

PSO 聚类算法的京津冀地区气溶胶光学厚度反演

王书涛, 王贵川*, 凡堃堃, 吴兴, 王玉田

燕山大学电气工程学院, 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 气溶胶光学厚度(AOD)是气溶胶浓度和大气浊度的重要表征参数。通过遥感手段实现大气气溶胶光学厚度的反演是大气监测与治理过程中的重要方式, 其中遥感反演 AOD 的重点和难点是如何选择适合卫星传感器成像特点的方法和符合研究区域的气溶胶类型。针对传统暗目标法无法直接应用于高分四号(GF-4)卫星多光谱遥感数据的问题, 通过研究得出了 GF-4 卫星多光谱数据中红、蓝波段等效地表反射率的分布和两者之间的线性关系, 结合 AOD 反演原理改进暗目标法使其适用于 GF-4 卫星多光谱遥感数据; 分析 6S 辐射传输模型输入参数中气溶胶类型对 AOD 反演精度的影响, 结果表明气溶胶类型是影响 AOD 高精度反演的关键要素之一; 利用粒子群(PSO)聚类算法对京津冀地区气溶胶特性实测样本进行聚类分析, 通过分析各个气溶胶类型聚类结果的占比和半衰期变化情况, 最终确定聚类得到的 C1、C4 型和 6S 模型内置的大陆型气溶胶类型进行京津冀地区的 AOD 反演。为了验证不同气溶胶类型 AOD 反演结果的精度, 将反演结果与 MODIS 气溶胶产品和气溶胶自动观测网(AERONET)地基站数据数据进行对比验证, 通过相关系数、绝对误差等评价标准对不同气溶胶类型的适用性和特点进行评价。实验结果表明, 以细粒子为主导的 C4 型气溶胶更满足京津冀地区夏秋两季的气溶胶特点, 与 AERONET 地基数据的一致性较好, 进一步证明了 PSO 聚类算法能够有效减小气溶胶类型的差异对 AOD 反演精度的影响。

关键词 气溶胶; GF-4 卫星多光谱数据; 京津冀地区; PSO 聚类算法

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3321-07

引言

近年来, 遥感卫星影像反演已经成为了获取较大时空分布的气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)的主要手段, 国内外学者根据不同星载传感器数据的特点和成像区域特征提出很多算法: 暗目标法^[1-2]、深蓝算法^[3]、多星协同算法^[4]等。其中, 暗目标法充分利用了遥感影像中浓密植被暗像元的信息特征, 受到地表噪声的干扰较小, 反演流程也比较简单, 因此得到了广泛应用。我国学者对暗目标法进行改进以用于国产卫星数据反演 AOD, 如 HJ 系列卫星^[5]、GF 系列卫星^[6]、CBERS02B 卫星^[7]等。

气溶胶理化性质的不确定性和时空分布的无规律性是从遥感影像中反演气溶胶参数的难点。AOD 反演的核心是如何剔除地表反射率贡献, 通过辐射模型如 6S 模型、MODT-RAN 模型等能够实现这一目标。模型的输入参数中, 气溶胶类型是影响 AOD 反演精度的主要因素之一, 由于不同地域

下地理环境、气候和社会发展情况的差异, 模型中预设气溶胶类型的针对性和适用性较差, 所以确定研究区域气溶胶类型是准确反演 AOD 的关键。

针对这些问题, 提出了一种新方法: 一方面调整暗目标法以适用于高分四号(GF-4)多光谱遥感数据, 构建类三元一次方程组; 另一方面利用粒子群(particle swarm optimization, PSO)聚类算法确定符合京津冀地区的气溶胶类型, 将其作为 6S 模型的输入参数建立查找表, 然后逐像元查表求解方程组, 实现对研究区域 AOD 的反演。为了校验此方法 AOD 的反演精度, 分别利用 MODIS 气溶胶产品(MOD04_L2)和 AERONET(AERosol RObotic NETwork)地基观测数据与 AOD 反演结果进行对比, 并进行分析和讨论。

1 实验部分

1.1 算法流程及暗目标法的调整

算法流程如图 1 所示, 首先针对暗目标法不适用于 GF-4

收稿日期: 2019-11-18, 修订日期: 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771419), 河北省自然科学基金项目(F2017203220)资助

作者简介: 王书涛, 1978 年生, 燕山大学电气工程学院教授 e-mail: wangshutao@ysu.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: wang.guichuan@outlook.com

数据的情况,对 GF-4/PMI 传感器的数据进行了分析,并根据已有数据和资料对暗目标法进行调整。利用长时序的 AERONET 地基数据和 PSO 聚类算法对京津冀地区的气溶胶类型进行了聚类分析,并结合实验验证选取了符合实际情况的气溶胶类型。将聚类得到的气溶胶类型代入 6S 辐射传输模型建立查找表,结合调整之后的暗目标法建立类三元一次方程组。最后选取京津冀区域 GF-4 卫星影像进行 AOD 反演,并与 MOD04_L2 产品和 AERONET 地基观测数据进行对比来验证算法的可行性。

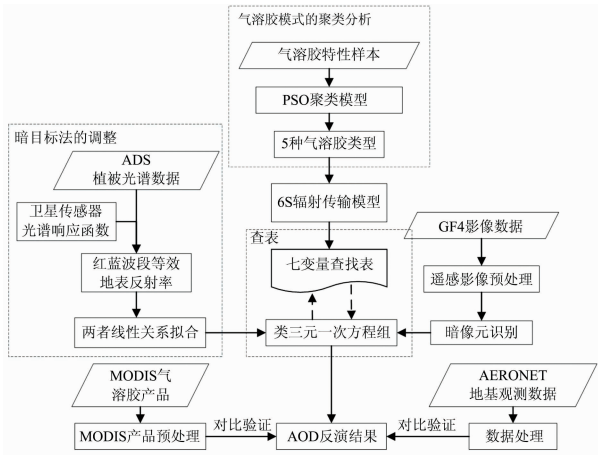


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow diagram

GF-4 卫星是我国第一颗静止轨道遥感卫星,卫星采用地球同步轨道,其位与赤道 106°E 上空 36 000 km 处,作为我国高分辨率对地观测重大专项的卫星之一,GF-4 卫星上的 PMI 传感器兼具中空间分辨率和高时间分辨率的成像特点,相对于其他同步轨道卫星,不仅具有更加细腻的成像效果,还能对某一大面积区域进行长期而连续的观测。GF-4 卫星上搭载的 PMI 传感器参数如表 1 所示。

表 1 GF-4 卫星 PMI 传感器参数

Table 1 Parameters of PMI sensor for GF-4 satellite

谱段	谱段范围/ μm	空间分辨率/m	幅宽/km	重访时间/s
可见光 近红外 (VNIR)	1	0.45~0.90	50	400
	2	0.45~0.52		
	3	0.52~0.60		
	4	0.63~0.69		
	5	0.76~0.90		
中波红外 (MWIR)	6	3.50~4.10	400	

假设地球为均匀朗伯表面,则星载传感器接收到的大气顶层反射率(即表观反射率) ρ_{TOA} 可以表示为^[8]

$$\rho_{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \rho_0(\theta_s, \theta_v, \varphi) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi)}{1 - \rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi)S} \quad (1)$$

式(1)中, θ_s 为太阳天顶角, θ_v 为卫星天顶角, φ 为相对方位

角; ρ_0 是路径辐射项等效反射率; ρ_s 为地表二项反射率; S 为大气下界的半球反照率; $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 分别是向下和向上整层的大气透过率,两者的乘积代表大气总的透射率。

表观反射率受到大气环境下的等效反射率和地表反射率影响。因此,地表反射率 ρ_s 可以根据表观发射率 ρ_{TOA} 计算得到,简化如式(2)

$$\rho_s = \frac{\rho_{\text{TOA}} - \rho_0}{(\rho_{\text{TOA}} - \rho_0)S + T} \quad (2)$$

暗目标法也叫浓密植被法,传统暗目标法利用短波红外波段与红蓝波段之间地表反射率之间的相关关系。由表 1 可知 GF-4 卫星 PMI 传感器缺少暗目标法所需的短波红外波段,因此需要对暗目标法进行调整和改进。假设 GF-4 卫星 PMI 多光谱数据中暗像元的红蓝波段地表反射率间具有良好的相关性,即

$$\rho_{\text{red}}^s = k\rho_{\text{blue}}^s + b \quad (3)$$

式(3)中, k 为相关系数; b 为相应偏差。

利用 2018 年 9 月内蒙古试验场地测得的植被光谱数据,对其中 212 条不同的植被光谱数据分析,得到 PMI 传感器红蓝波段等效地表反射率的散点分布和拟合结果如图 2 所示,拟合之后两者的关系为 $f(x) = 1.643x - 0.007$,相关系数达 0.926。

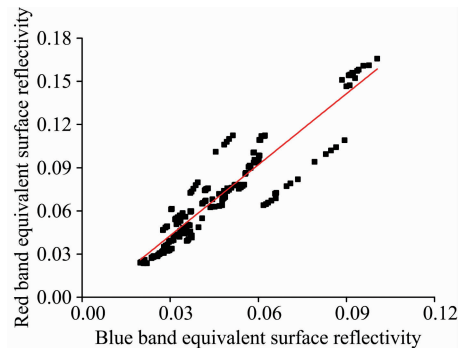


图 2 红蓝波段等效地表反射率的拟合曲线

Fig. 2 Fit curve of red-blue band equivalent surface reflectivity

将红、蓝波段的表观反射率 $\rho_{\text{red}}^{\text{TOA}}$, $\rho_{\text{blue}}^{\text{TOA}}$ 代入式(2),再联立式(3)可得类三元一次方程组,分析可知方程组中未知量为 AOD 和红、蓝波段的地表反射率 ρ_{red}^s 和 ρ_{blue}^s 。基于 6S 模型,针对研究区域设置相应的大气模式、气溶胶类型和观测几何条件等参数,建立不同观测条件和气溶胶类型下 AOD 和 ρ_0 , T , S 之间的查找表,通过插值得到 AOD 后再代入模型获得地表反射率,对类三元一次方程组进行求解即可完成 AOD 的反演。但是在查表过程中,每个像元的红蓝波段的地表反射率并不总是相等的关系,因此可将等式化为求偏差绝对值的问题,寻找最小的那一组 AOD 数据即可,则方程组转化为式(4)

$$\begin{cases} \rho_{\text{red}}^s = \frac{\rho_{\text{red}}^{\text{TOA}} - \rho_0}{(\rho_{\text{red}}^{\text{TOA}} - \rho_0)S + T} \\ \rho_{\text{blue}}^s = \frac{\rho_{\text{blue}}^{\text{TOA}} - \rho_0}{(\rho_{\text{blue}}^{\text{TOA}} - \rho_0)S + T} \\ \delta = |\rho_{\text{red}}^s - (1.643\rho_{\text{blue}}^s - 0.007)| \end{cases} \quad (4)$$

1.2 粒子群聚类算法

粒子群优化算法是由 Kennedy 和 Eberhar 对鸟群觅食行为的研究中分析总结出来的寻优算法。算法的原理如下：在预设搜索空间中初始化一群具有潜在最优解的粒子，这些粒子以一定的速度飞行，粒子搜索的方向和距离由这些粒子的速度决定，粒子的好坏由适应度值筛选，粒子在搜索空间中飞行时，会结合自身和其他粒子的适应度值不断更新自身的适应度值，完成目标寻优^[9]。

聚类可以理解为样本的排列与组合，这种组合使得同一类中的样本特征相似度最大，而不同类之间的样本差异也最大。PSO 聚类算法的过程中，每个粒子都看作是对样本间聚类的划分，都可以看成需求最佳聚类中心的可行解，因此可将粒子结构描述为预定分类数 K 个聚类中心 $C_k = (c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kN}) (k=1, 2, \dots, K)$ 的连接，并编码构造如式(5)

$$X_i = (c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1N}, c_{21}, c_{22}, \dots, c_{2N}, \dots, c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kN}) \quad (5)$$

粒子 i 可看成 $K \times N$ 维向量，当所有粒子的位置确定时，其代表的聚类中心随之确定。假设共有 J 个样本，对粒子进行拆分，第 j 个样本的所属类的划分采用最近邻域法

$$\|S_j - C_{k'}\| = \min_{k=1, 2, \dots, K} \|S_j - C_k\| \quad (6)$$

$$C_k = \frac{1}{\text{num}_k} \sum_{s \in S_k} s (k=1, 2, \dots, K) \quad (7)$$

则样本 S_j 属于 k' 类， S_k 指的是第 k 个聚类中的所有样本， num_k 是该类中的样本数。对该粒子处的各样本进行分类之后，计算适应度函数值 $\text{fitness}(t)$ ， $\text{fitness}(t)$ 采用类内离散度之和 J_c 来表示

$$\text{fitness} = J_c = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{\text{num}_k} \|S_{kn} - C_k\|^2 \quad (8)$$

式(8)中， S_{kn} 指第 k 类中的第 n 个样本， C_k 指第 k 类的聚类中心， t 是迭代次数。当粒子的适应度值小于其个体和全局历史最优适应度值时，则更新粒子的适应度值。

1.3 气溶胶类型对 AOD 的敏感性分析

6S 模型模拟了辐射在太阳-地表目标-接收器这一传输过程。假设研究区域为单一地表，使用 6S 模型中的城市型和海洋型、以及 OPAC 数据集^[10]中定义的大陆平均型和大陆污染型气溶胶类型，研究不同气溶胶类型对表现反射率的影响，如图 3 所示。可知当 AOD 较小时，四种气溶胶类型对表现反射率影响的差异不大，当 AOD 较大时，差异逐渐增大。大陆平均型、大陆污染型和海洋型三种气溶胶类型得到的表现反射率均随着 AOD 值的增大而逐渐增大，且增加的幅度不相同，但是城市型气溶胶类型得到的表现反射率随 AOD 值的增大而减小。实验结果说明气溶胶类型对 AOD 的敏感程度有很大差异，这种差异来自于气溶胶类型中各种类型粒子不同的吸收、散射特性。进一步证明，气溶胶类型会对 AOD 反演造成很大误差。

1.4 京津冀区域气溶胶类型聚类分析

根据长时序持续观测的 AERONET 地基数据发现，使用气溶胶微物理特性和光化学特性参数共同表征气溶胶类型，并利用聚类算法得出气溶胶类型是可行的^[11-12]。以京津冀地区为研究区域，选择 AERONET 地基网络中 2015 年 1

月 1 日到 2017 年 1 月 1 日的北京站点 (39.977°N, 116.381°E) 和香河站点 (39.754°N, 116.962°E) 气溶胶的特性数据进行统计分析。

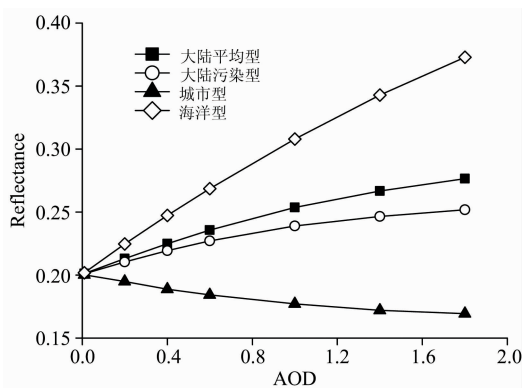


图 3 四种气溶胶类型对表现反射率的影响

Fig. 3 Effect of four aerosol types on apparent reflectivity

最佳聚类数量是聚类分析的关键参数之一。聚类数量 m 不断增加时，使用 PSO 聚类算法充分迭代求得各样本到自身所对应聚类中心的欧氏距离之和的最小值，用能量 E 表示 (即最优适应度 fitness)， E 与 m 的关系为 $E = f(m)$ ，根据 m 对于 E 的敏感性和拟合关系进行分析，可得到最佳聚类数量 m 。图 4 反映了两者在实数平面坐标上的散点分布情况，将其放到对数坐标轴上 (图 4 右上方)，可知能量 E 和 m 直线拟合度较好，证明了在实数坐标空间内 E 随 m 变化而指数衰减。由图 4 可以看出，聚类数量 m 足够大时，新增聚类所占比例越来越小，能量 E 的衰减程度也越来越弱，表明新增聚类对于气溶胶类型差异性的影响越来越小。

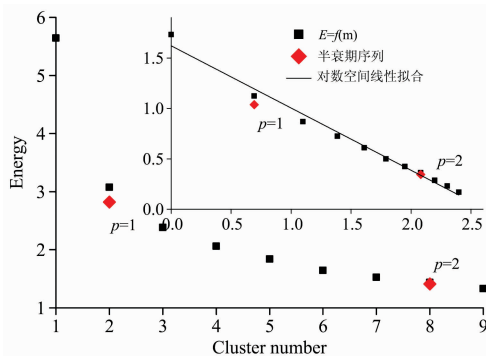


图 4 能量 E 与聚类数目 m 的关系

Fig. 4 Relationship between energy E and cluster number m

引用半衰期序列来进一步观测^[13]，以 $E_0 = f(1)$ 为基准，即所有的样本只划分为一种类型时对应的能量，当能量依次减半时取各聚类数量对应的 E 最为接近的情况，进而可以得到处于能量半衰期位置的序列 p ， p 对应聚类数目的下限。由于聚类分析之前要把所有的气溶胶样本归一化，使得 E 大幅减少，因此选择 $p=2$ ，即第二个半衰期对应的 $m=8$ 作为最佳聚类数量。PSO 聚类算法的参数设置如表 2 所示，根据 PSO 聚类算法得到 8 种气溶胶类型聚类结果。试验发现，这 8 种气溶胶类型中的 5 种占比高达 89.4%，满足研究区域大

表 2 PSO 聚类算法的参数
Table 2 Parameters of PSO clustering algorithm

Number of categories/m	Maximum/ Minimum Inertia weight ($\omega_{\max}/\omega_{\min}$)	Learning factors (c_1/c_2)	Number of trainings (T)
8	0.9/0.4	1.2/1.2	300

多数的大气情况,故只对聚类结果中的这 5 种进行讨论。

该地区气溶胶粒子的体积尺度谱适合用双模态对数分布描述^[14-15],所以描述气溶胶物理特性的粒子谱分布参数主要有粒子半径、体积浓度等,表征气溶胶光学特性的参数有复折射指数、单次散射反照率以及不对称因子。聚类所得 5 种气溶胶类型体积尺度谱分布特征如图 5 所示,复折射指数随波长变化情况如图 6 所示。C1, C2 和 C4 这三种类型占据了该地区这两年气溶胶类型的 70%。C1 和 C2 的体积谱相似,二者中两种模态粒子的体积浓度都比较小,而且二者细模态粒子峰值半径均在 0.15 μm 左右,5 种类型中最小。C2 聚类结果占比最大,其细粒子和粗粒子的体积占比最低,复折射指数的虚部最大,表示很强的吸收能力,是清洁天气的气溶胶类型;C1 的占比较 C2 小,其粗细粒子体积浓度比背景值均略有增加,而且粗粒子浓度增幅大于细粒子,为晴朗天气的气溶胶类型。C4 和 C5 体积谱均近似于单峰分布,但表现相反,C4 中细模态粒子占优,所以细模态粒子的消光贡献远大于粗模态粒子,且复折射指数实部和虚部也明显降低,即

C4 代表着雾霾、阴霾天气;而 C5 体积尺度谱以粗模态为主导峰,这主要来源于冬季和春季的沙尘型气溶胶,这种气溶胶的实部较高,具有较强的散射能力。对于 C3 来说,其体积尺度谱呈现出驼型分布,即细粒子体积和粗粒子体积相当,浓度峰值均在 0.15 $\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ 以上,代表严重的灰霾天气。

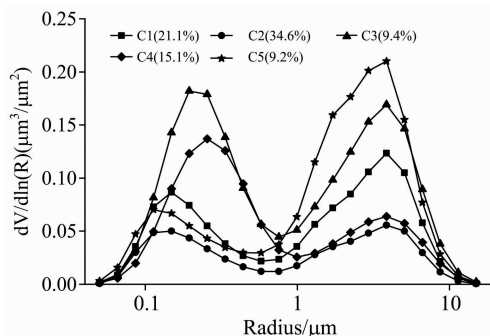


图 5 5 种气溶胶类型体积尺度谱分布
Fig. 5 Volumetric spectral distribution of five aerosol types

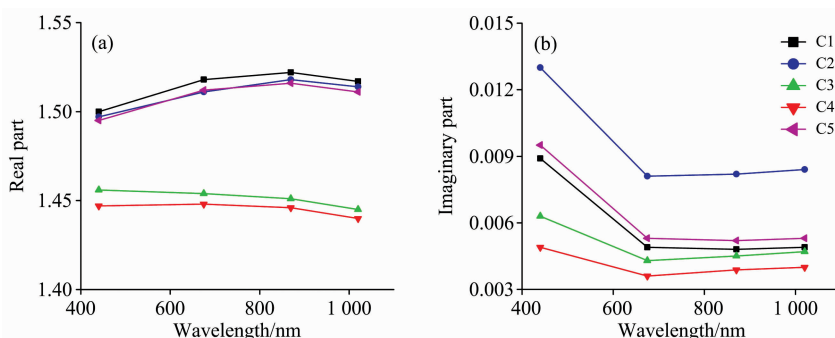


图 6 5 种气溶胶模式复折射指数

(a): 实部; (b): 虚部

Fig. 6 (a) The birefringence index real part (a) and birefringence index imaginary part (b) of five types of aerosol

基于对 5 种气溶胶类型特点的分析,C1, C2 和 C4 型更符合京津冀地区夏、秋季节的气溶胶类型特征。经过实验验证,C1 和 C2 型气溶胶类型的反演结果相似,且二者的物理和光学特性非常相似,为此不分析 C2,以 C1, C4 以及大陆型气溶胶类型进行 AOD 的反演。

2 结果与讨论

为排除云、水体及高亮地表的干扰,选择 $\rho_{\text{red}}^{\text{TOA}} > 0.2$ 以及 $\text{NDVI} < 0.6$ 的区域判定为非暗像元,同时利用 NDVI 和红波段表观反射率建立的暗像元指数 $I_{\text{BDV}} = \text{NDVI} / \rho_{\text{red}}^{\text{TOA}}$ 来评价暗像元的低反射率特性,保留 I_{BDV} 最大值的 50% 的暗像元

进行 AOD 反演^[5]。

为了评价 AOD 反演结果的可信度,选取 2017 年 9 月 12 日的 GF-4/PMI 遥感数据进行 AOD 反演,GF-4 卫星的过境时间是 10:47,MODIS 数据的获取时间是 10:20,时间相差不超过 30 min。将反演结果经过投影转换,并将分辨率重采样到 10 km,再与 MOD04_L2 进行比较分析,提取 $N=658$ 个有效像元,去除异常值之后进行逐像元对比,反演结果和 MOD04_L2 产品对比及拟合结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,3 种气溶胶类型 AOD 反演结果在层次方面和变化方面与 MOD04_L2 产品基本保持一致。C4 和大陆型气溶胶反演的 AOD 情况较好,两者均比 MODIS 气溶胶产品获取了更多细节性的信息,相关系数分别达到了

0.794 和 0.811, 均方根误差也分别为 0.260 7 和 0.122 4。而 C4 类型反演结果均方根误差较大的原因在于其对 AOD 值变化的敏感特性, 即气溶胶浓度越高, AOD 值越大, 反演出来的结果也越与实际结果相符合。这充分体现了 C4 气溶

胶类型具有良好的张性和波动性。C4 型气溶胶粒子中的细粒子占据主导消光贡献, 随着空气中相对湿度的增大, 气溶胶粒子呈现吸湿性增长, 增强了气溶胶粒子的散射性能, 此时 C4 型较其他两种类型更具优势。

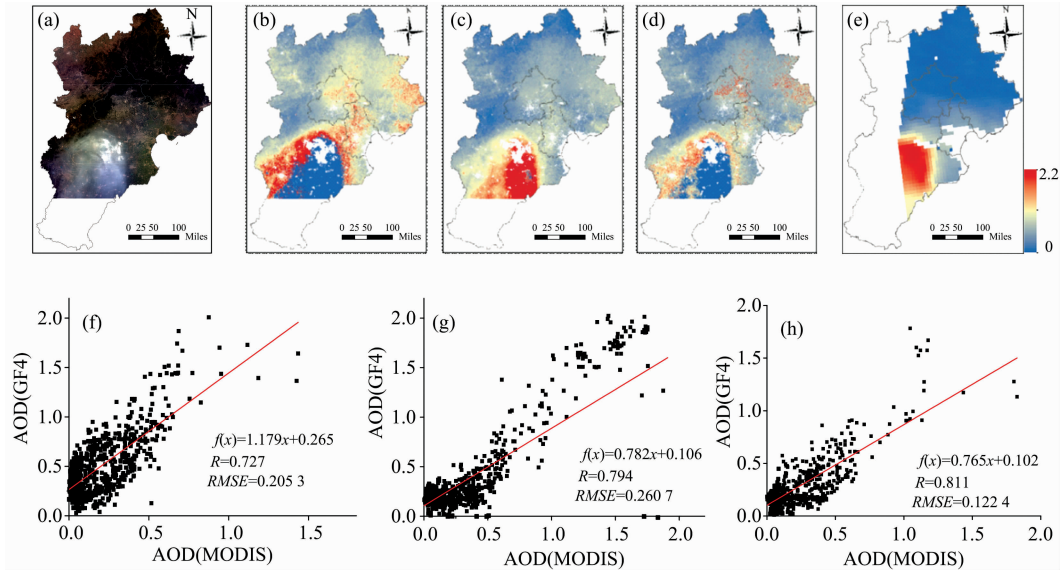


图 7 GF-4 卫星气溶胶光学厚度反演结果及一致性分析

(a): 原始数据; (b): C1 型反演结果; (c): C4 型反演结果; (d): 大陆型反演结果; (e): MODIS 溶胶产品; (f): C1 型反演结果分析; (g): C4 型反演结果分析; (h): 大陆型反演结果分析

Fig. 7 Inversion results and consistency of the aerosol optical depth of GF-4 satellite

(a): Original image; (b): C1 aerosol; (c): C4 aerosol; (d): Continental aerosol; (e): MODIS aerosol products; (f) Analysis of C1 type aerosol inversion results; (g): Analysis of C4 type aerosol inversion result; (h): Analysis of continental aerosol inversion results

AERONET 地基观测网使用的 CET-318 太阳光度计只提供波长 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1 020 和 1 640 nm 处的 AOD 值, Angstrom^[16] 研究发现, AOD 值与波长之间存在着指数衰减的关系, 可计算得到 550 nm 波长处的 AOD, 并选取 GF-4 卫星过境时间前后 30min 的插值结果求

取平均值, 当作 AERONET 的 AOD 观测数据。另外, 以影像中的地基站点为中心, 周围 5 km × 5 km 像元窗口下的 AOD 反演结果求取平均值, 作为 GF-4 卫星多光谱影像的 AOD 反演结果。京津冀区域 2018 年不同时间不同气溶胶类型的反演结果与 AERONET 地基观测结果对比如表 3。

表 3 不同气溶胶类型反演结果与 AERONET 地基数据对比

Table 3 Comparison of inversion results of different aerosol types with AERONET ground-based data

Time	AOD				Absolute Error		
	AERONET	C1	C4	Continental	C1	C4	Continental
0825	—	0.616 4	0.910 0	0.710 0	—	—	—
0904	0.120 0	0.411 0	0.390 0	0.386 0	0.291 0	0.270 0	0.266 0
0909	—	0.230 0	0.360 0	0.330 0	—	—	—
0923	0.080 0	0.210 0	0.150 0	0.169 0	0.130 0	0.070 0	0.089 0
1001	0.115 2	0.254 0	0.212 0	0.239 0	0.138 8	0.096 8	0.123 8
1003	0.074 1	0.080 0	0.172 0	0.162 0	0.005 9	0.097 9	0.087 9
1004	0.625 1	0.460 0	0.830 0	0.510 0	0.065 1	0.204 9	0.115 1

相比之下, 三种类型的气溶胶在不同时相的 AOD 反演结果基本一致, 除个别天数的 AERONET 地基数据缺失之外(如 8 月 25 日和 9 月 9 日的 AERONET 数据缺失), 各气溶胶类型下的 AOD 的反演结果均略高于测量值。分析各气溶胶类型反演结果与 AERONET 观测值的绝对误差时, 发

现 9 月 4 日影像的反演序列中的误差比较大, 在 0.26~0.3 之间, 分析可知, 当日北京与北京周边有大量薄云覆盖, 本算法受此影响, 将薄云判断成了气溶胶; 另外, 10 月 4 日中三者的绝对误差较为分散, 原因在于 C1 型和大陆型对气溶胶变化的不敏感, 相比而言 C4 型气溶胶能做到对气溶胶粒

子的有效识别。

为进一步讨论 AOD 反演结果与地基观测数据的关系, 分别将 C1、C4 和大陆型气溶胶的反演结果与 AERONET 地基观测数据构建了线性方程, 相关系数分别为 0.510, 0.890, 0.836。其中 C4 型的反演结果与地基观测结果更接近, 相关性为 0.890, 其次为大陆型气溶胶, 相关性为 0.836。由此可知, 聚类结果中以细粒子为主导的 C4 型气溶胶较模型内置的大陆型气溶胶更符合研究区域的气溶胶类型, 其 AOD 反演结果也更接近实测值。

3 结 论

基于 GF-4 卫星多光谱影像对京津冀区域的气溶胶光学

厚度的反演, 通过调整暗目标法使之适应于 GF-4 多光谱影像数据; 分析模型输入参数中气溶胶类型对 AOD 反演结果的影响, 使用 PSO 聚类算法对研究区域气溶胶类型进行聚类分析。使用聚类产生的气溶胶类型构建查找表对研究区域 AOD 进行高精度反演, 并将反演结果分别与 MOD04_L2 产品和 AERONET 地基观测结果进行比较, 结果显示 C4 型气溶胶类型对 AOD 具有很强的敏感性, 与研究区域的气溶胶特点更接近, 反演结果与地基数据相关性为 0.890; 将反演结果与 MOD04_L2 产品进行一致性分析, 相关性为 0.794。结果表明以细粒子和吸湿性粒子为主的 C4 型气溶胶类型满足该地区雾霾时相下的气溶胶状况, 能够有效减小在 AOD 反演中气溶胶类型引起的误差, 同时也证明了该聚类算法的有效性和可靠性。

References

- [1] Kaufman Y J, Sendra C. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(8): 1357.
- [2] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(27): 51.
- [3] Hsu N C, Si-chee T, King M D, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557.
- [4] TANG Jia-kui, XUE Yong, YU Tong, et al(唐家奎, 薛 勇, 虞 统, 等). *SCIENCE IN CHINA Series D: Earth Sciences(中国科学·D 辑: 地球科学)*, 2005, 35(5): 474.
- [5] ZHU Yu-xia, YU Yi-yong, ZHAO Ming-yao, et al(朱玉霞, 喻义勇, 赵明瑶, 等). *Retrieval and Analysis of Aerosol Optical Depth Using Chinese Satellites(基于国产卫星的气溶胶光学厚度反演和分析)*. *Annual Meeting of Chinese Society for Environmental Sciences(中国环境科学学会年会)*, 2014.
- [6] SUN Lin, YU Hui-yong, FU Qiao-yan, et al(孙 林, 于会泳, 傅俏燕, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2016, 20(2): 216.
- [7] Wang Zhongting, Chen Liangfu, Gong Hui, et al. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(06): 1047.
- [8] Vermote E F, Tanre D. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675.
- [9] LU Yi, ZHANG Pei-pei, WANG Xue-ying, et al(陆 艺, 张培培, 王学影, 等). *Acta Metrologica Sinica(计量学报)*, 2017, 38(3): 271.
- [10] Hess M, Koepke P, Schult I. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(5): 831.
- [11] Omar A H, Won J-G, Winker D M, et al. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(d10): D10S14.
- [12] Lee K H, Kim Y J. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(3): 1771.
- [13] Taylor M, Kazadzis S, Amiridis V, et al. *Atmospheric Environment*, 2015, 116(2015): 112.
- [14] LÜ Rui, YU Xing-na, SHEN Li, et al(吕 睿, 于兴娜, 沈 丽, 等). *China Environmental Science(中国环境科学)*, 2016, 36(6): 1660.
- [15] WANG Han, YANG Lei-ku, DU Wei-bing, et al(王 涵, 杨磊库, 都伟冰, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(4): 1019.
- [16] Ångström A. *Tellus*, 2010, 16(1): 64.

Inversion of Aerosol Optical Depth in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on PSO Clustering Algorithm

WANG Shu-tao, WANG Gui-chuan*, FAN Kun-kun, WU Xing, WANG Yu-tian

Institute of Electrical Engineering, Measurement Technology and Instrumentation Key of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract Aerosol optical thickness (AOD) is an important characterization parameter of aerosol concentration and atmospheric turbidity. Inversion of atmospheric AOD by remote sensing is an important way in the process of atmospheric monitoring and management, and in which the selection of methods suitable for the imaging characteristics of satellite sensors and the type of aerosols in line with the study area has always been the focus and difficulty of AOD inversion. In view of the problem that the traditional dark target method can not be directly applied to the multispectral remote sensing data of Gaofen IV (GF-4) satellite, this paper studies the distribution of the red and blue band equivalent surface reflectivity in GF-4 multispectral data and the linear relationship between them, and improves the dark target method to make it suitable for GF-4 satellite multispectral remote sensing data in combination with AOD inversion principle. The effect of input parameters on AOD inversion accuracy in the 6S radiation transfer model was analyzed, and the experimental results showed that aerosol type is one of the key factors affecting the high-precision inversion of AOD. The samples of aerosol characteristics in Beijing-Tianjin-Hebei area was analyzed by particle swarm optimization (PSO) cluster algorithm, by analyzing the proportion and half-life changes of the clustering results of each aerosol type, the C1 and C4 aerosol types in cluster results and the continental aerosol type of 6S models are finally determined to invert the AOD in Beijing-Tianjin-Hebei region. The inversion results were compared with MODIS aerosol products and AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET) ground-based site data, and the suitability and characteristics of different aerosol types are evaluated by evaluation criteria such as correlation coefficient and absolute error. The experimental results show that the C4 aerosol type, which is dominated by fine particles, is more satisfied with the characteristics of aerosols in the summer and autumn of Beijing-Tianjin-Hebei, and has better consistency with AERONET ground-based data. It is further proved that the PSO clustering algorithm can effectively reduce the influence of aerosol type difference on AOD inversion accuracy.

Keywords Aerosol; GF-4 satellite multispectral data; Beijing-Tianjin-Hebei region; PSO clustering algorithm

(Received Nov. 18, 2019; accepted Mar. 9, 2020)

* Corresponding author