

陆地气溶胶细模态比的有效反演算法

王家成, 赵文君, 张斌凯, 曹阳阳
(阜阳师范大学物理与电子工程学院, 安徽 阜阳 236037)

摘要:提出了基于卫星气溶胶光学厚度(AOD)和恩格指数反演气溶胶细模态比(FMF)的新算法,该算法采用更准确的气溶胶模型,构建了以 AOD 和 FMF 为变量的二维查找表。将该算法用于北京和 Jaipur 两个地区 FMF 反演,并与 AERONET 和 MODIS 的 FMF 作比较。结果表明,新算法反演的 FMF 与 AERONET 的 FMF 的相关系数为 0.656,而 MODIS C6 与 AERONET 的 FMF 相关系数为 0.436;以 AERONET 的 FMF 为标准,新算法的均方根误差为 0.156,低于 MODIS C6 的均方根误差(0.318);新算法的反演结果中有 90% 处于 ± 0.4 的误差范围内,而 MODIS C6 的 FMF 只有 57.4% 处于该误差范围内。

关键词:气溶胶细模态比;反演算法;气溶胶光学厚度;恩格指数;陆地

中图分类号:TP79;X513 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-2009(2023)05-0021-05

An Efficient Retrieval Algorithm for Fine Mode Fraction of Land Aerosols

WANG Jia-cheng, ZHAO Wen-jun, ZHANG Bing-kai, CAO Yang-yang
(College of Physics and Electronic Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang, Anhui 236037, China)

Abstract: An new algorithm for retrieving aerosol fine mode fraction (FMF) was proposed based on the aerosol optical depth (AOD) from satellite and Ångström exponent. It adopted a more accurate aerosol model and constructed a two-dimensions lookup table with AOD and FMF as variables. Applying this algorithm to retrieve FMF in Beijing and Jaipur, and comparing it with the FMF by AERONET and MODIS, the results showed that the correlation coefficient between the FMF retrieved by the new algorithm and by AERONET was 0.656, while the correlation coefficient between the FMF retrieved by MODIS C6 and by AERONET was 0.436. Taking the FMF by AERONET as the standard, the RMSE of the new algorithm was 0.156, which was lower than that by MODIS C6 (0.318). 90% of the retrieval results were within the error range of ± 0.4 , while only 57.4% of the FMF by MODIS C6 was within this error range.

Key words: Aerosol fine mode fraction; Retrieval algorithm; Aerosol optical depth; Ångström exponent; Land

气溶胶细模态比(FMF)有助于区分自然源气溶胶与人类活动产生的气溶胶,故有助于研究人类活动对大气环境和气候的影响^[1-8]。卫星陆地气溶胶反演算法,如 MODIS C6 算法等,虽然能够提供较为准确的气溶胶光学厚度(AOD),但是反演的 FMF 仍然具有很大的不确定性^[9-11],主要是由复杂的地表反射和气溶胶的时空变化性^[12-14]等原因所致。Jethva 等^[14]通过改变地表反射和气溶胶折射指数反演了 Kanpur 地区的 FMF,结果发现,虽然 FMF 被低估的情况得到了改善,但反演误差依然很大。气溶胶模型是由气溶胶粒子尺度分布参

数(如气溶胶粒子的中值半径及其标准偏差、气溶胶粒子的体积浓度)和吸收散射参数(如折射指数)等描述,而在 Jethva 等^[14]的研究中粒子尺度参数并没有被调整。基于 O'Neill 等^[15]的理论,Yan 等^[16]建立了 4 维查找表(4 个维度分别为恩格指数、恩格指数的微分、细粒子气溶胶的恩格指数和 FMF),进而提出了基于该查找表的光谱解卷

收稿日期:2022-09-08;修订日期:2023-06-03

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点基金资助项目(KJ2019A0537)

作者简介:王家成(1968—),男,安徽阜阳人,教授,博士,主要从事定量遥感分析与应用方面的研究工作。

积 (LUT-SDA) 算法。将该算法反演的 FMF 与 AERONET 的 FMF 对比, 结果表明, 虽然在 MODIS C6 中被低估的 FMF 得到了改善, 但反演结果与 AERONET 的相关性低, 并且小的 FMF 存在被高估的情况, 故 LUT-SDA 算法不适合用于气溶胶以粗粒子为主的区域, 主要原因是 LUT-SDA 算法只包括 FMF 和恩格指数信息, 没有包括气溶胶模型信息。Yan 等^[16]利用北京和中国香港的 AERONET 站点数据, 以及日本的 Noto、Osaka 和 Shirahama 3 个 AERONET 站点数据对 LUT-SDA 算法进行了验证, 这些站点除了北京春季气溶胶粗粒子较多以外, 其他情况下, 这些地区的气溶胶均以细粒子为主。验证结果表明, 当气溶胶以粗粒子为主时该算法会高估 FMF 的值, 主要原因是该算法未利用气溶胶模型去区分不同类型的气溶胶。

基于上述讨论, 今将气溶胶模型引入反演算法中, 并将 LUT-SDA 算法中的 4 维查找表简化为二维查找表。新算法采用 AERONET 北京站和 Jaipur 站的数据进行验证, Jaipur 站所在区域气溶胶以粗粒子为主, 而北京除春季外以细粒子为主, 这样在兼顾粗、细粒子的同时, 可以突出新算法对气溶胶粒子敏感性的验证, 为 FMF 的可靠反演提供技术支持。

1 FMF 反演算法

1.1 数据来源

气溶胶模型的构建采用 AERONET 北京站和 Jaipur 站 2001—2018 年的数据。北京站的太阳辐射计被安置在中国科学院大气物理研究所的一栋建筑的顶部, 除春季外, 这里的气溶胶均以细粒子为主, 全年平均 FMF 为 0.722。Jaipur 站位于印度 Jaipur 市中心, 测量仪器也被放置在建筑物的顶部, 主要的气溶胶源为交通排放和由 Thar 沙漠传输过来的粗粒子组成^[17], 全年平均 FMF 值为 0.436。2016 年 MODIS 气溶胶产品数据来自 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>, 也是研究采用的主要数据源。其中, 新算法反演 FMF 的数据源采用 AOD 和恩格指数, 对比验证采用 MODIS 的 FMF 数据。

1.2 气溶胶模型介绍

气溶胶模型一般采用折射指数来描述其吸收和散射特性, 采用粒子尺度分布参数来描述其粒子尺度分布特征。粒子的尺度分布通常用公式 (1) 描述^[18-21]。

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{V_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_v)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中: V_0 为单位截面大气柱内气溶胶的体积; r_v 为气溶胶粒子的中值半径; σ 为 r_v 的标准偏差的自然对数。

实际气溶胶粒子尺度分布可以表示为粗粒子和细粒子尺度分布的叠加, 见公式 (2)。

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{V_f}{\sigma_f\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_f)^2}{2\sigma_f^2}\right] + \frac{V_c}{\sigma_c\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_c)^2}{2\sigma_c^2}\right] \quad (2)$$

式中: V_f 和 V_c 、 r_f 和 r_c 、 σ_f 和 σ_c 分别为细粒子和粗粒子气溶胶的体积浓度、中值半径及其标准偏差的自然对数。

这些尺度分布参数在 MODIS C5 和 C6 陆地气溶胶模型中被视为与总 AOD 呈正相关。然而, 将这些参数分别视为细粒子和粗粒子 AOD 的函数更为合理。基于此原因, 王家成等^[22]提出了新的气溶胶模型参数的描述方法, 给出了 r_f 与 τ_f (细粒子 AOD) 的关系, 以及 r_c 与 τ_c (粗粒子 AOD) 的关系, 该研究成果也被用于 FMF 反演的新算法中。

图 1(a)–(d) 分别为北京站点的粗、细气溶胶体积浓度与 670 nm 波段 AOD 的关系, 其中, τ_t 为总 AOD。由图 1 可见, V_f 与 τ_t 、 V_c 与 τ_t 的相关性较低, 其相关系数的平方 (R^2) 分别为 0.82、0.17, 而 V_f 与 τ_f 、 V_c 与 τ_c 之间均呈现很好的正相关性, R^2 分别达到 0.93、0.94。Jaipur 地区与北京的情况相似。

由于上述原因, r_f 与 τ_f 、 r_c 与 τ_c 之间的关系^[22], V_f 与 τ_f 、 V_c 与 τ_c 之间的关系 [即图 1(c)(d) 中的拟合关系] 在文中被用于气溶胶新模型的构建, 用以由 AOD 确定 r_f 、 r_c 、 V_f 、 V_c 的值。其他模型参数如折射指数、 σ_f 、 σ_c 和恩格指数等利用 K 均值聚类分析得到^[23]。最终, 对北京地区构建了 30 个气溶胶模型, Jaipur 地区由于气溶胶分布相对单一, 构建了 19 个气溶胶模型, 这些模型均按季节进行分组。

1.3 建立二维查找表

对每种气溶胶模型均建立二维查找表, 一维是 FMF, 取值分别为 0.001、0.2、0.4、0.6、0.8 和 0.999; 另一维为总 AOD, 取值分别为 0.2、0.4、0.7、1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0。表 1 给出了一个示例。

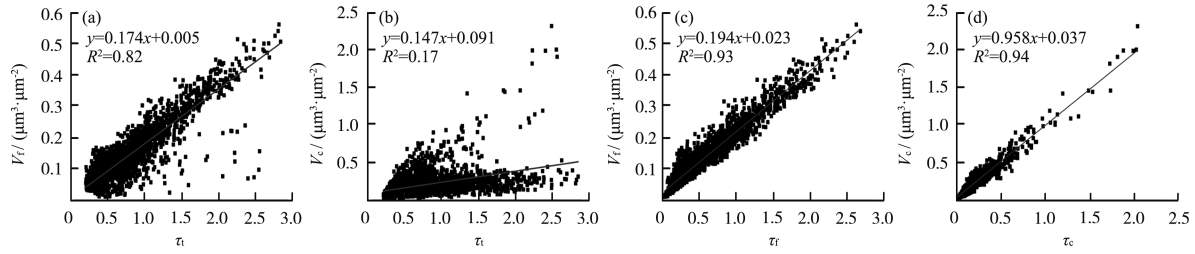


图 1 北京站点的粗、细气溶胶体积浓度与 670 nm 波段 AOD 的关系

Fig. 1 Relationship between volume concentration of coarse and fine aerosols and AOD at 670 nm in Beijing station

表 1 二维查找表

Table 1 Two-dimensional lookup table

AOD	FMF					
	0.001	0.2	0.4	0.6	0.8	0.999
0.2	0.156	0.175	0.184	0.195	0.208	0.219
0.4	0.312	0.336	0.353	0.377	0.407	0.439
0.7	0.561	0.589	0.622	0.667	0.722	0.785
1.0	0.821	0.854	0.903	0.969	1.046	1.135
1.5	1.272	1.313	1.388	1.482	1.588	1.712
2.0	1.738	1.788	1.886	2.001	2.125	2.271
2.5	2.217	2.276	2.392	2.519	2.651	2.810
3.0	2.706	2.772	2.902	3.034	3.167	3.328

二维查找表中数据为根据气溶胶模型参数及对应维度上 AOD 和 FMF 值计算出来的 AOD。计算方法采用公式(3)——(5)。

$$\tau_f = \text{AOD} \times \text{FMF} \tag{3}$$

$$\tau_c = \text{AOD} \times (1 - \text{FMF}) \tag{4}$$

$$\tau = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{ext}} \pi r^2 \frac{3}{4\pi r^3} \frac{dV(r)}{d\ln r} \frac{1}{r} dr \approx \sum_{i=1}^n Q_{\text{ext}} \frac{3}{4r_i^2} \frac{dV(r_i)}{d\ln r_i} \Delta r_i \tag{5}$$

式中： τ 为计算气溶胶光学厚度 (AOD_{js})； Q_{ext} 为消光效率因子，其可以由米散射理论结合气溶胶粒子尺度分布参数和折射指数等计算得到； $\frac{dV(r)}{d\ln r}$ 可由公式(2)得到^[24]。

首先，根据公式(3)和公式(4)确定细粒子和粗粒子 AOD (τ_f 和 τ_c)，利用 r_f 与 τ_f 、 r_c 与 τ_c 、 V_f 与 τ_f 、 V_c 与 τ_c 之间的关系确定 r_f 、 r_c 、 V_f 和 V_c 的值。其次，折射指数、恩格指数和中值半径的标准偏差由 K 均值聚类分析得到，对于每个气溶胶模型其都是一个定值，仅随模型的不同而不同。最后，由公式(5)获得 AOD_{js} ，即查找表中的数据。

从上述计算方法可以看出， AOD_{js} 由气溶胶模型、总 AOD 和 FMF 确定。若气溶胶模型和总 AOD

可靠，则 AOD_{js} 将仅与 FMF 有关，这正是可以利用气溶胶模型和查找表，由 AOD 来反演 FMF 的原因。

1.4 反演算法的具体操作

反演算法包括以下 3 步：①根据实际情况选择 1 个或 2 个合适的气溶胶模型；②利用卫星气溶胶数据中的总 AOD 和恩格指数，对选择的每种气溶胶模型反演出 FMF；③利用第二步得到的 FMF，通过插值的方法得到最终的 FMF。具体操作如下。

第一步，根据反演的区域和季节选择一组气溶胶模型，若要反演 Jaipur 地区 4 月某天的 FMF，则选出该地区春季的气溶胶模型。这组共 5 个模型，每个模型都包含恩格指数，分别记为 AE1、AE2、AE3、AE4 和 AE5，且 $\text{AE1} < \text{AE2} < \text{AE3} < \text{AE4} < \text{AE5}$ 。设卫星观测的恩格指数为 AE，若 $\text{AE} < \text{AE1}$ ，则选出仅有恩格指数为 AE1 的模型；若 $\text{AE1} < \text{AE} < \text{AE2}$ ，则选出恩格指数为 AE1 和 AE2 的两个模型，其他情况类似。

第二步，利用被选中的气溶胶模型对应的查找表和卫星 AOD 数据反演 FMF。例如，如果表 1 为被选中的查找表，并且 MODIS 的 AOD 值为 0.3，那么利用插值的方法即可算出对应的 AOD 为 0.3 和表 1 中设定的 6 个 FMF 的 AOD_{js} ，见表 2。再利用卫星 AOD 对表 2 进行插值，即可得到对应于该气溶胶模型的 FMF。

第三步，确定最终的 FMF。若选中两个气溶胶模型，且对应模型的恩格指数分别为 AE1 和 AE2，由两个模型反演的 FMF 分别记为 FMF1 和 FMF2 (见表 3)，则最终的 FMF 即可由卫星的恩格指数对表 3 插值获得。若卫星恩格指数较小，则只须选出一个气溶胶模型，对应模型的恩格指数为 AE1，由第二步反演得到的 FMF 记为 FMF1，可以假设，当恩格指数为 0 时 FMF 也为 0，该假设合理。因为恩格指数反映气溶胶粒子的分布，其值越小细粒子占比越少，从而 FMF 也越小，所以最终的 FMF

表 2 对应卫星 AOD 为 0.3 时的插值计算实例

Table 1 Example of interpolation calculation when the AOD from corresponding satellite was 0.3

FMF	0.001	0.2	0.4	0.6	0.8	0.999
AOD _{js}	0.234 0	0.255 5	0.268 5	0.286 0	0.307 5	0.329 0

表 3 两个被选中的气溶胶模型的反演情况

Table 3 Retrieves of two selected aerosol models

AE1	AE2
FMF1	FMF2

即可利用卫星的恩格指数通过插值获得。若卫星恩格指数大于所有模型的恩格指数,则根据统计,最终的 FMF 可以设置为 0.9。

2 实例验证

今利用 2016 年 MODIS 的 AOD 和恩格指数数据反演北京地区和 Jaipur 地区的 FMF,利用 AERONET 数据进行验证,并与 MODIS C6 的 FMF 进行对比。采用 Ichoku 等^[25]提出的方法,将 AERONET 的时间变化数据与 MODIS 的空间变化数据作对比,即将 MODIS 过顶时 1 h 内的 AERONET 数据作时间平均,将以 AERONET 站点为中心的 50 km × 50 km 的 MODIS 的数据作空间平均,然后将两者作比较。

MODIS 的陆地气溶胶反演算法有两种,一种是深蓝算法(DB),另一种为暗目标算法(DT)。在北京地区虽然这两种算法的 AOD 与 AERONET 的相关性均较高,但 DB 的 AOD 与 AERONET 的 AOD 相比总体偏低,DB 算法的恩格指数与 AERONET 数据相比没有任何相关性,且被高估,而 DT 算法的恩格指数相对而言较为合理,故今采用 DT 算法的 AOD 和恩格指数进行 FMF 反演。

图 2(a)(b)分别为新算法反演的 FMF、MODIS C6 的 FMF 与 AERONET 的 FMF 之间的比较,其中虚线为 ±0.4 误差限,点线为截距为 0、斜率为 1 的直线,实线为线性拟合线。由图 2 可见,新算法反演的 FMF 与 AERONET 的 FMF 的相关系数达到 0.656,而 MODIS C6 的 FMF 与 AERONET 的 FMF 的相关系数仅为 0.436。在 Yan 等^[16]的 LUT-SAD 算法中虽然未进行相关性分析,但从散点图中可以直观地发现,其与 AERONET 的相关性较低。新算法的均方根误差为 0.156,低于 MODIS C6 FMF 的均方根误差(0.318),也低于 LUT-SAD 算法均方根误差(0.168)。新算法的反演结果有 90% 处于

±0.4 误差限内,MODIS C6 的反演结果有 57.4% 处于 ±0.4 误差限内,而 LUT-SAD 算法的反演结果有 80% 处于 ±0.4 误差限内。MODIS C6 的反演结果存在低估的情况,而 LUT-SAD 算法在大粒子为主要成分时存在对 FMF 高估的情况,这两种情况在新算法中都得到了较好的纠正。

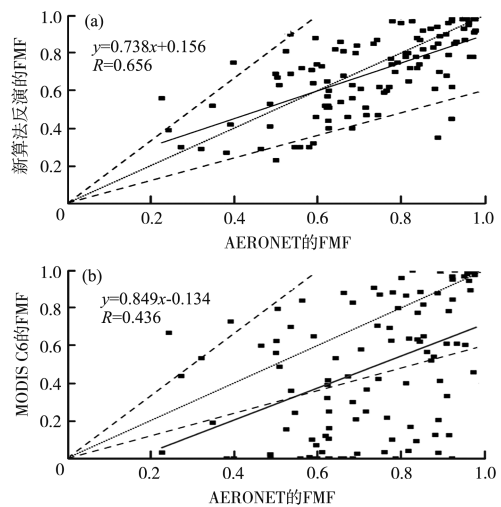


图 2 新算法反演的 FMF、MODIS C6 的 FMF 与 AERONET 的 FMF 之间的比较

Fig. 2 Comparison of FMF retrieved by the new algorithm, MODIS C6 and AERONET

3 结论

(1) 目前卫星反演的 FMF 精度偏低,而 AOD 数据精度较高,可以利用全球的卫星 AOD 数据和恩格指数实现更高精度的 FMF 反演。今提出一种利用 MODIS 的 AOD 和恩格指数反演 FMF 的算法,并用北京和 Jaipur 地区的数据作验证。

(2) 新算法的主要特点是在反演中引入了动态气溶胶模型,并采用简单的二维查找表,提高了反演算法的精度。新算法反演的 FMF 与 AERONET 的 FMF 的相关系数为 0.656,高于 MODIS C6 与 AERONET 的 FMF 相关系数(0.436);以 AERONET 的 FMF 为标准,新算法的均方根误差为 0.156,低于 MODIS C6 的均方根误差(0.318);新算法的反演结果中有 90% 处于

的误差范围内,而 MODIS C6 的 FMF 只有 57.4% 处于该误差范围内。

(3)新算法虽然是以北京和 Jaipur 两地为例进行研究,但该算法可被用于全球范围。AERONET 在全球设立了很多站点,积累了大量数据,利用这些数据可以建立适合全球不同区域的气溶胶模型,从而实现利用新算法的全球气溶胶 FMF 反演。对新算法影响较大的因素是恩格指数,随着卫星恩格指数反演精度的提升,新算法也将能够提供更好的 FMF 数据。

[参考文献]

- [1] KAUFMAN Y J, SMIRNOV A, HOLBEN B N, et al. Baseline maritime aerosol: Methodology to derive the optical thickness and scattering properties[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(17): 3251–3254.
- [2] BELLOUIN N, BOUCHER O, HAYWOOD J, et al. Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements[J]. *Nature*, 2005, 438(7071): 1138–1141.
- [3] TANRÉ D, BRÉON F M, DEUZÉ J L, et al. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(7): 1383–1395.
- [4] KAKU K C, REID J S, REID E A, et al. Investigation of the relative fine and coarse mode aerosol loadings and properties in the Southern Arabian Gulf region[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 169(A): 171–182.
- [5] AVINO P, PROTANO C, VITALI M, et al. Benchmark study on fine-mode aerosol in a big urban area and relevant doses deposited in the human respiratory tract[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 530–537.
- [6] KLEIDMAN R G, O'NEILL N T, REMER L A, et al. Comparison of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and aerosol robotic network (AERONET) remote-sensing retrievals of aerosol fine mode fraction over ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110: 22205.
- [7] 羊腾跃, 刘红年, 王学远, 等. 城市植被对杭州市大气污染物浓度的影响[J]. *环境监测管理和技术*, 2021, 33(3): 15–20.
- [8] 刘瑞琪, 贾海鹰. 北京地区气象条件与区域传输对 PM_{2.5} 浓度影响研究[J]. *环境监测管理和技术*, 2021, 33(5): 16–20.
- [9] ANDERSON T L, WU Y H, CHU D A, et al. Testing the MODIS satellite retrieval of aerosol fine-mode fraction[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110: 18204.
- [10] LEVY R C, MATTOO S, MUNCHAK L A, et al. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11): 2989–3034.
- [11] SAYER A M, HSU N C, BETTENHAUSEN C, et al. Validation and uncertainty estimates for MODIS collection 6 “ Deep Blue ” aerosol data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(14): 7864–7872.
- [12] ZHANG Y, LI Z Q, QIE L, et al. Retrieval of aerosol fine-mode fraction from intensity and polarization measurements by PARASOL over East Asia[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 417.
- [13] REMER L A, KAUFMAN Y J, TANRÉ D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(4): 947–973.
- [14] JETHVA H, SATHEESH S K, SRINIVASAN J, et al. Improved retrieval of aerosol size-resolved properties from moderate resolution imaging spectroradiometer over India: Role of aerosol model and surface reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D18): 18213.
- [15] O'NEILL N T, DUBOVIK O, ECK T F. Modified angström exponent for the characterization of submicrometer aerosols[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(15): 2368–2375.
- [16] YAN X, LI Z Q, SHI W Z, et al. An improved algorithm for retrieving the fine-mode fraction of aerosol optical thickness, part 1: Algorithm development[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192: 87–97.
- [17] VERMA S, PAYRA S, GAUTAM R, et al. Dust events and their influence on aerosol optical properties over Jaipur in Northwestern India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(9): 7327–7342.
- [18] D'ALMEIDA G A. On the variability of desert aerosol radiative characteristics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1987, 92(D3): 3017–3026.
- [19] KAUFMAN Y J, GITELSON A, KARNIELI A, et al. Size distribution and scattering phase function of aerosol particles retrieved from sky brightness measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D5): 10341–10356.
- [20] KAUFMAN Y J, HOLBEN B N. Hemispherical backscattering by biomass burning and sulfate particles derived from sky measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D14): 19433–19445.
- [21] WHITBY K T. The physical characteristics of sulfur aerosols[J]. *Atmospheric Environment*, 1978, 12: 135–159.
- [22] 王家成, 崔生成, 朱勇. 陆地气溶胶粒子尺度分布的准确描述[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(11): 4538–4545.
- [23] ARTHUR D, VASSILVITSKII S. K-means ++: the advantages of careful seeding[C]//SIAM. In *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. New Orleans: SIAM, 2007: 1027–1035.
- [24] WANG J C, ZHU C J, ZHU Y. Estimating the POLDER sensitivity to aerosol size using PARASOL observations[J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6(1): 88–96.
- [25] ICHOKU C, CHU D A, MATTOO S, et al. A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(12): 8006.