

中国典型气溶胶模型光学特性分析及在大气校正中的应用

郑 杨^{1,2}, 梁晏祯³, 张 钊⁴, 屈 炜⁵, 胡传甲⁴, 侯伟真³, 杨磊库¹

(1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 中国科学院 空天信息创新研究院 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101; 3. 国防科工局 重大专项工程中心, 北京 100101; 4. 上海科学技术交流中心, 上海 200235; 5. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘 要: 针对中国区域内卫星影像大气校正中气溶胶模型的适用性问题, 基于 Lorenz-MIE 理论, 结合多角度偏振相机(DPC)的 3 个观测通道, 分析了中国典型气溶胶模型的光学特性, 并将其出现频率较高(>5%)的模型组合用于可见短波红外高光谱相机(AHSI)观测仿真数据的大气校正中。通过对比校正结果, 得到如下结论: 在大气较为清洁的情况下, 适合应用城市污染型与夏季粉煤灰型的模型组合或二次污染型与夏季粉煤灰型的模型组合, 对中国区域内卫星影像进行大气校正; 在气溶胶光学厚度较大(或能见度较低)时, 华北、华南和西北区域内卫星影像大气校正中二次污染型与夏季粉煤灰型的模型组合更为适用, 华东区域则是城市污染型与夏季粉煤灰型的模型组合更适用。

关键词: 气溶胶模型; Lorenz-MIE 理论; 光学特性; 大气校正

中图分类号: P 422.3; TP 79

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.019

Optical Property Analysis of Typical Aerosol Models in China and Their Application in Atmospheric Correction

ZHENG Yang^{1,2}, LIANG Yanzhen³, ZHANG Zhao⁴, QU Wei⁵, HU Chuanjia⁴,
HOU Weizhen³, YANG Leiku¹

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Earth Observation System and Data Center, China National Space Administration, Beijing 100101, China; 4. Shanghai Science and Technology Exchange Center, Shanghai 200235, China; 5. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: The optical properties of typical aerosol models in China are analyzed to solve the applicability problem of aerosol models for the atmospheric correction of satellite images in China. The Lorenz-Mie theory is used, combining with three observation channels of the directional polarization camera (DPC). The model combination with a higher frequency (>5%) is used in the atmospheric correction of simulation data observed by the advanced hyper-spectral imager (AHSI). From the comparison of the atmospherically corrected results, the following conclusions can be drawn: under the condition of relatively clean atmosphere, it is suitable to apply the combination of the urban polluted (F-ULW) model and the summer fly ash (C-ULW) model or the secondary polluted (F-BLW) model and the C-ULW model to the atmospheric correction of satellite images in China; when the aerosol optical thickness is large (or the visibility is low), the combination of the F-BLW model and the C-ULW model is more suitable for the atmospheric

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(41871269; 41975036)

作者简介: 郑 杨(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星遥感大气校正、地表特性反演研究。

通信作者: 梁晏祯(1977—), 女, 副研究员, 主要研究方向为卫星遥感应用。

correction of satellite images in North China, South China, and Northwest China, while the combination of the F-ULW model and the C-ULW is more suitable for the atmospheric correction of satellite images in Eastern China.

Key words: aerosol model; Lorenz-Mie theory; optical property; atmospheric correction

0 引言

气溶胶是地球-大气系统的重要组成部分,通过吸收和散射太阳辐射,干扰地球的辐射平衡,对气候变化、空气污染以及生态评价等产生了重要影响^[1]。为了评估气溶胶的这些影响,需要大面积(如区域、国家或全球)的典型或具有代表性的气溶胶模型,用以支持大气化学模型模拟以及气候、环境评估。因此在该领域,一些全球或区域典型的气溶胶模型已经基于长时间序列的地基观测建立了起来,并得到了广泛使用。LEVY 等^[2]将全球地基气溶胶观测网络(AERONET)站点的观测数据进行聚类分析,确定了随地理位置和季节变化的全球气溶胶类型。LEE 等^[3]使用了 20 个 AERONET 站点的观测数据,建立了东亚地区特定类型的气溶胶模型。LI 等^[4]基于太阳-天空辐射观测网(The Sun-Sky Radiometer Observation Network, SONET)的地基遥感观测数据,通过聚类分析方法得到了 10 种中国典型气溶胶模型。

当前,气溶胶参数的卫星遥感反演已成为气候变化和大气环境等研究领域的热点问题之一,而气溶胶模型的准确性是卫星遥感反演气溶胶参数精度的关键因素之一。与此同时,气溶胶模型选取的正确与否,对大气校正的精度也起着很大的作用。伽丽丽等^[5]基于 6 种典型的气溶胶模型,模拟研究了不同气溶胶模型的选择对卫星近红外偏振通道反演气溶胶光学厚度的影响。JETHVA 等^[6]通过改进中分辨率成像光谱辐射仪(Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer, MODIS)算法中印度 Kanpur 地区的气溶胶模型,大大提高了细模态气溶胶光学厚度的反演精度。马葵等^[7]基于 6S 辐射传输模型探讨了不同气溶胶模型对卫星影像大气校正的影响。

气溶胶的光学特性参数由气溶胶粒子的微物理特性和化学组成决定,直接体现了气溶胶对电磁辐射吸收和散射的影响^[8]。不同类型的气溶胶具有显著差异的微物理特性和光学特性,通常用粒子谱分布、散射相函数、偏振散射相函数以及单次散射反照率(Single Scattering Albedo, SSA)等来描述气

溶胶的这些特性。MA 等^[9]在 SONET 观测的基础上,利用粒子谱分布、复折射指数以及单次散射反照率分析了嵩山地区气溶胶的光学和微物理特征,建立了中国中部嵩山地区的气溶胶模型。HOU 等^[10]用粒子谱分布、散射相函数、偏振散射相函数描述了单次卫星偏振观测的气溶胶特性,开展了信息量分析研究^[11],系统评估了卫星遥感观测是否有效支撑典型区域的气溶胶多参数联合反演。

本文结合多角度偏振相机(DPC/GF5)的 3 个偏振观测通道(490、670、865 nm)^[12-13],基于 LI 等提出的 10 种中国典型气溶胶模型中出现频率较高的 7 种气溶胶模型,利用 Lorenz-MIE 理论和 Fortran 软件包,在已知其粒子谱分布的基础上,计算了散射相函数、偏振相函数以及单次散射反照率与波长的关系,充分分析了每个气溶胶模型的光学特性。选择中国华北(北京)、华东(徐州)、华南(香港)、西北(SACOL)区域 4 个典型 AERONET 站点在大气污染和清洁情况下的地基观测数据,基于 6SV 模型对搭载在高分五号(Gaofen-5, GF-5)卫星平台上的可见短波红外高光谱相机(Advanced Hyper-Spectral Imager, AHSI)卫星遥感观测进行了仿真。选取 5 种出现频率较高的中国典型气溶胶模型组合,对仿真得到的表观反射率进行大气校正,探究了不同气溶胶模型组合对中国区域内卫星观测数据大气校正的影响。

1 模型与方法

1.1 中国典型气溶胶模型

气溶胶模型一般通过地基站点的长期观测后进行数据聚类分析得到。SONET 观测网是中国的一个本地观测网,对气溶胶进行地面遥感观测^[14]。目前在中国分布有 16 个永久观测点,覆盖了大部分典型的气溶胶地质(高原、沙漠、山地、丘陵、平原、岛屿)和人文(农村、城市、特大城市、背景、污染区域)特征,16 个站点中有 6 个站点的观测时间超过 5 a,这为分析中国地区的典型气溶胶特征提供了坚实的基础。

LI 等基于 SONET 多年的观测数据,利用聚类

分析法得到了 10 个中国典型气溶胶模型,见表 1。5 种典型的细模态气溶胶模型分别为城市污染型 (Urban polluted, F-ULW)、二次污染型 (Secondary polluted, F-BLW)、混合污染型 (Combined polluted, F-UHS)、粉煤灰污染型 (Polluted fly ash, F-BNM) 和大陆背景型 (Continental background, F-BNS)。5 种粗模态气溶胶模型为夏季粉煤灰型 (Summer fly ash, C-ULW)、冬季粉煤灰型 (Winter fly ash, C-UHS)、初始沙尘型 (Primary dust, C-UNW)、输送沙尘型 (Transported dust, C-BNM) 和背景沙尘型 (Background dust, C-BHM)。

表 1 SONET 气溶胶模型分类信息^[4]

Tab.1 Aerosol model classification with the SONET^[4]

模态分类	气溶胶类型	基本信息
细模态	城市污染(F-ULW)	具有高颗粒浓度的城市污染型细模态气溶胶
	大陆背景(F-UHS)	具有低浓度的背景细模态气溶胶
	二次污染(F-BLW)	具有低折射率和高散射性的二次污染气溶胶
	混合污染(F-BNS)	具有高吸收性的人为直接排放和二次污染的混合气溶胶
	粉煤灰污染(F-BNM)	具有大的亚模态细颗粒的人为污染和粉煤灰的混合气溶胶
粗模态	夏季粉煤灰(C-ULW)	具有低吸收性的背景型粉煤灰气溶胶粗颗粒(原生的有机气溶胶排放)
	冬季粉煤灰(C-UHS)	具有高吸收性的背景型粉煤灰气溶胶粗颗粒,如受人为因素污染的粉煤灰
	初始沙尘(C-UNW)	具有高浓度的自然沙尘气溶胶粗颗粒
	传输沙尘(C-BNM)	经过长期传输和沉降的沙尘颗粒
	背景沙尘(C-BHM)	具有大的模态的背景沙尘气溶胶颗粒

研究选取了出现频率最高的 7 种粗细模态气溶胶模型分析其光学特性,分别为 F-ULW、F-UHS、F-BLW、F-BNS、C-ULW、C-UHS、C-BHM,其微物理参数见表 2。表中, r 为中值半径, σ 为标准差(μm), C 为峰值体积浓度($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$), n 为复折射指数实部, $k_{\text{f},440}$ ($k_{\text{c},440}$)和 $k_{\text{f}}(k_{\text{c}})$ 为复折射指数细(粗)模态在 440 nm 和 675~1 020 nm 处的虚部,下标 f 为细模态,SMF 为亚微细模态,SMC 为亚粗细模态,c 为粗模态。

表 2 7 种中国典型气溶胶模型的微物理参数

Tab.2 Microphysical parameters of seven typical aerosol models in China

细模态									
类型	$r_{\text{f}}/\mu\text{m}$	$r_{\text{SMF}}/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{f}}/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{SMF}}/\mu\text{m}$	$C_{\text{f}}/(\mu\text{m}^3\cdot\mu\text{m}^{-2})$	$C_{\text{SMF}}/(\mu\text{m}^3\cdot\mu\text{m}^{-2})$	n_{f}	$k_{\text{f},440}$	k_{f}
F-ULW	0.200	—	1.669	—	0.136	—	1.410	0.007	0.009
F-UHS	0.146	—	1.710	—	0.063	—	1.515	0.014	0.017
F-BLW	0.142	0.320	1.456	1.637	0.087	0.069	1.392	0.007	0.010
F-BNS	0.107	0.236	1.339	1.710	0.046	0.081	1.459	0.016	0.020
粗模态									
类型	$r_{\text{SMC}}/\mu\text{m}$	$r_{\text{c}}/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{SMC}}/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{c}}/\mu\text{m}$	$C_{\text{SMC}}/(\mu\text{m}^3\cdot\mu\text{m}^{-2})$	$C_{\text{c}}/(\mu\text{m}^3\cdot\mu\text{m}^{-2})$	n_{c}	$k_{\text{c},440}$	k_{c}
C-ULW	—	2.751	—	1.941	—	0.089	1.437	0.006	0.009
C-UHS	—	3.133	—	1.890	—	0.090	1.522	0.015	0.028
C-BHM	2.026	4.788	1.941	1.439	0.121	0.076	1.518	0.008	0.012

体积谱分布如图 1 所示,其中有 4 种气溶胶模型呈单峰结构,分别为 F-ULW、F-UHS、C-ULW、C-UHS;剩余 3 种呈双峰结构,分别为 F-BLW、F-BNS、C-BHM。每种模型粗、细模态的峰值半径及峰值大小各不相同。需要注意的是,双峰的特征可能肉眼无法分辨,因为一个小峰可能被另一个大峰所覆盖。

1.2 MIE 散射

太阳辐射通过大气时会受到大气分子和气溶胶粒子吸收和散射的影响,其中气溶胶粒子对太阳

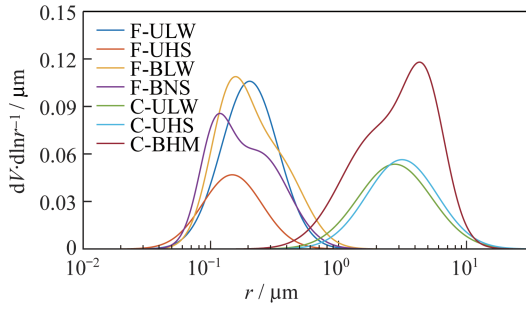


图 1 7 种中国典型气溶胶模型的体积谱分布

Fig.1 Volume spectrum distribution of seven typical aerosol models in China

辐射的吸收和散射不仅取决于粒子数密度和半径,还与它的复折射指数有关^[15]。基于球形粒子群的假设,根据 MIE 散射理论,可以计算每种气溶胶模型的光学参数,包括散射相函数(P)、偏振相函数(q)以及单次散射反照率(ω_0 , SSA),公式如下^[16]:

$$\sigma_s(r, \lambda, m) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot (|a_n(r, \lambda, m)|^2 + |b_n(r, \lambda, m)|^2) \quad (1)$$

$$\sigma_e(r, \lambda, m) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot \text{Re}(a_n(r, \lambda, m) + b_n(r, \lambda, m)) \quad (2)$$

$$\beta_s(r, \lambda, m) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma_s(r, \lambda, m) n(r) dr \quad (3)$$

$$\beta_e(r, \lambda, m) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma_e(r, \lambda, m) n(r) dr \quad (4)$$

$$\omega_0 = \beta_s / \beta_e \quad (5)$$

$$S_1(r, \lambda, m, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n(r, \lambda, m) \pi_n(\cos \theta) + b_n(r, \lambda, m) \tau_n(\cos \theta)) \quad (6)$$

$$S_2(r, \lambda, m, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n(r, \lambda, m) \pi_n(\cos \theta) + a_n(r, \lambda, m) \tau_n(\cos \theta)) \quad (7)$$

$$P(r, \lambda, m, \theta) = \frac{2\pi}{k^2 \beta_s} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (|S_1(r, \lambda, m, \theta)|^2 + |S_2(r, \lambda, m, \theta)|^2) n(r) dr \quad (8)$$

$$q(r, \lambda, m, \theta) = \frac{2\pi}{k^2 \beta_s} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (|S_1(r, \lambda, m, \theta)|^2 - |S_2(r, \lambda, m, \theta)|^2) n(r) dr \quad (9)$$

式中: r 为气溶胶粒子半径; λ 为波长; m 为复折射指数; θ 为散射角; a_n 和 b_n 为 MIE 散射系数,与 r 、 λ 、 m

有关; π_n 和 τ_n 为角函数,与 θ 有关; σ_s 为散射截面; σ_e 为消光截面; $\text{Re}(\cdot)$ 为自变量的实部; $n(r)$ 为粒子谱分布; β_s 为粒子群的散射系数; β_e 为粒子群的消光系数; S_1 和 S_2 为散射函数。

本研究采用 MICHAEL^[17]的 MIE 散射 Fortran 软件包对中国典型气溶胶模型的散射相函数、偏振相函数以及单次散射反照率等光学参数进行了计算,分析研究了每种模型的光学特性。

2 气溶胶模型的光学特性分析

2.1 单模态的气溶胶模型

为充分研究上述 7 种典型气溶胶模型的散射特性与偏振特性,本研究选择了 DPC 的 3 个偏振观测通道所对应的每种模型的光学参数进行分析,如图 2 和图 3 所示。其中,图 2 和图 3 分别为 7 种气溶胶模型的散射相函数(P) (图 2(a)~图 2(d)和图 3(a)~图 3(c)) 和偏振相函数(q) (图 2(e)~图 2(h)和图 3(d)~图 3(f)) 随散射角(θ)的变化情况。由图 2(a)~图 2(d)和图 3(a)~图 3(c)可以看出:在 $\theta < 30^\circ$ 和 $\theta > 150^\circ$ 时,粗模态气溶胶模型表现出较强的散射特性;而当 $\theta = 30^\circ \sim 150^\circ$ 时,细、粗模态气溶胶模型的散射强度基本相当;值得注意的是,卫星遥感一般为后向散射(θ 至少大于 60°)。由图 2(e)~图 2(h)和图 3(d)~图 3(f)可以看出:相似于强度散射,粗模态气溶胶模型的偏振散射主要集中于较小散射角($\theta < 30^\circ$)区间和较大散射角($\theta > 150^\circ$)区间,有所不同的是,当 $\theta = 30^\circ \sim 150^\circ$ 时,粗模态气溶胶模型的偏振相函数非常小,在数值上显著低于细模态气溶胶模型的偏振相函数。不同于粗模态气溶胶模型,细模态气溶胶模型在 $[30^\circ, 120^\circ]$ 表现出较强的偏振特性,这是由于偏振相函数对气溶胶粒子的大小很敏感,在大部分散射角范围内,粒子尺度越大,偏振相函数越小。

由图 2 可知,4 种细模态气溶胶模型的散射相函数和偏振相函数随 θ 变化的趋势大致相同。较为不同的是,当 $\theta < 30^\circ$ 时,F-ULW 的散射特性较强;当 $\theta > 150^\circ$ 时,F-BNS 的散射特性较强;而当 $\theta = 30^\circ \sim 120^\circ$ 时,F-BLW 的偏振特性强于其余 3 个细模态气溶胶模型。由图 3(a)~图 3(c)中可以看出:3 种粗模态气溶胶模型的散射相函数随散射角变化的趋势大致相同,当 $\theta < 30^\circ$ 时,在粗模态气溶胶模型中

C-ULW 和 C-UHS 的散射特性大致相当且强于 C-BHM; 当 $\theta > 150^\circ$ 时, C-BHM 的散射特性强于 C-ULW 和 C-UHS。由图 3(e)~图 3(f)中可以看

出: C-BHM 的偏振相函数随 θ 变化的趋势明显不同于 C-ULW 和 C-UHS, 整体呈现负值状态。7 种气溶胶模型在 490、670、865 nm 的 SSA 见表 3。

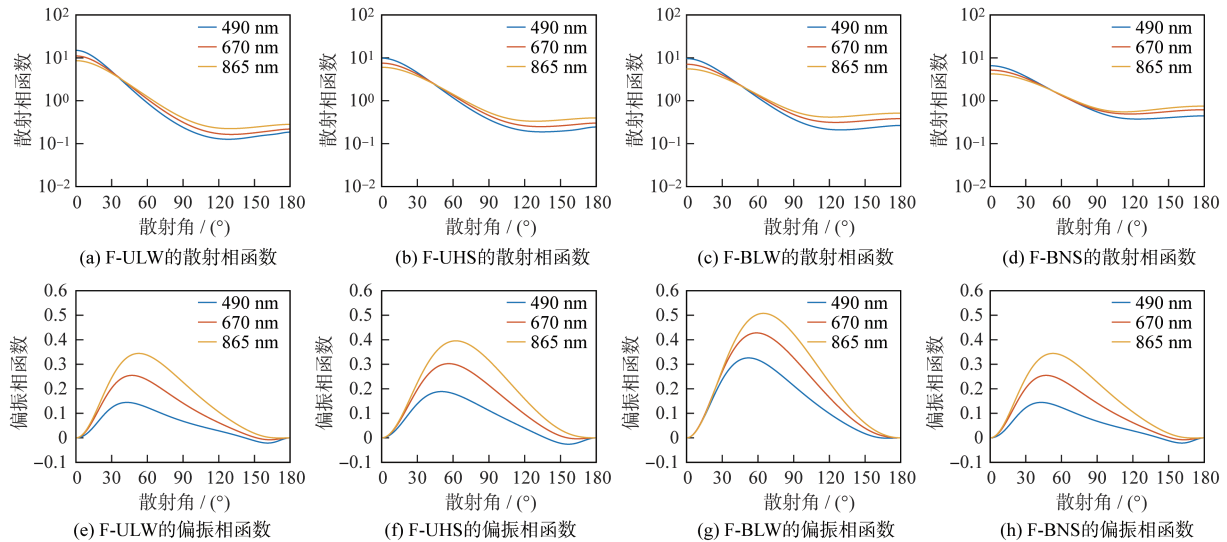


图 2 4 种典型细模态气溶胶模型在 490、670、865 nm 波长的散射相函数和偏振相函数

Fig.2 Scattering phase functions and polarized phase functions of four typical fine-mode aerosol models at the wavelengths of 490 nm, 670 nm, and 865 nm

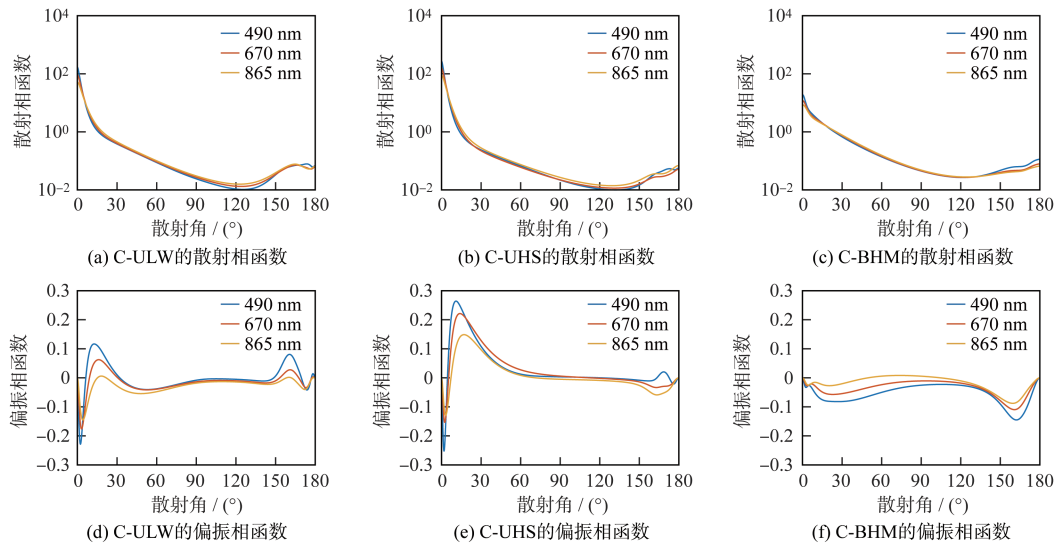


图 3 3 种典型粗模态气溶胶模型在 490、670、865 nm 波长的散射相函数和偏振相函数

Fig.3 Scattering phase functions and polarized phase functions of three typical coarse-mode aerosol models at the wavelengths of 490 nm, 670 nm, and 865 nm

表 3 7 种气溶胶模型的在 490、670、865 nm 的 SSA

Tab.3 SSA of seven aerosol models at 490 nm, 670 nm, and 865 nm

类型	F-ULW	F-UHS	F-BLW	F-BNS	C-ULW	C-UHS	C-BHM
SSA(490 nm)	0.955 6	0.924 1	0.939 1	0.854 4	0.796 3	0.644 0	0.913 5
SSA(670 nm)	0.935 9	0.893 7	0.886 8	0.756 3	0.783 9	0.600 5	0.900 9
SSA(865 nm)	0.923 3	0.869 6	0.848 0	0.670 3	0.819 0	0.628 9	0.910 1

SSA 表示的是气溶胶散射光学厚度在总光学厚度中的比重,描述了气溶胶的吸收特性。在 490 nm, F-ULW 的 SSA 最大, 散射性最强, F-BLW 次之; C-UHS 的 SSA 最小, 吸收性最强, C-ULW 次之。而在 670 nm 和 865 nm, F-ULW 的散射性最强, F-UHS 次之; C-UHS 的吸收性最强, F-BNS 次之。

2.2 粗、细模态组合的气溶胶模型

根据上述 7 种粗、细模态气溶胶模型共同出现的概率, 选择了 5 种出现频率(>5%) 较高的中国典型气溶胶模型组合(F-ULW+C-ULW、F-BLW+C-ULW、F-BNS+C-UHS、F-UHS+C-BHM、F-UHS+C-UHS)用于大气校正。其中, 所选用的 5 种气溶胶模型组合的粒子谱分布及 SSA 如图 4 所示。由图 4(a) 可以看出, F-ULW+C-ULW、F-BLW+C-ULW 及 F-BNS+C-UHS 以细粒子为主导, 且由表 1 可知, 这 3 种组合都与污染有关, 组合中细模态模

型的峰值体积半径由 0.107 μm (混合污染, F-BNS) 增加到 0.200 μm (城市污染, F-ULW), 光吸收特性(k 从 0.020 减少到 0.009), 很大程度上揭示了雾霾污染从形成到扩散的过程^[18]; F-UHS+C-BHM 与 F-UHS+C-UHS 组合中粗粒子占优势, 且这 2 种组合都包含相同的细模态模型(大陆背景, F-UHS), 但结合了不同的粗模态模型(背景沙尘, C-BHM; 冬季粉煤灰, C-UHS)。首先因为自然沙尘较多的地区, 人为污染较低; 其次 C-BHM 的峰值体积半径(4.7 μm), 远大于 C-UHS 的峰值体积半径(3.1 μm); 最后表明中国大陆背景沙尘具有较大的粗粒子尺寸。由图 4(b) 可以看出, 对应 SSA 的结果, 在 400~490 nm 范围内, F-BLW+C-ULW 组合的散射性最强; 在 490~2 500 nm 范围内, F-UHS+C-UHS 组合的散射性最强。在 400~1 300 nm 范围内, F-BNS+C-UHS 组合的吸收性最强; 在 1 300~2 000 nm 范围内, F-UHS+C-BHM 组合的吸收性最强; 在 2 000~2 500 nm 范围内, F-UHS+C-UHS 组合的吸收性最强。

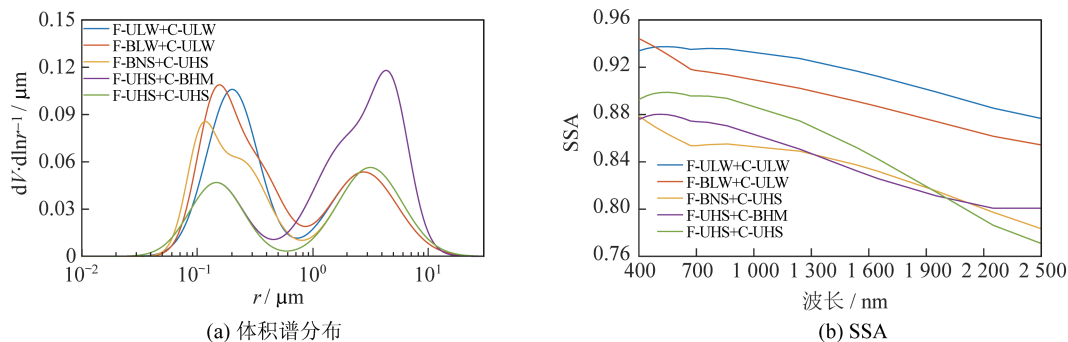


图 4 5 种中国典型气溶胶模型组合的体积谱分布及 SSA

Fig.4 Volume spectrum distribution and SSA of five typical aerosol model combinations in China

3 气溶胶模型在大气校正中的应用

3.1 AHSI 强度观测仿真及大气校正

为了确保卫星观测仿真结果的准确性, 本文选取了 4 个中国典型区域(华北北京、华东徐州、华南香港、西北 SACOL)地基站点在大气污染(550 nm, AOD=0.6)和清洁(550 nm, AOD=0.1)情况下的观测数据, 基于 6SV 模型对 AHSI 卫星遥感观测进行正向模拟仿真。仿真过程中地表反射率选取的是 USGS 地物波谱库中植被波谱数据, 而后针对仿真得到的表观反射率(Top of Atmosphere reflectance, TOA)进行大气校正。

为体现不同气溶胶模型组合的选择给地表反射率带来的差异, 通过固定用于对当天同一站点仿真结果大气校正的 6SV 模型中的其他输入参数, 如太阳和卫星的观测几何、大气模型、气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)、地表特征等, 仅改变气溶胶模型的输入参数来实现对比。同时为了进一步评价不同气溶胶模型组合在中国不同区域不同天气条件(即 AOD 不同)下大气校正的适用性, 分别对北京、徐州、香港、SACOL 站点仿真得到的表观反射率进行基于上述 5 种气溶胶模型组合在大气污染和清洁情况下的大气校正, 并以仿真过程中所选取的地物波谱库中的植被地表反射率为基

准,将 5 种气溶胶模型组合的校正结果与之进行对比,分析模型的适用性。

3.2 中国典型气溶胶模型在大气校正中的适用性分析

大气校正前后的结果对比如图 5 所示。其中,

图 5(a)~图 5(d)为大气污染情况下的校正前后结果对比,图 5(e)~图 5(f)为大气清洁情况下的校正前后结果对比。图 5(a)和图 5(e)为北京站点,图 5(b)和图 5(f)为徐州站点,图 5(c)和图 5(g)为香港站点,图 5(d)和图 5(h)为 SACOL 站点。

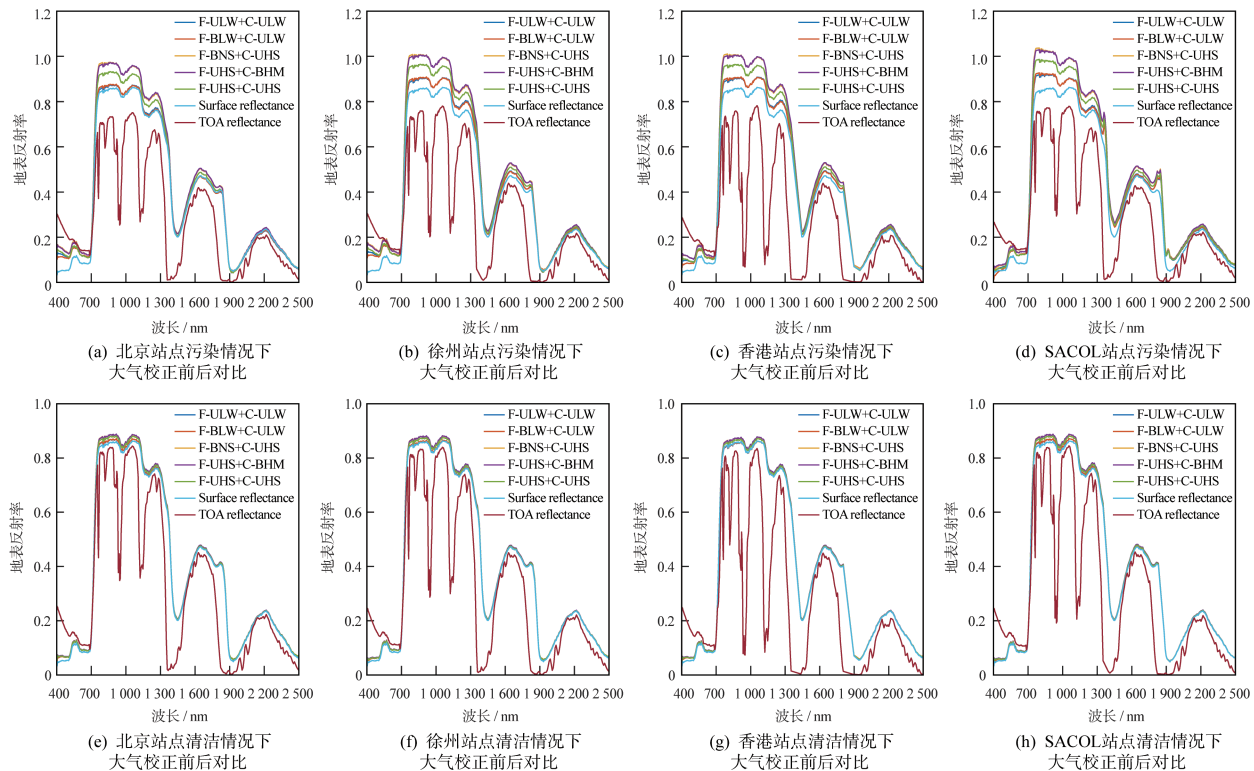


图 5 基于不同气溶胶模型组合的大气校正结果前后对比

Fig.5 Results of different aerosol model combinations before and after atmospheric correction

由图 5 可以看出,由气溶胶模型不同所导致的校正结果的差异主要表现在可见光和近红外波段,大气污染越严重,差异越明显,且差异随波长的增加逐渐减少。这是由于当太阳辐射波长大于气溶胶粒子的直径后,气溶胶的散射效应会随之减弱,因此,不同气溶胶模型所导致的大气校正的差异会随波长的增加而减小^[7]。F-ULW+C-ULW 和 F-BLW+C-ULW 的校正结果较为接近,F-BNS+C-UHS 和 F-UHS+C-BHM 的校正结果较为接近。

由表 4 可以看出:北京站点和香港站点在大气污染或清洁情况下,F-BLW+C-ULW 大气校正结果的平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)最小,分别为 1.587 4%、0.652 6%、2.843 8%、0.263 1%,大气校正效果最好;徐州站点在大气污染或清洁情况下,F-ULW+C-ULW 的校正结果的 MAE 最小,分别为 3.220 2%、0.396 7%,大气校正

效果最好;而 SACOL 站点,在大气污染的情况下,F-ULW+C-ULW 的校正效果最好,MAE 为 3.428 9%,在大气清洁的情况下,F-BLW+C-ULW 的校正效果最好,MAE 为 0.510 6%。且 4 个站点在大气清洁的情况下,F-ULW+C-ULW 大气校正结果的 MAE 与 F-BLW+C-ULW 大气校正结果的 MAE 非常接近,两者之间的差值极其小,介于 0.001 9%~0.000 2% 之间。所以在能见度较高、大气较为清洁的情况下,中国区域内卫星影像大气校正的气溶胶模型建议在 F-ULW+C-ULW 模型和 F-BLW+C-ULW 模型之间任选其一。而在 AOD 较大、能见度较低的情况下,华北、华南和西北区域建议选择 F-BLW+C-ULW 模型用于卫星影像的大气校正,华东区域则建议选择 F-ULW+C-ULW 模型。

表 4 不同气溶胶模型下大气校正结果的平均绝对误差

Tab.4 Mean absolute errors of the atmospheric correction results with different aerosol models

站点	大气状况	F-ULW+C-ULW/%	F-BLW+C-ULW/%	F-BNS+C-UHS/%	F-UHS+C-BHM/%	F-UHS+C-UHS/%
北京	污染	1.688 021	1.587 406	5.640 219	5.576 004	3.623 778
	清洁	0.653 290	0.652 636	1.345 378	1.361 333	1.044 167
徐州	污染	3.220 222	3.230 514	7.651 745	7.543 591	5.488 272
	清洁	0.396 706	0.398 984	1.082 381	1.099 165	0.783 218
香港	污染	2.849 342	2.843 833	7.269 218	7.202 696	5.097 490
	清洁	0.304 109	0.263 077	0.897 239	0.914 671	0.592 391
SACOL	污染	3.428 888	3.508 043	7.722 895	7.678 973	5.624 607
	清洁	0.512 438	0.510 603	1.204 301	1.223 617	0.903 541

4 结束语

本文针对中国区域内卫星影像大气校正中气溶胶模型的适用性问题,通过分析 LI 等提出的中国典型气溶胶模型的光学特性,及其模型组合在不同大气状况下的大气校正结果,得到以下结论。

1) 当 $\theta < 30^\circ$ 和 $\theta > 150^\circ$ 时, C-ULW、C-UHS、C-BHM 的散射特性较强,偏振特性较为集中;而当 $\theta = 30^\circ \sim 120^\circ$ 时, F-ULW、F-UHS、F-BLW、F-BNS 的偏振特性较强,而散射特性则与 C-ULW、C-UHS、C-BHM 基本相当。

2) 各组合模型之间的大气校正结果与基准数据之间的差异主要体现在可见光与近红外波段,且在大气较为清洁的情况下,各组合模型的大气校正结果差异较小,而 AOD 越大,能见度越低,差异越大。

3) 在中国区域内,大气较为清洁(或能见度较高)时,卫星影像的大气校正中 F-ULW+C-ULW 和 F-BLW+C-ULW 模型都适用,可任意二选一;而在大气状况较差、AOD 较大(或能见度较低)时,华北、华南和西北区域 F-BLW+C-ULW 模型更为适用,华东区域则是选择 F-ULW+C-ULW 模型更适合。

参考文献

- [1] LI Z Q, HOU W Z, HONG J, et al. Directional polarimetric camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 218: 21-37.
- [2] LEVY R C, REMER L A, DUBOVIK O. Global aerosol optical properties and application to moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol retrieval over land [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112: D13210.

- [3] LEE K H, KIM Y J. Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted, and Asian dust storm days [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(6): 1771-1784.
- [4] LI Z Q, ZHANG Y, XU H, et al. The fundamental aerosol models over China region: a cluster analysis of the ground-based remote sensing measurements of total columnar atmosphere [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46: 4924-4932.
- [5] 伽丽丽, 马龔, 陈兴峰, 等. 卫星近红外偏振通道反演气溶胶光学厚度的气溶胶模型影响[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 569-577.
- [6] 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]. Geophys Res, 2010, 115: D18213.
- [7] 马龔, 李正强, 李浩, 等. 卫星影像大气校正中气溶胶模型的影响分析: 以天津地区为例[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 410-418.
- [8] 李莉, 李正强, 伽丽丽, 等. 基于多角度多光谱 Stokes 参数 Q 和 U 测量反演气溶胶偏振相函数[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3699-3707.
- [9] MA Y, LI Z Q, LI Z Z, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over mountains in central China based on a sun-sky radiometer site of SONET [J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 111.
- [10] HOU W, LI Z, WANG J, et al. Improving remote sensing of aerosol microphysical properties by near-infrared polarimetric measurements over vegetated land: Information content analysis [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123: 2215-2243.

(下转第 145 页)