

宽带太阳漫射辐射法反演辐射加权平均的气溶胶一次散射反照率研究

邱金桓

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 引入了一个辐射加权平均的宽带气溶胶一次散射反照率 (SSA) 的定义, 提出了一个从宽带的漫射信息反演该 SSA 的方法。数值模拟结果表明, 在 Junge 气溶胶谱分布情形下, 对气溶胶光学厚度、Ångström 指数与气溶胶虚部的通常变化范围, 应用该 SSA 所计算的 2160 组宽带太阳辐射反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的相对标准误差都在 1.107% 以内; 绝对标准差在 0.00287 以内。对非 Junge 的大陆性和都市工业污染气溶胶模式 (由水溶性、沙尘和碳粒子组成), 在 72 组反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率计算中, 相对标准差都在 2.047% 以内, 绝对标准差在 0.0075 以内。在 Junge 气溶胶假设下, 作者提出了一个综合应用宽带太阳直射和漫射信息同时反演气溶胶光学厚度与辐射加权平均 SSA 的方法, 并通过模拟反演分析了 SSA 反演的 3 个主要误差因子。从反演结果可以看出: (1) 如果 Ångström 指数误差在 ± 0.2 以内, 对 $0.55 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度大于 0.312 大陆性气溶胶, SSA 误差在 ± 0.0418 以内; (2) 波长无关的宽带地表反照率适用于 SSA 反演; (3) 气溶胶光学厚度越大, 辐射资料误差所引起的 SSA 解误差越小。当辐射误差在 $\pm 2\%$ 以内以及 $0.55 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度大于 0.312 时, SSA 解的误差在 ± 0.0149 以内; 辐射误差在 $\pm 4\%$ 以内时, SSA 解的误差在 ± 0.0317 以内。

关键词 宽带漫射辐射法 辐射加权平均一次散射反照率 反演误差

文章编号 1006-9895 (2006) 05-0767-11

中图分类号 P422

文献标识码 A

Broadband Diffuse Radiation Method to Retrieve Radiation-Weighted Mean Aerosol Single Scattering Albedo

QIU Jin-Huan

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In this paper, radiation-weighted mean single scattering albedo (SSA) and Ångström index are introduced, and a method to retrieve the SSA from broadband solar diffuse radiation is presented. As shown in 2160 sets of numerical simulations, in the case of the Junge aerosol size distribution and for the usual aerosol optical thickness, Ångström index and imaginary part of aerosol refractive index, relative standard errors in broadband solar reflectance, diffuse transmittance, total transmittance and absorption calculations using the SSA are all within 1.107%, and their absolute standard errors within 0.00287. For non-Junge continent and urban-industrial aerosols (composed of water-soluble, dust-like and soot particles), relative and absolute standard errors among 72 sets of reflectance, transmittance and absorption calculations using the SSA are within 2.047% and 0.0075, respectively. Under an assumption of the Junge aerosol, a method to simultaneously retrieve aerosol optical thickness (AOT) and the radiation-weighted mean SSA is proposed using both broadband solar direct and diffuse radiations. Furthermore, the three main error factors of the SSA retrievals are analyzed through retrieval simulations. According to the retrieval

results, three conclusions are obtained. At first, if the error of Ångström index is within ± 0.2 and $0.55 \mu\text{m}$ -wavelength AOT is larger than 0.312 , errors of the SSA retrievals are within ± 0.0418 for the continent aerosol. Secondly, the wavelength-independent broadband surface albedo is suitable for the SSA retrievals. Thirdly, the larger aerosol optical thickness is, the smaller the error of the SSA solution caused by the error of radiation data. Under the condition of $0.55 \mu\text{m}$ -wavelength aerosol optical thickness being larger than 0.312 , the errors of SSA solutions are within ± 0.0149 and ± 0.0317 if radiation data errors are within $\pm 2\%$ and $\pm 4\%$, respectively.

Key words broadband diffuse radiation method, radiation-weighted mean single scattering albedo, retrieval error

1 引言

在诸多影响气候变化的因子中,气溶胶是一个很重要、但又很不确定的影响因子。由于气溶胶在气候变化中的重要作用,有关气溶胶的研究近年来受到高度重视,气溶胶的辐射特性及其辐射强迫与气候效应是当前大气科学的研究热点之一^[1~7]。气溶胶的辐射强迫问题至今并未得到很好解决。主要原因之一在于缺乏气溶胶物理化学特性与光学特性的可靠、系统资料。正如 Penner 等^[8]指出的,在众多影响气溶胶辐射强迫评估的因子中,气溶胶吸收信息的缺乏是导致该评估不确定的一个重要因素。此外, Kaufman 等^[9]的研究表明,气溶胶吸收的不确定也是空间对地遥感大气订正研究中的主要问题之一。气溶胶的一次散射反照率 (Single Scattering Albedo, 简称 SSA) 是表征气溶胶吸收特性的一个关键参数,主要取决于气溶胶折射率虚部 (Aerosol Imaginary Part, 简称 AIP)。因此,丰富 AIP 和 SSA 信息对气溶胶辐射气候效应、空间对地遥感的大气订正等研究有重要意义。

在探测 AIP 和 SSA 的现有方法中,被动式遥感是重要的一类,它通常应用太阳短波大气散射信息来反演 AIP 和 SSA,主要方法包括漫射法^[10~13]和天空亮度法^[14~16]。

反演 AIP 的光谱漫射法由 Herman 等^[10]于 1975 年提出,它依据地面上向下的太阳漫射通量对气溶胶谱分布和折射率实部不敏感、而对 AIP 较敏感的特性,从该漫射信息反演 AIP。

世界上有大量的气象台站进行长期、常规的宽带太阳辐射观测。尉东胶和邱金桓^[17]通过敏感性分析指出,地面上向下的宽带太阳漫辐射通量对 AIP 的变化较敏感,而对粒子谱分布、气溶胶折射率实部、地表反射率、大气中水汽和臭氧含量的变化较不敏感。基于这一特性,尉东胶和邱金桓^[18]

提出从该漫射信息反演 AIP 的一个方法,并进行了初步的对比实验验证。

邱金桓等^[19]进一步发展了反演 AIP 的宽带漫射法,综合应用气象台站探测的太阳直接辐射和总辐射资料及其气溶胶光学厚度的反演结果,求得太阳宽带漫射值,从中反演 $1 \mu\text{m}$ 波长的 AIP 和 SSA,并提出了一套有关参数的输入方法。AERO-NET (Aerosol Robotic Network) 的探测结果表明^[20],气溶胶的 SSA 与波长密切相关,通常随波长的变大而变小。在辐射强迫研究中,需要计算大气中太阳短波辐射通量场。因此,如果存在一个波长无关的平均 SSA,它适用于计算太阳短波辐射通量,并有一种方法可从宽带的漫射信息可靠反演该 SSA,这一反演方法是有意义的。基于这一考虑,本文致力于探索这一平均的 SSA 及其反演方法,主要贡献有如下几个方面:

(1) 引入了辐射加权平均的宽带气溶胶 SSA 和 Ångström 指数 (简称 ÅI) 的定义,并通过模拟计算检验了应用该 SSA 计算太阳短波辐射反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的精度;

(2) 发展了一个从宽带的漫射信息反演辐射加权平均的 SSA 的方法;

(3) 通过模拟反演分析了辐射加权平均的 SSA 的反演精度及其主要误差因子。

2 辐射加权平均的气溶胶 SSA 和 Ångström 指数

本节先引入辐射加权平均的宽带 SSA 和 ÅI 的定义,再通过数值模拟检验应用该 SSA 计算太阳短波辐射的反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的精度。

2.1 太阳辐射加权平均的气溶胶 SSA 和 ÅI 的定义

地面上太阳辐射的漫射透过率 (T_{Dif}) 和总透过率 (T_{Tot})、大气上界的反射率 (R) 和整个大气

的吸收率 (A) 可表示为:

$$T_{\text{Dif}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F^{\downarrow}(\lambda, \mu_0) d\lambda}{\mu_0 F_0}, \quad (1)$$

$$T_{\text{Tot}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F^{\downarrow}(\lambda, \mu_0) d\lambda + \mu_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) \exp[-\tau_{\text{Tot}}(\lambda) m(\mu_0)] d\lambda}{\mu_0 F_0}, \quad (2)$$

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F^{\uparrow}(\lambda, \mu_0) d\lambda}{\mu_0 F_0}, \quad (3)$$

$$F_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

$$A = 1 - R - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F^{\downarrow}(\lambda, \mu_0) [1 - A_s(\lambda)] d\lambda / \mu_0 F_0, \quad (5)$$

其中, λ 为波长, μ_0 为太阳天顶角余弦, $F^{\uparrow}$ 为 λ 波长向上的太阳辐射通量, $F^{\downarrow}$ 为向下的辐射通量, λ_1 和 λ_2 分别为太阳光谱的波长下限和上限, τ_{Tot} 为大气的总光学厚度, $m(\mu_0)$ 为大气质量, $S_0(\lambda)$ 为大气上界的太阳光谱辐照度, A_s 是 λ 波长的地表反照率, F_0 为太阳常数。98% 以上的太阳辐射能量集中在 $0.3 \sim 4 \mu\text{m}$ 波长范围内^[21], 地面上太阳直接辐射、散射辐射与总辐射观测仪器的光谱响应范围通常为 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ (或 $4 \mu\text{m}$) 波长。因此, 在后面的计算中, 本文取 $\lambda_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 3 \mu\text{m}$ 。

Dubovik 等^[20] 依据 AERONET 探测结果指出, 气溶胶的 SSA 密切依赖于波长, 通常随波长增大而变小, 但对沙尘气溶胶, SSA 反而随波长增大而变大。硫酸盐、沙尘和碳气溶胶是大气气溶胶的三个主要成分, 折射率虚部都随波长变化 (包括在可见波长范围内)^[22]。正如后文分析的, 即使气溶胶折射率不随波长变化, 由 Mie 散射计算的 SSA 也与波长密切相关。70% 以上的太阳能量集中在 $0.35 \sim 1 \mu\text{m}$ 的光谱范围内^[21]。对无大气强吸收的波长, 太阳谱辐射强度越大, 它对地面向下和大气上界向上的太阳短波 ($0.3 \sim 4 \mu\text{m}$ 波长范围内) 辐射的贡献一般越大, 该波长的气溶胶辐射特性对宽带太阳辐射的影响一般也越强。基于这一特性, 本文引入太阳辐射加权平均的气溶胶 SSA 和 ÅI 如下:

$$\omega_{a, \text{mean}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_{2, \text{Mean}}} S_0(\lambda) \omega_{a, \lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_{2, \text{Mean}}} S_0(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

$$\alpha_{a, \text{mean}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_{2, \text{Mean}}} S_0(\lambda) \alpha_{a, \lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_{2, \text{Mean}}} S_0(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

其中, $\omega_{a, \lambda}$ 和 $\alpha_{a, \lambda}$ 分别为 λ 波长气溶胶的 SSA 和 ÅI, $\lambda_{2, \text{Mean}}$ 为用于计算辐射加权平均的 SSA 和 ÅI 所选用的长波端的波长。太阳能量的一半所对应的波长约为 $0.73 \mu\text{m}$ 。在晴天无云条件下, 由于两方面的原因, 地面上向下的漫射通量和大气上界的反射通量会明显移向短波方向。一个原因是: 大气光学厚度通常是随波长变大而变小, 而当大气光学厚度较小时, 漫射通量是随光学厚度增大而变大, 导致漫射通量一半所对应的波长移向短波方向, 一般明显小于 $0.73 \mu\text{m}$ 。另一方面, 在大于 $1 \mu\text{m}$ (特别是大于 $1.3 \mu\text{m}$) 的长波方向, 存在众多水汽、 CO_2 等大气微量气体强吸收带^[21], 使得大于 $1 \mu\text{m}$ 波长的辐射对 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ 波长的宽带漫射通量的贡献比较小。由于这两个原因, 如果选取 $\lambda_{2, \text{Mean}} = 3 \mu\text{m}$, 当真实的 SSA 是随波长增大而变小时, 采用加权平均的 SSA 会导致所计算的宽带太阳辐射透过率和反射率偏小; 反之, 当 SSA 是随波长增大而变大时, 所计算的透过率和反射率会偏大。因此, 合理选取 $\lambda_{2, \text{Mean}}$ 是重要的。后面的数值模拟表明, $\lambda_{2, \text{Mean}}$ 值可在 $1 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 之间选取。在本文, 若不另作说明, 均取 $\lambda_{2, \text{Mean}} = 1.3 \mu\text{m}$ 用于计算辐射加权平均的 SSA 和 Ångström 指数。

图 1 表示在 Lenoble^[22] 论述的大陆性与都市工业污染气溶胶模式下 SSA 随波长的变化。在这两个模式中, 三个气溶胶成分的谱分布按细粒子、粗粒子和碳粒子分类, 均为对数正态分布, 对大陆性气溶胶, 体积百分比为 29%、70% 和 1%, 对都市工业污染气溶胶, 体积百分比为 61%、17% 和 22%。在

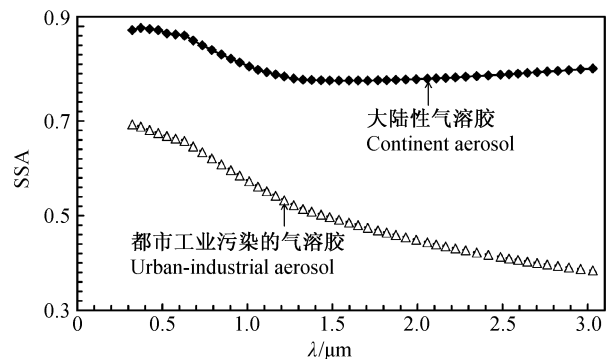


图 1 在大陆性与都市工业污染气溶胶模式下气溶胶一次散射反照率随波长的变化

Fig. 1 Single Scatter Albedo (SSA) vs. wavelength (λ) for continent (SSA range: 0.785–0.898; broadband SSA: 0.868) and urban-industrial (SSA range: 0.384–0.694; broadband SSA: 0.632) aerosols

0.3~1.3 μm 波长范围内,三个气溶胶成分的折射率采用水溶性、沙尘和碳粒子折射率,对大于1.3 μm 波长的折射率采用1.3 μm 波长的数据。如图1所示,SSA 密切依赖于波长,在0.3~2 μm 波长范围内,SSA 随波长增大呈明显变小的趋势。对大陆性气溶胶,最大和最小 SSA 分别为0.896 和0.785 (0.3~3 μm 范围内),辐射加权平均的 SSA 为0.868。对都市工业污染气溶胶,SSA 在0.384~0.694 之间变化,辐射加权平均的 SSA 为0.632。

图2表示在Junge 气溶胶谱分布以及 AIP 为0.01 (对所有波长) 条件下 SSA 随波长的变化,如图所示,SSA 随波长的变化特性与气溶胶谱分布有关。对 Ångström 指数 $\alpha=2$ 的 Junge 谱,SSA 随波长的增大明显变小,对 $\alpha=0$ 的 Junge 谱,SSA 随波长的增大反而明显变大。AERONET 探测结果也表明^[20],对 α 接近于零的沙尘气溶胶,SSA 随波长的增大而变大。因此,在气溶胶辐射强迫计算中,不仅要考虑 SSA 的波长特性,还要考虑气溶胶谱分布对 SSA 特性的影响。如果本文定义的辐射加权平均的 SSA 适用于辐射强迫计算,这对于简

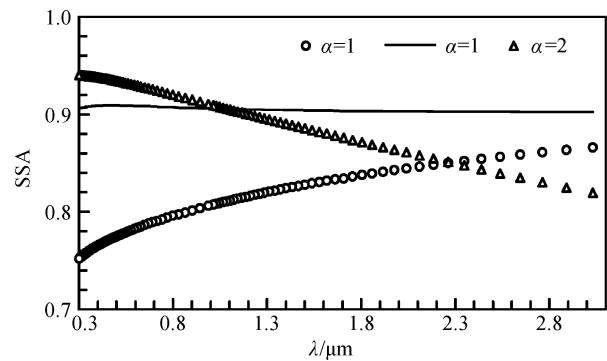


图2 在Junge 气溶胶谱分布以及折射率虚部为0.01 条件下一次散射反照率随波长的变化
Fig. 2 SSA vs. wavelength for the Junge-type aerosol (α : Ångström index) and AIP = 0.01 (AIP: Aerosol Imaginary Part, i. e., imaginary part of aerosol refractive index)

表1 在Junge 气溶胶谱分布条件下应用辐射加权平均的 SSA 计算宽带太阳辐射的输入参数

Table 1 Input parameters for broadband solar reflectance, diffuse transmittance, total transmittance and absorption calculations using the radiation-weighted mean SSA in the Junge aerosol case

地表反照率 Surface albedo	气溶胶折射率虚部 Imaginary part of aerosol refractive index (AIP)		总模拟组数 Total simulation number
μ_0	α	$\tau_a(0.55 \mu\text{m})$	
如图3所示 As shown in Fig. 3	1.0, 0.8, 0.5, 0.3	0, 1, 2	2160
		0.005, 0.1, 0.015, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08	
		0.02, 0.1, 0.2, 0.312, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2	

化 SSA 的选择问题是有意义的。

2.2 辐射加权平均的 SSA 对计算宽带太阳辐射通量的精度检验

精度检验采用两类气溶胶模式,一类为 Junge 谱,另一类为 Lenoble 的大陆性和都市工业污染气溶胶模式^[22]。Junge 谱分布可表示为

$$n(r) = cr^{-(v^*+1)}, \quad (8)$$

其中, r 为粒子半径, v^* 为 Junge 谱指数,它与气溶胶 Ångström 指数 α 的关系为

$$\alpha = v^* - 2. \quad (9)$$

在 Junge 谱分布情形下,用于精度检验的输入参数如表1和图3所示。如表1所示,太阳天顶角余弦取4个值,在1~0.3 之间变化,AIP 取10个值,在0~0.08 之间变化,0.55 μm 波长气溶胶光学厚度取9个值,在0.02~2 之间变化,ÅI(α) 取0、1和2三个值,覆盖通常的气溶胶光学特性条件。如图3所示,输入的地表反射率采用北京气象观测站2001年8月和12月7通道月平均的MODIS产品^[23, 24],应用该7通道的地表反射率所计算的宽带辐射视为正确值,计算中该7通道没有覆盖的光谱反射率通过插值求得。总共有2160组辐射

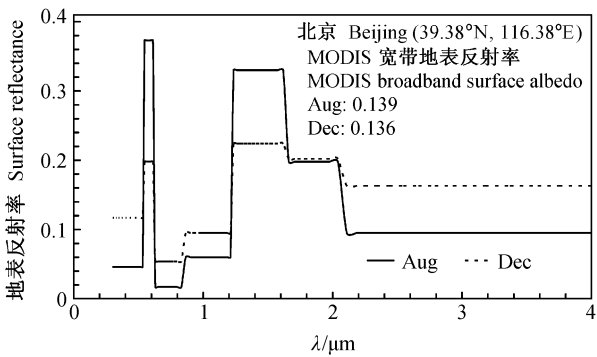


图3 北京2001年8月和12月MODIS月平均的7通道和宽带地表反照率

Fig. 3 Monthly-mean seven-band and broadband MODIS surface albedo products over Beijing site (39.38°N, 116.38°E) in 2001

计算, 表 2 给出它们的相对与绝对标准误差、最大的相对与绝对误差。对漫射透过率, 绝对和相对标准误差分别定义为

$$\epsilon_{Ab} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{Dif}^i - T_{Dif, True}^i)^2 / N}, \quad (10)$$

$$\epsilon_{Re} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (1 - T_{Dif}^i / T_{Dif, True}^i)^2 / N}, \quad (11)$$

上式中, $T_{Dif, True}$ 为与波长有关的气溶胶 SSA 计算的正确的漫射透过率, T_{Dif} 为用辐射加权平均的 SSA 计算的漫射透过率, N 为总计算组数。总透过率、反射率和吸收率的标准差由类似的公式定义。在本文所有的辐射计算中, 采用 DISORT 算法和 1976 美国标准大气^[25, 26]; 当 $\lambda < 1 \mu\text{m}$ 时波数步长为 40 cm^{-1} , 当 $\lambda > 1 \mu\text{m}$ 时步长为 120 cm^{-1} ; 大气分为 8 层, 第一层为 7 km 高度以上的大气, 0~7 km 高

表 2 在 Junge 气溶胶谱分布条件下应用辐射加权平均的 SSA 计算宽带太阳辐射的误差

Table 2 Maximum and standard errors of broadband solar reflectance, diffuse transmittance, total transmittance and absorption calculations using the radiation-weighted mean SSA in the Junge aerosol case

	漫射透过率		总透过率	
	反射率	Diffuse	Total	吸收率
	Reflectance	transmittance	transmittance	Absorption
ϵ_{Re}	0.773	1.107	0.468	0.859
$\delta_{Re, Max}$	2.742	6.068	3.629	2.736
ϵ_{Ab}	0.00123	0.00194	0.00194	0.00287
$\delta_{Ab, Max}$	0.0044	0.0059	0.0059	0.0087

注: ϵ_{Re} : 相对标准误差(%); $\delta_{Re, Max}$: 最大相对误差(%); ϵ_{Ab} : 绝对标准误差; $\delta_{Ab, Max}$: 最大绝对误差。

Note: ϵ_{Re} : relative standard error (%); $\delta_{Re, Max}$: maximum relative errors (%); ϵ_{Ab} : absolute standard error; $\delta_{Ab, Max}$: maximum absolute error.

表 3 在大陆性与都市工业污染气溶胶模式下应用辐射加权平均的 SSA 计算宽带太阳辐射的误差

Table 3 Maximum and standard errors of solar reflectance, diffuse transmittance, total transmittance and absorption calculations using the radiation-weighted mean SSA in two case of continent and urban-industrial aerosols

	大陆性气溶胶 Continent aerosol				都市工业污染气溶胶 Urban-industrial aerosol			
	R	T_{Dif}	T_{Tot}	A	R	T_{Dif}	T_{Tot}	A
ϵ_{Re}	1.259	1.123	0.526	1.490	0.764	2.047	1.116	0.810
$\delta_{Re, Max}$	2.814	1.643	0.937	2.514	1.361	6.711	5.106	1.320
ϵ_{Ab}	0.00216	0.00286	0.00285	0.00475	0.00105	0.00242	0.00240	0.00308
$\delta_{Ab, Max}$	0.0043	0.0053	0.0053	0.0085	0.0027	0.0060	0.0060	0.0075

度范围内分为 7 层, 步长为 1 km; 采用指数衰减的气溶胶消光系数高度分布, 其标准高度取为 2.04 km。

下面, 从图 4、表 2 和表 3 分析应用本文定义的辐射加权平均的 SSA 所计算的反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的精度。

图 4 表示采用不同的长波端波长 ($\lambda_{2, Mean}$) 时, 2160 组太阳短波辐射反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率计算的相对标准差。当 $\lambda_{2, Mean} = 3 \mu\text{m}$ 时, 误差较大; 当 $\lambda_{2, Mean}$ 在 $1 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 之间变化时, 所有的标准差都不大于 1.191%; 当 $\lambda_{2, Mean} = 1.3 \mu\text{m}$ 时, 透过率的计算精度较高; $\lambda_{2, Mean} = 1.1 \mu\text{m}$ 时吸收率的计算精度稍优。本文选取 $\lambda_{2, Mean} = 1.3 \mu\text{m}$, 用于后面所有的辐射计算与 SSA 反演模拟。

表 2 表示在选取 $\lambda_{2, Mean} = 1.3 \mu\text{m}$ 的 2160 组模

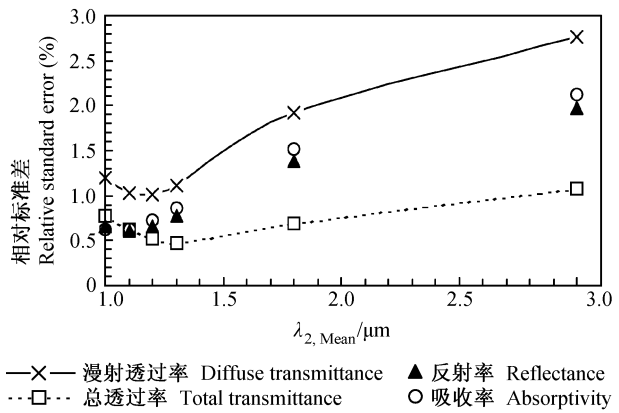


图 4 采用不同长波端波长所确定的辐射加权平均 SSA 时, 2160 组宽带太阳辐射反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的相对标准差。

Fig. 4 Relative standard errors among 2160 sets of broadband solar reflectance, diffuse transmittance, total transmittance and absorption calculations using the radiation-weighted mean SSA ($\lambda_{2, Mean}$: Calculated long-end wavelength for broadband SSA)

拟中,应用辐射加权平均的 SSA 所计算的太阳辐射反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的最大误差和标准差。由于太阳的直射辐射与 SSA 无关,漫射透过率和总透过率的绝对误差是一样的。在 Junge 气溶胶谱分布条件下,应用辐射加权平均 SSA 所计算的宽带太阳反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的相对标准偏差均在 1.107% 以内,绝对标准偏差在 0.00287 以内。

表 3 为大陆性和都市工业污染气溶胶模式^[22]下应用辐射加权平均的 SSA 计算太阳辐射反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的最大误差和标准差。地表反照率、 μ_0 和 0.55 μm 波长气溶胶光学厚度的输入参数同表 1,对每一个气溶胶模式,都有 72 组模拟计算。如表 3 所示,对两类气溶胶模式,反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的最大相对误差都在 6.711% 以内,最大绝对误差不大于 0.0085,相对标准差都在 2.047% 以内,绝对标准差都在 0.0075 以内。

3 一次散射反照率反演方法

在晴天大气条件下,宽带漫射通量依赖于与波长有关的气溶胶与分子的光学厚度、散射相函数、SSA 和地表反射率。在气溶胶谱分布和折射率已知的条件下,气溶胶的散射相函数和 SSA 可通过 Mie 散射计算求之。短波太阳漫射通量对气溶胶折射率实部的敏感性较弱,要从宽带漫射通量反演 SSA,关键是要解决输入与波长有关的光学厚度的问题。一个有效的途径是采用光度计探测的气溶胶光学厚度。另一途径是采用宽带消光法反演得到的气溶胶光学厚度。本文重点研究后一途径,提出一个综合应用宽带太阳直射和漫射信息同时反演气溶胶光学厚度与辐射加权平均 SSA 的方法。在 Junge 谱分布条件下,已知 v^* 值或 Ångström 指数 α 值,采用宽带消光法^[27, 28],从太阳直射表探测的太阳直接辐射求得宽带气溶胶光学厚度 τ_B 及其相应的等效波长 λ_E 。于是 λ 波长的光学厚度可确定如下:

$$\tau_\lambda = \tau_B (\lambda_E / \lambda)^\alpha. \quad (12)$$

平均而言,等效波长 λ_E 约等于 0.75 μm , α 值的不确定性对 0.75 μm 的光学厚度解的影响相对较弱^[23],但对远离 0.75 μm 波长,由 (12) 式确定的光学厚度可存在较大的误差。大气上界太阳光谱能量的一半所对应的波长约为 0.73 μm 。太阳的直射

辐射总是随光学厚度的增大而变小,而地面上向下的漫射通量则不然,当光学厚度较小时,漫射通量反而随光学厚度的增大而变大。只有当大气光学厚度较大时,漫射通量随光学厚度的增大也变小。因此,在晴天条件下,0.3~3 μm 波长范围内的宽带漫射通量通常包含更多来自较短波长的辐射贡献(相对宽带的太阳直接辐射而言)。数值计算表明,对表 1 所示的 0.1~0.8 变化的气溶胶光学厚度、0~2 变化的 α 值、1~0.3 变化的 μ_0 值,地面上向下的漫射通量占总通量一半所对应的中值波长的平均值为 0.58 μm ,而对太阳直射通量,该中值波长平均值偏向长波,等于 0.78 μm 。在 Junge 谱分布条件下,只要 α 值和某一波长的光学厚度已知,其他波长的光学厚度可确定。问题是如何选择该波长,使得宽带漫射法的 SSA 解对 α 值不确定的敏感性较弱。本文称该波长为参考波长 λ_R ,已知其光学厚度 τ_R ,其他波长的光学厚度可确定如下:

$$\tau_\lambda = \tau_R (\lambda_R / \lambda)^\alpha. \quad (13)$$

基于上面分析的漫射通量对气溶胶光学厚度的依赖特性,参考波长应当小于 0.75 μm 。本文选取 0.55 μm 作为参考波长,用于宽带漫射法反演 SSA 的算法,具体的步骤分为:

(1) 依据气溶胶光学特性的通常变化范围,选取不同的 ÅI、AIP 和 τ_R 值,通过 Mie 散射计算,建立一个 0.3~1.3 μm 波长范围内辐射加权平均的 SSA 库,通过辐射传输计算建立一个 0.3~3 μm 波长范围内宽带的漫射辐射库。

(2) 假设一 α 值,采用宽带消光法,从太阳直射表探测的太阳直接辐射反演得到宽带气溶胶光学厚度 τ_B 及其相对应的等效波长 λ_E 。于是参考波长 λ_R 的光学厚度可确定如下:

$$\tau_R = \tau_B (\lambda_E / \lambda_R)^\alpha. \quad (14)$$

正如后面的模拟反演所表明的,如果输入较准确的 Ångström 指数 α 值,可改善光学厚度的反演结果,进而提高 SSA 解的精度。

(3) 应用漫射辐射库和上式确定的 τ_R 值,通过二项式拟合,求得等于宽带漫射通量真值(实际反演应用中应为观测值)所对应的 AIP,并视为 AIP 解。如果该真值大于 AIP 为零的漫射通量计算值, AIP 解取为零。

(4) 应用第一步建立的辐射加权平均的 SSA 库,确定与该 AIP 解和所假设的 Ångström 指数 α

值相对应的辐射加权平均的 SSA, 并视为它的解。

本文在建立辐射加权平均的 SSA 库和 $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$ 波长范围内宽带漫辐射库中, 有关参数选取如下: (1) AIP 取 0, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.08 共 10 个值; (2) α 值在 $0 \sim 2$ 之间变化, 步长为 0.2, 共 11 个值; (3) $\tau_a(0.55 \mu\text{m})$ 值取 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0; (4) 气溶胶折射率实部取 1.5。

本反演算法基于 Junge 气溶胶谱分布的假设, 但正如后面的反演模拟结果所表明的, 它也适用于非 Junge 谱的情形。

4 数值模拟反演结果及误差分析

分析影响宽带漫射的主要参数以及本反演方法所引入的假设, SSA 反演的主要误差因子为: (1) 气溶胶 Ångström 指数和光学厚度的不确定; (2) 宽带地表反照率的假设及其误差; (3) 辐射资料的误差; (4) 大气柱水汽和臭氧总量的误差。大气柱水汽和臭氧总量的误差对 SSA 反演结果的影响相对较弱^[19]。本文通过数值模拟主要分析前三个误差因子对 SSA 反演结果的影响。

4.1 气溶胶 Ångström 指数和光学厚度解的不确定性对 SSA 解的影响

宽带的太阳直接辐射和漫射辐射都与气溶胶谱分布和光学厚度密切相关。下面依据图 5、图 6 和表 4 分析气溶胶谱分布和光学厚度的不确定对 SSA 解的影响。在反演中, 地表反照率采用图 3 所示的宽带 MODIS 结果。

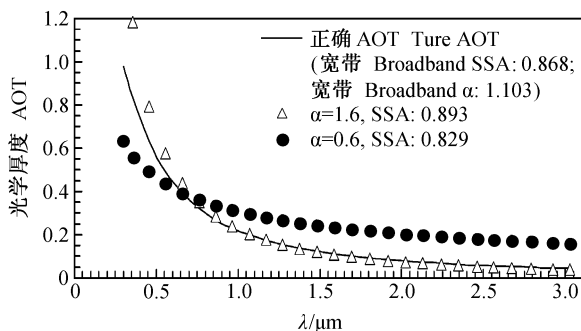


图 5 在大陆性气溶胶、 $\mu_0=0.5$ 、 $0.55 \mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度为 0.5 情形下, 选取 α 分别为 0.6 和 1.6 时气溶胶光学厚度 (AOT) 解及相应的 SSA 解

Fig. 5 Aerosol optical thickness (AOT) and SSA solutions for the continent aerosol, $\mu_0=0.5$, $\tau_a(0.55 \mu\text{m})=0.5$, and two Ångström index selections of $\alpha=0.6$ and $\alpha=1.6$

图 5 表示在大陆性气溶胶、 $\mu_0=0.5$ 、正确的 $\tau_a(0.55 \mu\text{m})$ 为 0.5 情形下, 选取 Ångström 指数 α 分别为 0.6 和 1.6 时气溶胶光学厚度解及相应的 SSA 解。如图 5 所示, 在 $0.75 \mu\text{m}$ 波长附近气溶胶光学厚度解的误差是较小的; 当取 α 为 0.6 (比辐射加权平均的 α 值偏小约 0.5) 时, 在大于 $0.75 \mu\text{m}$ 的长波方向, 光学厚度解系统偏大, 波长越大, 偏大越多, 在小于 $0.6 \mu\text{m}$ 短波方向, 光学厚度解偏小, 波长越短, 偏小越多; 当取 α 为 1.6 (比辐射加权平均 α 值偏大约 0.5) 时, 情形相反, 在长波方向, 光学厚度解偏小, 而在短波方向, 解明显偏小。当取 α 为 0.6 时, SSA 解为 0.829, 比辐射加权平均的 SSA 值 (视为真值) 偏小 0.039, 而取 α 为 1.6 时, SSA 解为 0.893, 偏大 0.025。该误差特点可从图 6 定性得以解释。图 6 表示在 $\mu_0=0.3$ 、0.5、1.0 三种情形下 $0.55 \mu\text{m}$ 波长漫射透过率随气溶胶光学厚度的变化。随着气溶胶光学厚度从零变大, 漫射透过率先增大 (特别当光学厚度较小时, 增大很快), 后又变小, 透过率的峰值约在 $0.7 \sim 1.8$ 光学厚度范围内变化, 太阳天顶角余弦越小, 该峰值所对应的光学厚度越小。图 4 所示的 SSA 误差特点主要归因于透过率随光学厚度变化的上述特性。当选取 α 值为 0.6 时, 在大于 $0.75 \mu\text{m}$ 波长的长波方向, 气溶胶光学厚度解系统并明显偏大, 这会引引起所计算的漫射辐射偏大, 它可由减小 SSA 加以补偿, 从而导致偏小的 SSA 解。对 $\alpha=1.6$ 的情形, 在长波方向, 光学厚度解偏小, 会引起所计算的漫射辐射偏小, 在短波方向光学厚度解偏大, 当波长小于 $0.4 \mu\text{m}$ 时, 解已大于 1, 并大于透过率峰值所对应的光学厚度, 也会导致所计算的漫射辐射

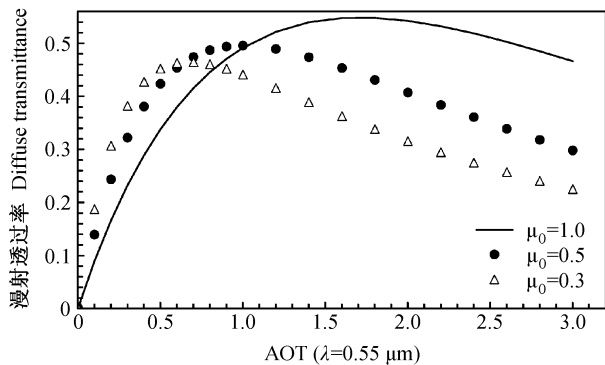


图 6 漫射透过率随气溶胶光学厚度的变化

Fig. 6 Diffuse transmittance vs. $0.55 \mu\text{m}$ aerosol optical depth (μ_0 : solar zenith angle cosine)

表 4 在大陆性气溶胶情形下选取不同的 ÅI 值时 SSA 解的误差
Table 4 SSA-retrieval errors for continent aerosol, 7 sets of deviations of the assumed Ångström index

$\tau_a(0.55 \mu\text{m})$	ÅI 值的偏差 ÅI deviation						
	-0.4	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.4
0.2	-0.0808	-0.0688	-0.0621	-0.0559	-0.0552	-0.0495	-0.0381
0.3	-0.0538	-0.0418	-0.0351	-0.0284	-0.0277	-0.0218	-0.0097
0.5	-0.0327	-0.0207	-0.0144	-0.0067	-0.0060	0.0007	0.0139
1	-0.0216	-0.0066	0.0012	0.0098	0.0107	0.0182	0.0356
2	-0.0312	-0.0105	0.0006	0.0120	0.0131	0.0230	0.0455

偏小,从而导致偏大的 SSA 解。

表 4 表示在大陆性气溶胶情形下,选取不同的 ÅI 值时 SSA 解的误差,表中第一行数值为所选取的 ÅI 值对辐射加权平均的 ÅI 值的偏差。在这组反演模拟中, $\mu_0=0.5$, 正确的地表反射率为图 3 所示的北京 8 月 MODIS 结果, $0.55 \mu\text{m}$ 波长的光学厚度取 0.2、0.3、0.5、1 和 2。光学厚度越大, SSA 解的误差一般越小。如果 ÅI 偏差在 ± 0.2 以内,对 $0.55 \mu\text{m}$ 波长气溶胶光学厚度大于 0.3 的大陆性气溶胶, SSA 的误差在 ± 0.0418 以内,如果 $0.55 \mu\text{m}$ 波长的光学厚度为 0.2,最大的误差可达 0.0688。当气溶胶光学厚度较小时,采用本方法所反演得到的 SSA 可能存在较大的误差。此外, ÅI 值的偏差为零时, SSA 解仍存在误差,特别是 $0.55 \mu\text{m}$ 波长的光学厚度为 0.2 时,误差可达 0.0559,但该光学厚度大于 0.3 时,误差在 ± 0.0284 以内。本方法是基于 Junge 谱分布的假设,而大陆性气溶胶的三个成分均为对数正态分布,这是引起该 SSA 误差的一个原因。

4.2 地表反照率不确定性对气溶胶折射率虚部和一次散射反照率解的影响

地表光谱反射率与波长密切相关,地表反照率月、季、年变化一般也是明显的。因此,数值反演模拟不仅要考虑采用宽带(不随波长变化)地表反照率假设可能引起的误差,也要考虑该反照率确定误差对反演结果的影响。模拟中地表反射率输入资料采用图 3 所示的北京气象观测站 8 月份 MODIS 产品,其中 7 个光谱通道 ($0.459\sim 0.479 \mu\text{m}$ 、 $0.545\sim 0.565 \mu\text{m}$ 、 $0.62\sim 0.67 \mu\text{m}$ 、 $0.841\sim 0.876 \mu\text{m}$ 、 $1.23\sim 1.25 \mu\text{m}$ 、 $1.628\sim 1.652 \mu\text{m}$ 和 $2.1\sim 5.0 \mu\text{m}$) 的地表反射率分别为 0.017、0.060、0.046、0.373、

0.330、0.198 和 0.095, $0.3\sim 5.0 \mu\text{m}$ 波长范围内宽带地表反照率值为 0.139。应用该 7 通道的地表反射率所计算的宽带漫辐射视为正确值。图 7 表示在模拟中采用正确的宽带地表反照率、该反照率加 0.05 和 0.1 三种选择时 AIP 和 SSA 的反演误差。在这些模拟中,正确的气溶胶谱分布为 $\nu^*=3$ 的 Junge 谱、AIP 为 0.01、辐射加权平均的 SSA 为 0.907, $\mu_0=0.5$ 。SSA 误差指 SSA 解对 0.907 的偏差。如图 7a 所示,当宽带的地表反照率用于反演时,对气溶胶光学厚度从 0.1~2.0 之间变化, AIP 解系统偏大,误差在 0.0004~0.0032 之间变化, SSA 解系统偏小,误差在 $-0.0153\sim -0.002$ 之间变化。光学厚度越小,误差越大。当光学厚度大于 0.312 时, SSA 解的误差小于 0.0066。采用宽带的地表反照率用于 AIP 和 SSA 反演是可行的。如图 7b 所示,如果宽带反照率值存在 0.05 偏差, SSA 解的误差在 $-0.0046\sim -0.0341$ 之间变化,如果光学厚度大于 0.312, SSA 误差小于 0.015,解是合理的。如图 7c 所示,如果宽带反照率值存在 0.1 偏差, SSA 解的最大误差可达 0.0534,选择较精确的宽带地表反照率对改善 SSA 解的精度是重要的。

4.3 辐射观测误差的效应

根据 1980 年 WMO 的要求,气象台站应用的一级太阳总辐射表的标定精度为 5%,一年内的精度为 7%^[29]。对地面辐射基准站,现在 WMO 要求散射辐射(即漫辐射)的观测精度为 2%。图 8 表示散射辐射的观测误差为 $\pm 10\%$ 、 $\pm 8\%$ 、 $\pm 6\%$ 、 $\pm 4\%$ 、 $\pm 2\%$ 、0 等 11 种情形下 SSA 解的误差。在反演模拟中,正确的气溶胶谱分布为 $\nu^*=3$ 的 Junge 谱、AIP 为 0.01、辐射加权平均的 SSA 为

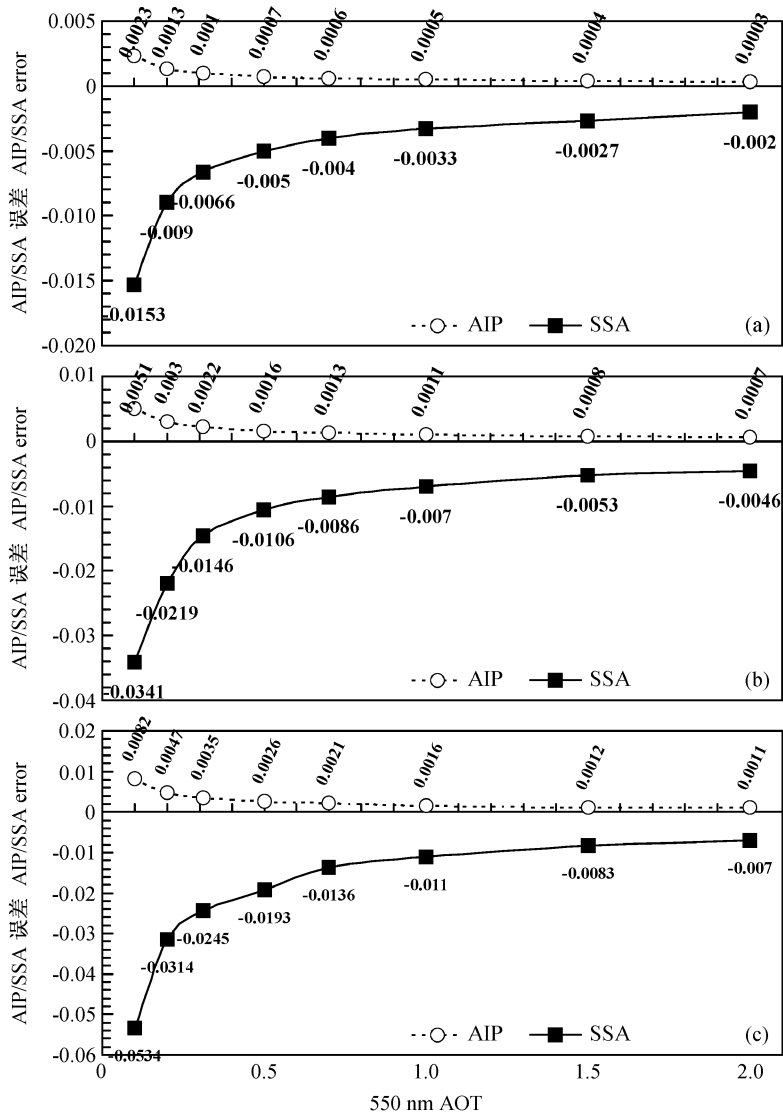


图 7 在反演模拟中输入宽带地表反照率 (a)、该反照率加 0.05 (b) 和 0.1 (c) 三组地表反照率时 AIP 和 SSA 解的误差
Fig. 7 Deviations of SSA and AIP solutions inputting three sets of surface albedoes, i. e., broadband albedo (a), the albedo plus 0.05 (b) and 0.1 (c)

0.908, 太阳天顶角余弦为 0.5、 $\tau_a(0.55 \mu\text{m})$ 值分别为 0.312 和 1.0。如图 8 所示, 对 $\tau_a(0.55 \mu\text{m}) = 0.312$ 的情形, 如果辐射的观测误差分别为 -2% 和 2% , SSA 的反演误差分别为 -0.0149 和 0.0136 , 两组 SSA 解平均值的误差为 -0.0013 。如果辐射误差为随机误差, 平均的 SSA 解可具有很高的精度。如果观测误差为 $\pm 8\%$, SSA 解的误差可高达 0.0638 。对 $\tau_a(0.55 \mu\text{m}) = 1.0$ 的情形, 辐射误差所导致的 AIP 与 SSA 解的误差明显小于 $\tau_a(0.55 \mu\text{m}) = 0.312$ 的情形, 如果辐射观测误差在 $\pm 2\%$ 内, SSA 的反演误差在 ± 0.0083 内。从图 8 可以看出, 如果

$\tau_a(0.55 \mu\text{m}) > 0.312$, 而辐射误差在 $\pm 2\%$ 范围内变化, SSA 解的误差在 ± 0.0149 以内; 辐射误差在 $\pm 4\%$ 内, SSA 解的误差在 ± 0.0317 以内。

5 结论

在辐射强迫研究中, 需要计算宽带的太阳短波大气辐射通量场。与波长有关的气溶胶一次散射反照率 (SSA) 是影响该辐射特性的一个重要参数, 而现在 SSA 资料的缺乏又是导致气溶胶辐射强迫评估不确定的重要因子之一。世界上有许多气象台站长期进行宽带的太阳散射辐射 (即漫辐射) 观

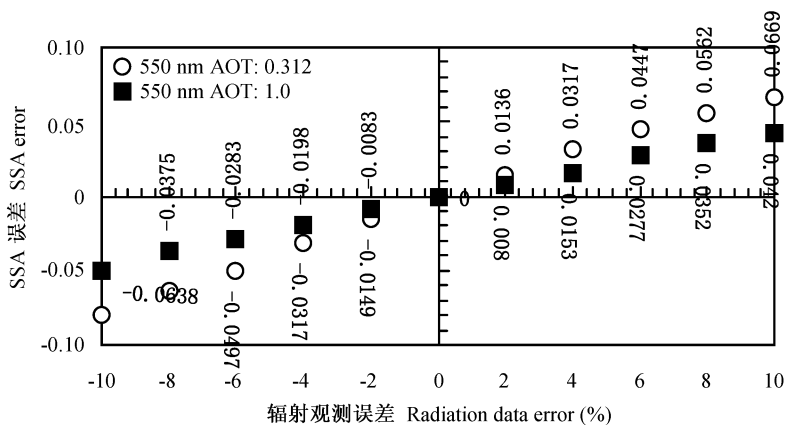


图 8 漫辐射资料误差所导致的一次散射反照率的反演误差

Fig. 8 Deviations of SSA solutions caused by the radiation data errors

测。如果存在一个与波长无关的平均 SSA, 它适用于气溶胶辐射强迫计算, 且有一种方法可从气象台站观测的宽带漫射信息可靠反演该 SSA, 这一反演方法是有重要应用价值的。基于这一考虑, 本文致力于探索这一平均的 SSA 及其反演方法, 引入辐射加权平均的 SSA 和 Ångström 指数的定义, 发展了一个从宽带的漫射信息反演该 SSA 的方法。数值模拟结果表明, 在 Junge 气溶胶谱分布情形下, 对通常的气溶胶光学厚度、Ångström 指数与气溶胶虚部变化范围, 应用本文引入辐射加权平均的气溶胶 SSA 所计算的 2160 组宽带太阳辐射反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率的相对标准误差都在 1.107% 以内; 绝对标准差在 0.00287 以内。对非 Junge 的大陆性和都市工业污染气溶胶模式 (由水溶性、沙尘和碳粒子组成), 在 72 组反射率、漫射透过率、总透过率和吸收率计算中, 相对标准差都在 2.047% 以内, 绝对标准差在 0.0075 以内。

要从宽带太阳漫射通量反演 SSA, 关键问题是要合适输入与波长有关的光学厚度。一个有效的途径是采用光度计探测的气溶胶光学厚度, 另一途径是采用宽带消光法反演得到的气溶胶光学厚度。本文重点研究后一途径, 在 Junge 气溶胶假设下, 提出了一个综合应用宽带太阳直射和漫射信息同时反演气溶胶光学厚度与辐射加权平均 SSA 的方法, 并通过模拟反演分析了 SSA 反演的 3 个主要误差因子: (1) 气溶胶 Ångström 指数和光学厚度的不确定; (2) 宽带地表反照率的假设及其误差; (3) 辐射资料的误差。从反演结果可得出如下几个结论:

(1) 本反演方法基于 Junge 气溶胶假设。只要

较精确地确定气溶胶 Ångström 指数, 本方法也适用于非 Junge 气溶胶的情形。当 Ångström 指数存在误差时, 可导致远离 $0.75 \mu\text{m}$ 波长范围内的气溶胶光学厚度解存在较大误差, 进而引起 SSA 解的误差。如果 Ångström 指数误差在 ± 0.2 以内, 对 $0.55 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度大于 0.3 的非 Junge 大陆性气溶胶, SSA 的误差在 ± 0.0418 以内。

(2) 采用波长无关的宽带地表反照率用于 SSA 反演是可行的。如果该宽带反照率值存在 0.05 偏差, 而气溶胶光学厚度大于 0.312, 则 SSA 误差小于 0.0146。

(3) 气溶胶光学厚度越大, 辐射资料误差所引起的 SSA 解误差越小。如果 $0.55 \mu\text{m}$ 气溶胶光学厚度大于 0.312, 当辐射误差在 $\pm 2\%$ 以内时, SSA 解的误差在 ± 0.0149 以内; 辐射误差在 $\pm 4\%$ 以内, SSA 解的误差在 ± 0.0317 以内。辐射资料的精度是重要的。

参考文献 (References)

- [1] Penner J E, Dickinson R E, O'Neill C A. Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget. *Science*, 1992, **256**: 1432~1434
- [2] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 1992, **255**: 423~430
- [3] Luo Y F, Lü D R, Zhou X J, et al. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D13): 14501~14513
- [4] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, **297**: 2250~2253

- [5] Kaufman Y J, Tanre D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 2002, **419**: 215~222
- [6] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述. *气象学报*, 2002, **60**: 625~634
Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60**: 625~634
- [7] 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展. *大气科学*, 2003, **27**: 628~652
Qiu Jinhuan, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. Modern research progresses in atmospheric physics. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27**: 628~652
- [8] Penner J E, Charlson R J, Schwartz S E, et al. Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1994, **75**: 375~400
- [9] Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, et al. Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16815~16830
- [10] Herman B M, Browning S R, De Luisi J J. Determination of the effective imaginary term of the complex refractive index of atmospheric dust by remote sensing: The diffuse-direct radiation method. *J. Atmos. Sci.*, 1975, **32**: 918~925
- [11] King M D, Herman B M. Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing, Part I: Theory. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 163~173
- [12] King M D. Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing, Part II: Application. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 1072~1083
- [13] 王栋梁, 邱金桓. 塔克拉玛干沙漠春季大气气溶胶光学特性研究. *大气科学*, 1988, **12**: 75~81
Wang Dongliang, Qiu Jinhuan. Aerosol optical properties over Taklimakan desert during spring. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1988, **12**: 75~81
- [14] Qiu Jinhuan, Zhou Xiuj. Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—part I: Theory. *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3**: 162~171
- [15] Nakajima T, Hayasaka T, Higurashi A, et al. Aerosol optical properties in the Iranian region obtained by ground-based solar radiation measurements in the summer of 1991. *J. Appl. Meteor.*, 1996, **35**: 1265~1278
- [16] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 9791~9806
- [17] 尉东胶, 邱金桓. 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法 I: 理论. *大气科学*, 1998, **22**: 677~685
Wei Dongjiao, Qiu Jinhuan. Wide-band method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosol, Part I: Theory. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 193~201
- [18] 尉东胶, 邱金桓. 大气气溶胶折射率虚部的宽谱反演方法 II: 对比实验与应用研究. *大气科学*, 2000, **24**: 145~151
Wei Dongjiao, Qiu Jinhuan. Wide-band method to retrieve the imaginary part of complex refractive index of atmospheric aerosol, Part II: Comparative measurement and application. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2000, **24**: 145~151
- [19] Qiu Jinhuan, Yang Liquan, Zhang Xiaoye. Characteristics of imaginary part and single scattering albedo of urban aerosol in northern China. *Tellus B*, 2004, **56** (2): 276~284
- [20] Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, 2002, **59**: 590~608
- [21] 刘长盛, 刘文保. 大气辐射学. 南京: 南京大学出版社, 1990. 455pp
Liu Changsheng, Liu Wenbao. *Atmosphere Radiation* (in Chinese). Nanjing: Nanjing University Press, 1990. 455pp
- [22] Lenoble J. *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*. Deepak Publishing, 1985. 300pp
- [23] Moody E G, King M D, Platnick S, et al. Spatially complete global spectral surface albedos: Value-added datasets derived from Terra MODIS land products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2005, **43**: 144~158
- [24] Qiu Jinhuan. Cloud optical thickness retrievals from ground-based pyranometer measurements. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111** (in press)
- [25] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W J, et al. Numerically stable algorithm for discrete ordinate method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Opt.*, 1988, **27**: 2502~2509
- [26] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7. Air Force Geophysics Laboratory Tech. Rep. GL-TR-89-0122 (1989), updated and commercialized by Ontar Corporation, 9 Village Way, North Andover, Mass. 01845, 1989
- [27] Qiu Jinhuan. Broadband extinction method to determine atmospheric aerosol optical properties. *Tellus*, 2001, **53B**(1): 72~82
- [28] Qiu Jinhuan. Broadband extinction method to determine aerosol optical depth from accumulated direct solar radiation. *J. Appl. Meteor.*, 2003, **42**: 1611~1625
- [29] WMO. Meteorological aspects of utilization of solar radiation as an energy source. Geneva: Secretariat of WMO, 1981, Techn. Note No. 172, WMO-No. 557