边区域、甘肃等地的反演

结果在个别月份存在一定的低估。

3.3 单点检验和误差分析

选取 2017 年 7 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日, 中国区域 9 个环境监测总站地面观测站点, 分别为北京万柳、乌鲁木齐铁路局、黄山区政府 5 号楼、石家庄西南高教、中山华柏园、上海虹口、榆林实验小学、徐州黄河新村以及哈尔滨香坊红旗大街。取该地面站点为中心的 9 个格点内的有效的卫星反演结果进行平均, 并与地面实际观测值进行比较。PMRS 方法改进前, 江琪等(2020)对京津冀、长江

三角洲、内蒙古等地反演中, R 分布区间为 0.3—0.6, 同时存在明显的高估或低估。Zhang 等(2015)对 15 个北方城市的比对结果中, R 也仅为 0.5。而使用改进后的 PMRS 方法(图 11), 卫星反演结果的准确度明显提升, 其中, 乌鲁木齐、石家庄和徐州观测点的相关系数(R)均高于 0.7, 榆林的反演结果最差, 但 R 也高于 0.42。不同站点的反演结果均存在一定的低估或高估, 其中, 哈尔滨和中山的拟合结果斜率最接近 1, 乌鲁木齐(斜率: 0.8)的反演结果较实况观测有明显的低估, 而上海地区卫星反演得

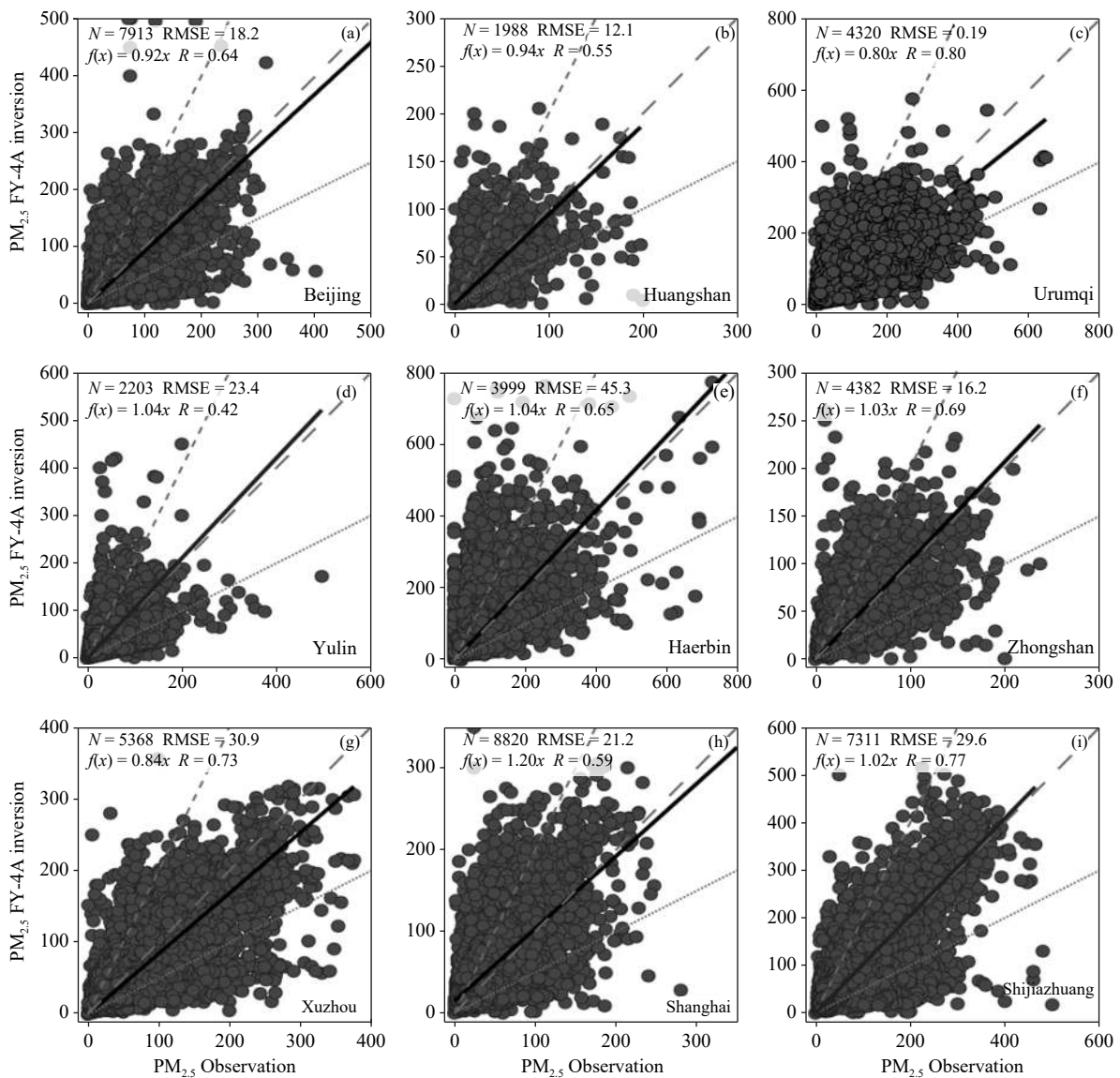


图 11 2017 年 7 月到 2019 年 12 月选取的 9 个站点 FY-4A 反演和地面观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 散点分布

Fig. 11 Correlations between FY-4A retrievals and $\text{PM}_{2.5}$ ground observations at 9 stations from July 2017 to December 2019 (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

到的 PM_{2.5} 浓度约为地面观测的 1.2 倍。

采用 PMRS 方法通过风云四号卫星 AOD 值反演地面 PM_{2.5} 浓度的偏差主要由以下几个因素造成: (1) 风云四号卫星反演 AOD 和 FMF 产品的误差, (2) 大气气溶胶粒子的密度在各个区域的差异和其测量值的缺乏, (3) 罗氏法估算混合层高度的误差, (4) 气溶胶粒子吸湿增长造成的误差, (5) PMRS 方法本身的误差等。

不同地区间干细粒子密度($\rho_{f, dry}$)存在差异, 全球的相关研究结果普遍分布于 1.4—1.93 g/cm³ (Morawska, et al, 1999; Pitz, et al, 2003; 张国华等, 2015)。由于中国区域相关研究结果有限, 选取了 Wang Z F 等(2010)对华北平原观测值 1.5 g/cm³、高健等(2007)对上海地区观测值 1.7 g/cm³ 的平均值 1.6 g/cm³ 作为中国的密度值($\rho_{f, dry}$)进行计算。假设粒子遵循吸湿增长方程, 其系数 a 和 b 在陆地、水体等不同下垫面的测量值不同, 也会对反演结果造成误差。研究(Zhang, et al, 2015)表明, 由密度差异和吸湿增长等因素造成的反演结果误差可达 34%。

AOD 产品误差方面, 北京地区卫星反演的 AOD 与地基观测的 AOD 的相关系数为 0.87, 斜率为 1.08, 因而, 在不考虑卫星反演 AOD 的误差时, 北京地区反演结果和地面观测的相关系数可达 0.74, 但与此同时, 除去 AOD 本身的高估外, 卫星对地面 PM_{2.5} 浓度的反演结果的低估程度略有增大, 达到 15%。

4 结 论

对 FY-4A 卫星的 AOD 产品进行检验, 并根据卫星相关资料, 通过改进后的 PMRS 方法, 反演得到中国近地面 PM_{2.5} 质量浓度网格化分布, 并与地面观测结果进行对比。结论如下:

(1) FY-4A 卫星反演不同站点 AOD 结果较 AERONET 地基观测结果存在一定的低估或高估, 相关系数为 0.54—0.87。AOD 散点分布与 FMF 的大小有一定关联。将 FMF 以 0.4 为界进行划分, 两种情况下 AOD FY-4A 和 AOD AERONET 的相关系数均高于 0.62。其中, FMF > 0.4 时, 拟合结果较 FMF ≤ 0.4 时更接近于 AERONET 观测结果; 但 FMF ≤ 0.4 时, 大多站点的散点分布更为集中, 反演稳定性优于 FMF > 0.4。同时, 2019 年逐半年 AOD

FY-4A 平均结果与地面观测的 PM_{2.5} 浓度分布有较好的对应关系。

(2) 细粒子柱状体积消光比(VE_f)是 PMRS 方法的关键变量, 不同区域间 VE_f 与 FMF 均存在相似的相关, 以 FMF=0.4 为界, 分别建立 VE_f 的拟合公式, 并通过引入 AOD 改进 FMF > 0.4 时对 VE_f 的估算算法。通过改进后的 PMRS 方法, 卫星的反演结果和地面测量相关较好, 其中, 乌鲁木齐、石家庄和徐州观测点的相关系数高于 0.7, 但数值上仍存在高估或低估。

(3) 卫星反演的中国 2019 年近地面 PM_{2.5} 浓度月均值与近地面观测的结果有较好的对应关系, 二者逐月演变趋势基本一致, 基本可以反映中国近地面大气细粒子的空间分布, 特别是秋、冬季, 京津冀周边区域、汾渭平原等污染高值区均与地面观测对应较好。

参考文献

- 高健, 周杨, 王进等. 2007. WPSTM-TEOMTM-MOUDITM 的对比及大气气溶胶密度研究. *环境科学*, 28(9): 1929-1934. Gao J, Zhou Y, Wang J, et al. 2007. Inter-comparison of WPSTM-TEOMTM-MOUDITM and investigation on particle density. *Environ Sci*, 28(9): 1929-1934 (in Chinese)
- 江琪, 王飞, 孙业乐. 2018. 河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析. *环境科学*, 39(7): 3022-3032. Jiang Q, Wang F, Sun Y L. 2018. Analysis of chemical composition, source and evolution of submicron particles in Xianghe, Hebei province. *Environ Sci*, 39(7): 3022-3032 (in Chinese)
- 江琪, 桂海林, 张天航等. 2020. 基于 FY-4A 卫星资料的中国区域网格化地表大气颗粒物浓度估算. *气象*, 46(10): 1297-1309. Jiang Q, Gui H L, Zhang T H, et al. 2020. Estimation of gridding surface atmospheric particle matter concentration in China based on FY-4A satellite observation. *Meteor Mon*, 46(10): 1297-1309 (in Chinese)
- 饶晓琴, 李峰, 周宁芳等. 2019. 我国中东部一次大范围霾天气的分析. *气象*, 34(6): 89-96. Rao X Q, Li F, Zhou N F, et al. 2019. Analysis of a large-scale haze over middle and eastern China. *Meteor Mon*, 34(6): 89-96 (in Chinese)
- 曾湧, 王文宇, 何善铭. 2015. CBERS-1 卫星 CCD 图像高效去噪方法. *航天返回与遥感*, 25(2): 29-33. Zeng Y, Wang W Y, He S M. 2015. An efficient method of removing noise of CBERS-1 CCD camera image. *Spacecr Recov Remote Sens*, 25(2): 29-33 (in Chinese)
- 张国华, 毕新慧, 韩冰雪等. 2015. 单颗粒气溶胶质谱测定颗粒的有效密度. *中国科学: 地球科学*, 45(12): 1886-1894. Zhang G H, Bi X H, Han B X, et al. 2016. Measurement of aerosol effective density by single particle mass spectrometry. *Sci China Earth Sci*, 59(2): 320-327
- Bellouin N, Boucher O, Haywood J, et al. 2005. Global estimate of aerosol

- direct radiative forcing from satellite measurements. *Nature*, 438(7071): 1138-1141
- Colarco P, da Silva A, Chin M, et al. 2010. Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. *J Geophys Res*, 115(D14): D14207
- Engel-Cox J A, Hoff R M, Rogers R, et al. 2006. Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization. *Atmos Environ*, 40(40): 8056-8067
- Gao J, Wang J, Cheng S H, et al. 2007. Number concentration and size distributions of submicron particles in Jinan urban area: Characteristics in summer and winter. *J Environ Sci*, 19(12): 1466-1473
- Han S Q, Hao T Y, Zhang Y F, et al. 2017. Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China. *Sci Total Environ*, 616-617: 135-146
- Hand J L, Kreidenweis S M. 2002. A new method for retrieving particle refractive index and effective density from aerosol size distribution data. *Aerosol Sci Technol*, 36(10): 1012-1026
- Hussein T, Hämeri K, Aalto P, et al. 2004. Particle size characterization and the indoor-to-outdoor relationship of atmospheric aerosols in Helsinki. *Scand J Work Environ Health*, 30(Suppl 2): 54-62
- Hutchison K D, Faruqui S J, Smith S. 2008. Improving correlations between MODIS aerosol optical thickness and ground-based PM_{2.5} observations through 3D spatial analyses. *Atmos Environ*, 42(3): 530-543
- Kahn R A, Gaitley B J, Garay M J, et al. 2010. Multiangle imaging SpectroRadiometer global aerosol product assessment by comparison with the Aerosol Robotic Network. *J Geophys Res*, 115(D23): D23209
- Koelmeijer R B A, Homan C D, Matthijsen J. 2006. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe. *Atmos Environ*, 40(27): 5304-5315
- Li T W, Shen H F, Yuan Q Q, et al. 2017. Estimating ground-level PM_{2.5} by fusing satellite and station observations: A geo-intelligent deep learning approach. *Geophys Res Lett*, 44(23): 11985-11993
- Li Z Q, Zhang Y, Shao J, et al. 2016. Remote sensing of atmospheric particulate mass of dry PM_{2.5} near the ground: Method validation using ground-based measurements. *Remote Sens Environ*, 173: 59-68
- Liu X G, Cheng Y F, Zhang Y H, et al. 2008. Influences of relative humidity and particle chemical composition on aerosol scattering properties during the 2006 PRD campaign. *Atmos Environ*, 42(7): 1525-1536
- Ma Z W, Liu Y, Zhao Q Y, et al. 2016. Satellite-derived high resolution PM_{2.5} concentrations in Yangtze River Delta Region of China using improved linear mixed effects model. *Atmos Environ*, 133: 156-164
- McMurry P H, Wang X, Park K, et al. 2002. The relationship between mass and mobility for atmospheric particles: A new technique for measuring particle density. *Aerosol Sci Technol*, 36(2): 227-238
- Morawska L, Johnson G, Ristovski Z D, et al. 1999. Relation between particle mass and number for submicrometer airborne particles. *Atmos Environ*, 33(13): 1983-1990
- Pitz M, Cyrys J, Karg E, et al. 2003. Variability of apparent particle density of an urban aerosol. *Environ Sci Technol*, 37(19): 4336-4342
- Pope III C A, Ezzati M, Dockery D W. 2009. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *N Engl J Med*, 360(4): 376-386
- Wang J, Xu X G, Spurr R, et al. 2010. Improved algorithm for MODIS satellite retrievals of aerosol optical thickness over land in dusty atmosphere: Implications for air quality monitoring in China. *Remote Sens Environ*, 114(11): 2575-2583
- Wang Q Q, Sun Y L, Xu W Q, et al. 2018. Vertically resolved characteristics of air pollution during two severe winter haze episodes in urban Beijing, China. *Atmos Chem Phys*, 18(4): 2498-2509
- Wang Z F, Chen L F, Tao J H, et al. 2010. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. *Remote Sens Environ*, 114(1): 50-63
- Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, et al. 2007. Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005. *J Geophys Res*, 112(D5): D05203
- Xue Y, He X W, Xu H, et al. 2014. China Collection 2.0: The aerosol optical depth dataset from the synergetic retrieval of aerosol properties algorithm. *Atmos Environ*, 95: 45-58
- Zhang P, Zhu L, Tang S H, et al. 2019. General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications. *Front Earth Sci*, 6: 224
- Zhang X Y, Wang F, Wang W H, et al. 2020. The development and application of satellite remote sensing for atmospheric compositions in China. *Atmos Res*, 245: 105056
- Zhang Y, Li Z Q. 2015. Remote sensing of atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) mass concentration near the ground from satellite observation. *Remote Sens Environ*, 160: 252-262