

基于反射太阳光反演气溶胶光学厚度和有效半径

孙贤明 哈恒旭

(山东理工大学电气与工程学院电子信息科学系, 淄博 255049)

(2007 年 12 月 17 日收到 2008 年 1 月 22 日收到修改稿)

根据太阳光的极化特性, 提出了一种利用单波长太阳光遥感反演球形水凝物气溶胶光学厚度和有效半径的方法. 根据矢量辐射传输理论, 利用累加法, 计算了 $\lambda = 0.75 \mu\text{m}$ (可见光) 和 $3.3 \mu\text{m}$ (近红外) 两种波长太阳光入射时气溶胶的反射矩阵. 气溶胶的有效半径为 $0.01\text{--}1.5 \mu\text{m}$, 光学厚度为 $0.05\text{--}1$. 利用计算机模拟了反演过程, 结果表明, 当粒子的有效半径小于 $0.4 \mu\text{m}$ 时可以利用可见光波段进行反演; 当粒子有效半径大于 $1.0 \mu\text{m}$ 时可以利用近红外波段反演; 在 $0.4\text{--}1.0 \mu\text{m}$ 之间, 利用这两个波段均可以得到精确性很高的单一解.

关键词: 光学厚度, 有效半径, 极化, 反演

PACC: 4225B, 9265D, 4110H

1. 引言

根据卫星对反射太阳光的观测来反演气溶胶的光学特性和微物理学性质是一项困难的工作. 在可见光波段, 反射函数主要是光学厚度的函数, 而在近红外波段上, 反射函数主要取决于粒子的尺度, 因此已有的研究方法大多是利用多波长技术来进行反演. 如, 装载在 NOAA 卫星上的 5 通道 ($0.63, 0.86, 3.7, 10.9$ 和 $12 \mu\text{m}$) 高分辨率辐射计 (中分辨率成像光谱辐射计 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS))^[1] 用来在 36 个可见和近红外谱带进行分辨率为 $0.25\text{--}1 \text{ km}$ 的观测, 许多可见和近红外通道已经用于绘制气溶胶光学厚度和尺度的图像. King 等人^[2-4] 提出了利用多波长技术反演云层单次散射反照率、光学厚度以及云滴的有效半径的方法.

然而, 由于气溶胶的有效半径和光学厚度比云层的小很多, 使得对其进行反演更为困难. 利用多波长进行反演时, 会出现多个解. 本文利用太阳光的极

化特性, 根据矢量辐射传输理论, 提出了一种利用单波长反演的方法, 详细地论证了这种方法的可行性. 结果表明, 利用反射的太阳光强结合极化可以单一地确定气溶胶的光学厚度和有效半径.

2. 矢量辐射传输理论

当介质内部无源和不及及粒子间相互作用时, 粒子层反射的辐射强度满足矢量辐射传输方程

$$\begin{aligned} & \cos\theta \frac{d\mathbf{I}(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \phi)}{d\tau} + \mathbf{K}(\tau, \vartheta, \vartheta_0, \phi) \\ &= \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^\pi \mathbf{K}(\tau, \vartheta', \vartheta_0, \phi') \mathbf{Z}(\mu, \phi, \mu', \phi') \sin\vartheta' d\vartheta' \\ &+ \frac{\omega_0}{4\pi} S \mathbf{Z}(\mu, \phi, \mu', \phi') \exp(-\tau \sec\vartheta_0), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 \mathbf{I} 为斯托克斯 (Stokes) 参量, $\mathbf{I} = (I, Q, U, V)$, $\mathbf{Z}(\mu, \phi, \mu', \phi')$ 为相矩阵, ω_0 为粒子层的单次散射反照率. 其中 ϑ_0 表示入射角, ϑ 为观测角, $\phi - \phi'$ 为入射角和观测角的方位角之差. 其中, 相矩阵 $\mathbf{Z}(\mu, \phi, \mu', \phi')$ 为

$$\mathbf{Z}(\mu, \phi, \mu', \phi') = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \cos 2i_1 & -F_{12} \sin 2i_1 & 0 \\ F_{12} \cos 2i_2 & F_{22} \cos 2i_1 \cos 2i_2 & -F_{22} \sin 2i_1 \cos 2i_2 & -F_{34} \sin 2i_2 \\ F_{12} \sin 2i_2 & F_{22} \cos 2i_1 \sin 2i_2 & -F_{22} \sin 2i_1 \sin 2i_2 & F_{34} \cos 2i_2 \\ 0 & -F_{34} \sin 2i_1 & -F_{34} \cos 2i_1 & F_{44} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, F_{ij} 为单次散射矩阵 $F(\theta)$ 的元素; 对于球形粒子

$$F(\theta) = \begin{bmatrix} F_{11}(\theta) & F_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ F_{12}(\theta) & F_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}(\theta) & F_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -F_{34}(\theta) & F_{44}(\theta) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

(2) 式中 i_1 为散射面与包含入射光线 (θ', ϕ') 的子午面之间的夹角, i_2 为散射面与包含出射光线 (θ, ϕ) 的子午面之间的夹角. 由 (2) 式和 (3) 式可见, 相矩阵 $Z(\theta)$ 是由 $F(\theta)$ 旋转得到的.

我们要求的是整个粒子层的上反射, 因此只需要求出 $I(0; \vartheta, \vartheta_0, \phi)$ 或者求出反射矩阵 $R(\mu_0, \mu, \phi)$ 为入射角 ϑ_0 的余弦, μ 为观测角 ϑ 的余弦, ϕ 为方位角)

$$I(\mu_0, \mu, \phi) = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \end{bmatrix} I^*(\mu_0, \mu, \phi), \quad (4)$$

其中, $I(\mu_0, \mu, \phi)$ 为被反射的 Stokes 参量, $I^*(\mu_0) = I_0 \mu_0$ 为被理想朗伯反射体反射的 Stokes 参量. 当太阳光入射时, 由于其非极化性 ($Q = U = V = 0$), 入射的斯托克斯参量 $I_0 = (I_0 \ 0 \ 0 \ 0)$, 因此被反射的太阳光为

$$K(-\mu, \phi) = \mu_0 R_{11} I_0, \quad (5)$$

$$Q(-\mu, \phi) = \mu_0 R_{21} I_0, \quad (6)$$

$$U(-\mu, \phi) = \mu_0 R_{31} I_0, \quad (7)$$

$$V(-\mu, \phi) = \mu_0 R_{41} I_0. \quad (8)$$

矢量辐射传输方程的求解已有很多方法, 如累

加法^[5], 离散坐标法^[6], 迭代法^[7]等. 在本文的计算中, 我们采用累加法. 假设气溶胶粒子的尺寸分布为伽玛 (gamma) 分布:

$$f(r) = \text{const} \times r^{(1-3b)b} \exp\left(-\frac{r}{ab}\right), \quad (9)$$

其中, const 为归一化常数, $a = r_{\text{ef}}$, $b = v_{\text{ef}}$. r_{ef} 为有效半径, v_{ef} 为有效方差, 即

$$r_{\text{ef}} = \frac{\int_0^\infty r \pi r^2 f(r) dr}{\int_0^\infty \pi r^2 f(r) dr}, \quad (10)$$

$$v_{\text{ef}} = \frac{\int_0^\infty (r - r_{\text{ef}})^2 \pi r^2 f(r) dr}{r_{\text{ef}}^2 \int_0^\infty \pi r^2 f(r) dr}. \quad (11)$$

Hansen 等人^[5]的研究发现, 具有相同的有效半径的不同尺寸分布的粒子层具有相近的散射特性.

气溶胶粒子有效半径的典型值在 0.01—1.5 μm 之间, 有效方差近似为 0.2^[8]. 我们利用 Mie 理论计算了具有伽玛分布的球形水凝物气溶胶的单次散射特性, 入射波长为 $\lambda = 0.75 \mu\text{m}$. 图 1(a) 给出了相函数 $F_{11}(r, \theta)$ 随散射角和有效半径变化的等高线图; 图 1(b) 给出了 $F_{21}(r, \theta)$ 随散射角和有效半径变化的等高线图.

从图 1(a) 中可以看出, 相函数的等高线近似垂直, 因此相函数随粒子有效半径的变化很微小. 而从图 1(b) 中可以清楚地看到 F_{21} 对粒子的有效半径非常敏感^[8], 这表明利用太阳光的极化特性区分具有相近微观特性的粒子是可行的.

3. 模拟气溶胶反演

气溶胶的光学厚度 τ_0 在 0.05—1 之间^[8]. 为了

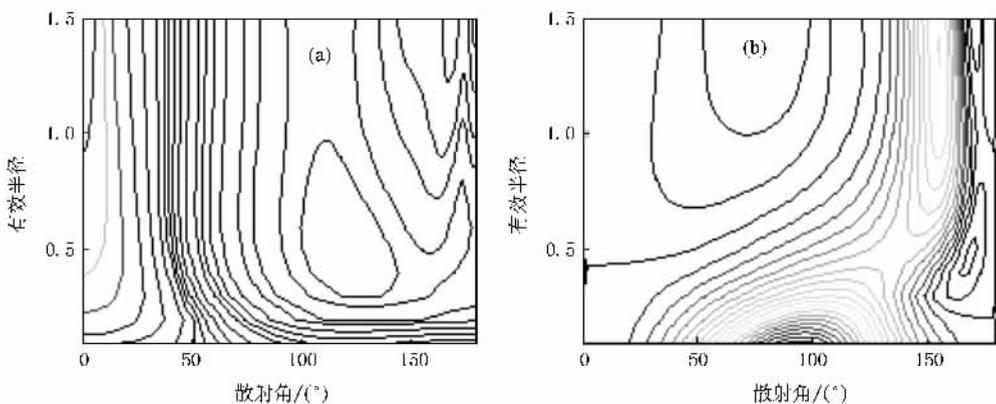


图 1 (a) 单次散射相函数 F_{11} 随有效半径和散射的变化等高线图 (b) 相同条件下 F_{21} 的等高线图

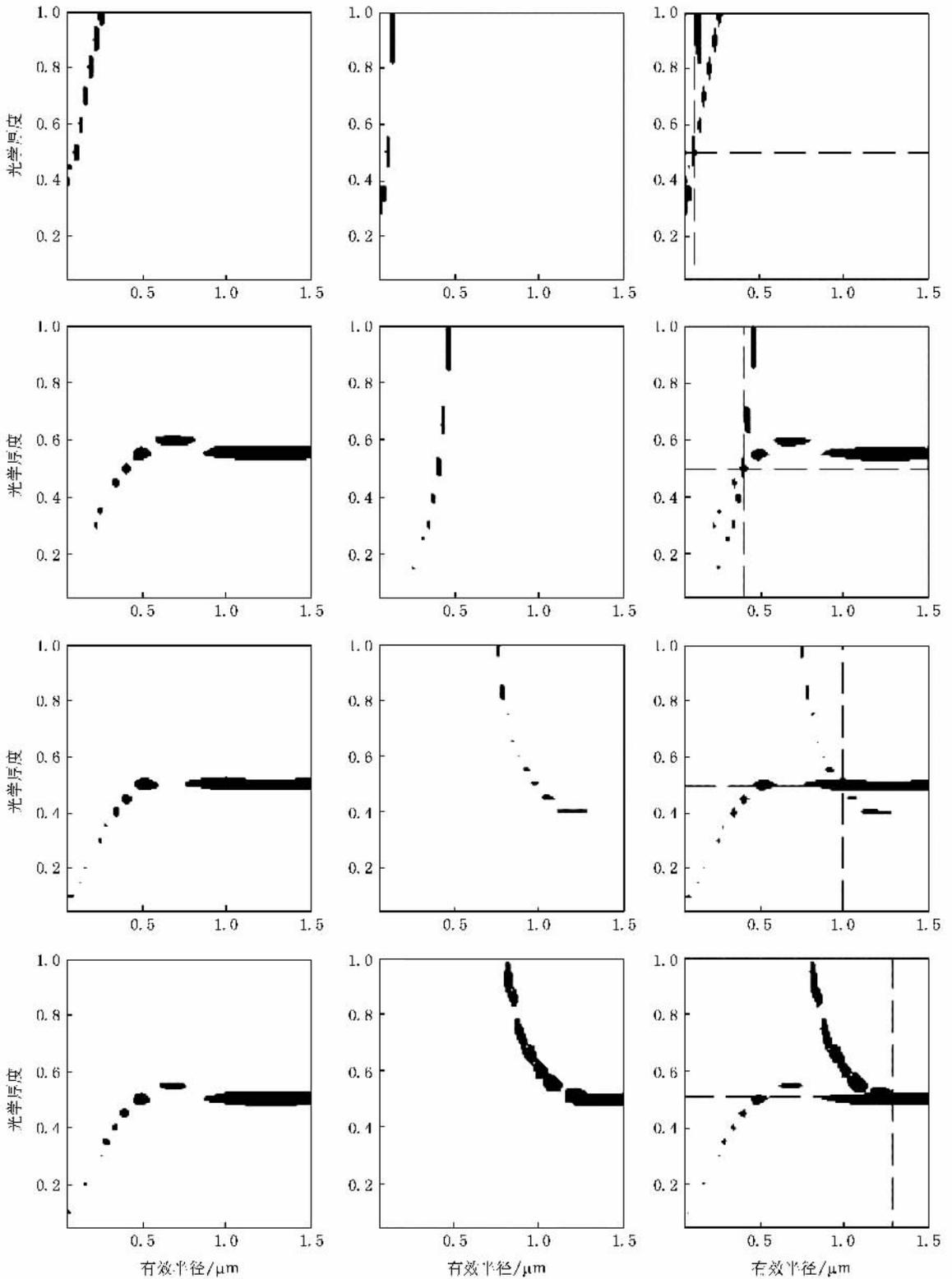


图 2 利用反射的太阳光强(左列)、极化(中间)和强度+极化(右列)反演气溶胶的光学厚度和有效半径(气溶胶假设为水凝物气溶胶,假设四个标准模式为计算机模拟的测量值,分别为 $\tau_0 = 0.5$, $r_{eff} = 0.1, 0.4, 1.0, 1.3 \mu\text{m}$; 观测几何为:入射角余弦 $\mu_0 = 0.8$, 观测角 $\mu = 0.5877$, 方位角 $\phi - \phi_0 = 60^\circ$ 时;入射波长为 $0.75 \mu\text{m}$)

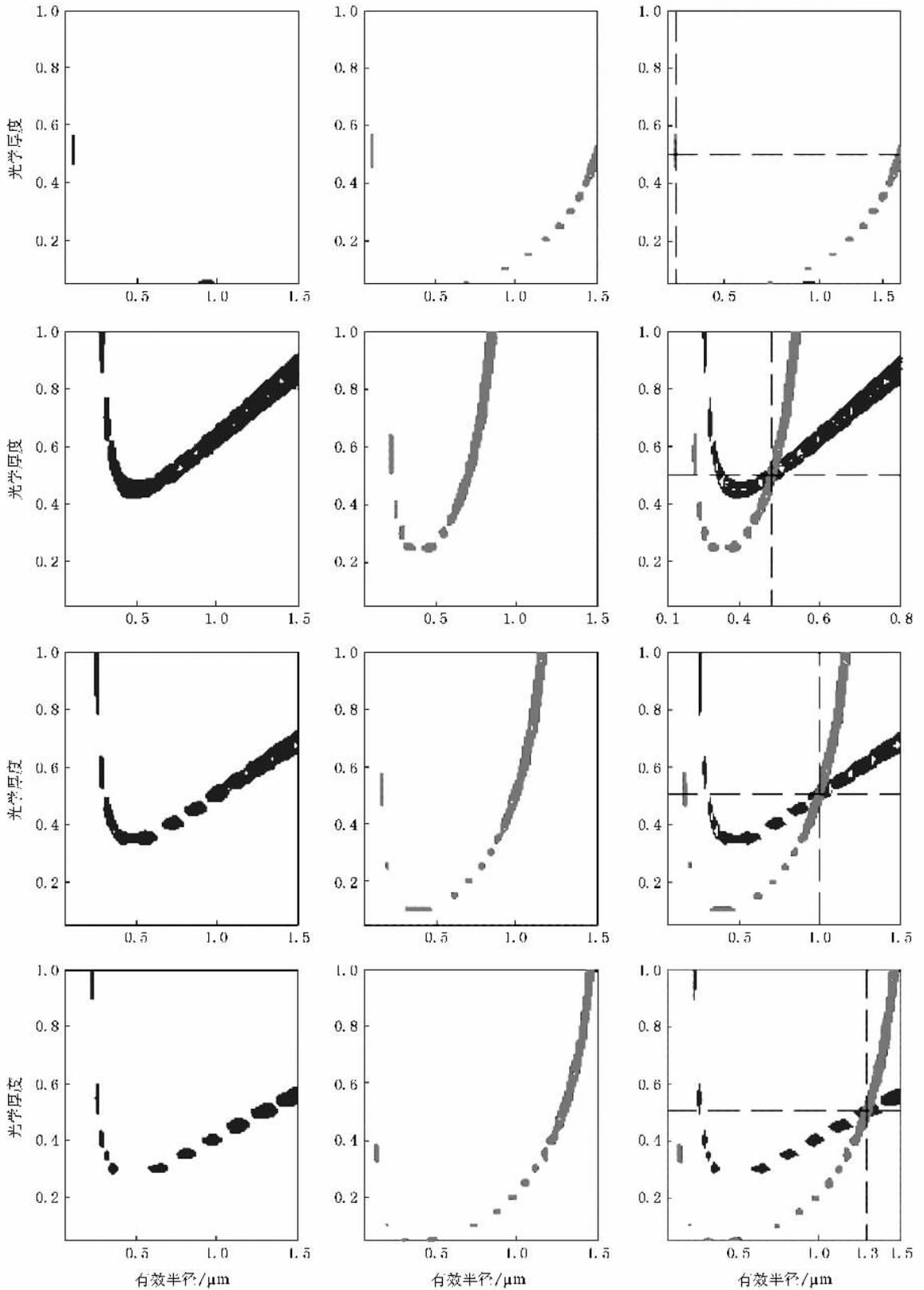


图3 利用反射的太阳光强(左列)、极化(中间)和强度+极化(右列)反演气溶胶的光学厚度和有效半径(气溶胶假设为水凝物气溶胶,假设四个标准模式为计算机模拟的测量值,分别为 $\tau_0 = 0.5, r_{eff} = 0.1, 0.4, 1.0, 1.3 \mu\text{m}$,观测几何为:入射角余弦为 $\mu_0 = 0.8$,观测角 $\mu = 0.5877$,方位角 $\phi - \phi_0 = 60^\circ$,入射波长为 $3.3 \mu\text{m}$)

理论模拟气溶胶的反演方法,我们假设气溶胶为水凝物气溶胶,即气溶胶的折射率为水的折射率,粒子的形状假设为球形;利用矢量辐射传输理论预先计算了光学厚度为 0.05—1,有效半径为 0.01—1.5 μm 的粒子层反射的斯托克斯参量 I 和 Q ,入射波长为 $\lambda = 0.75 \mu\text{m}$. 由于本文讨论的是该方法的可行性,因此所选用的“测量值”并非实地测量值,而是事先由计算机计算得到的,如图 1 中两虚线的交界处,其计算条件为光学厚度 $\tau_0 = 0.5$,有效半径分别为 $r_{\text{eff}} = 0.1, 0.4, 1.0, 1.3 \mu\text{m}$. 假设入射角余弦为 $\mu_0 = 0.8$,观测角余弦 $\mu = 0.5877$,方位角 $\phi - \phi_0 = 60^\circ$. “测量值”即为上述条件下计算得到的太阳光反射的斯托克斯参量 I 和 Q . 通过比较预先计算的斯托克斯参量与测量值来反演未知的光学厚度和有效半径. 采用三个检验标准分别来检验单独利用强度 I 、单独利用极化 Q ,以及结合利用 I 和 Q 的反演效果. 单独利用强度的检验标准 A 为

$$\frac{|I_c - I_p|}{I_p} \leq 0.05, \quad (12)$$

单独利用极化 Q 的检验标准 B 为

$$\frac{|Q_c - Q_p|}{|Q_p|} \leq 0.05, \quad (13)$$

第三个标准为以上两个的结合,即 $C = A \& B$. 其中下标 c 表示标准, p 表示预先计算. 不等式右边的数值为地球观测系统的地球观测扫描偏振计(earth observing system earth observing scanning polarimeter)的预期精度^[9]. 图 2 为符合上述三个检验标准的等高线图,其中最左边一列为符合标准 A 的解(阴影部分),中间一列为符合标准 B 的解,最右边一列为前面两列的叠加. 从图 2 的第一列和第二列中可以看

出,仅利用强度或者极化均不能同时反演出光学厚度和有效半径(出现多解),因此如果仅利用单个波长的强度或者极化来同时反演光学厚度和有效半径,将引起很大的误差. 从图 2 中可以看出,利用强度 I 和 Q 可以得到较好的反演结果,但是当有效半径较大时(图中 $r_{\text{eff}} = 1.3 \mu\text{m}$ 时)这种唯一性稍差.

众所周知,在可见光波段反射强度主要随着光学厚度的变化而变化,在近红外波段,反射强度主要是有效半径的函数^[10]. 因此为了检验在近红外波段上利用这种方法的可行性,我们计算了 3.3 μm 的太阳光入射时,利用上面三个标准(A, B, C)得到的反演结果. 从图 3 中可以看出,利用 3.3 μm 也可以得到很好的反演结果,尤其是在有效半径稍大一些的地方(由第二排,有效半径 $r_{\text{eff}} \geq 0.4 \mu\text{m}$),这种唯一性更好.

由此,可以结合利用可见和近红外两个波段来反演气溶胶的光学厚度和有效半径,当粒子尺寸较小时利用可见光,粒子尺寸较大时利用近红外波段.

4. 结 论

本文根据矢量辐射传输理论,利用累加法计算了水凝物气溶胶的反射矩阵. 详细讨论了利用单波长太阳光反演光学厚度和有效半径的方法. 计算机模拟反演结果表明,当粒子的有效半径小于 0.4 μm 时可以利用可见光波段(如 0.75 μm)进行反演,当粒子有效半径大于 1.0 μm 时可以利用近红外波段(如 3.3 μm)反演,当有效半径位于两者之间时,这两个波段均可以用来进行反演.

- [1] Nakajima T, King M D, Spinhome J D 1991 *J. Atmos. Sci.* **48** 728
 [2] King M D 1987 *J. Atmos. Sci.* **44** 1734
 [3] Nakajima T, King M D 1990 *J. Atmos. Sci.* **47** 1878
 [4] Nakajima T, King M D 1992 *Appl. Opt.* **31** 7669
 [5] Hansen J E, Travis L D 1974 *Space. Sci. Rev.* **16** 527
 [6] Stamnes K, Tsai S C, Wiscombe W 1988 *Appl. Opt.* **27** 2502

- [7] Mishchenko M I, Dlugach J M 1999 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **63** 409
 [8] Mishchenko M I 1997 *J. Geophys. Res.* **102**(D14) 16989
 [9] Rao C R N, Stowe L L, McClain E P 1989 *Int. J. Remote Sens.* **10** 843
 [10] Sun X M, Han Y P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 682 (in Chinese)
 [孙贤明、韩一平 2006 物理学报 **55** 682]

Retrieval of the optical thickness and effective radius of aerosols from reflected solar radiation measurements

Sun Xian-Ming Ha Heng-Xu

(School of Electrical and Electronic Engineering , Shandong University of Technology , Zibo 255049 , China)

(Received 17 December 2007 ; revised manuscript received 22 January 2008)

Abstract

A method for determining the optical thickness and effective particle radius of spherical aerosols with sun light of a single wavelength is presented. Based on the vector radiative transfer theory , the reflection matrix of the aerosols is calculated by using the adding-doubling method for $\lambda = 0.75 \mu\text{m}$ and $3.3 \mu\text{m}$, the effective radii of aerosol particles were $0.01\text{--}1.5 \mu\text{m}$, and the optical thickness were $0.05\text{--}1$. We modeled the retrieval process by computer simulation. From the numerical results , we conclude that the radiance combined with polarization is capable of uniquely retrieving optical thickness and effective radius with high accuracy. Especially , when the effective radius is less than $0.4 \mu\text{m}$, a visible light wavelength can be used for retrieval ; when the effective radius is larger than $1.0 \mu\text{m}$, an infrared light wavelength can be used for retrieval ; when the effective radius lies between 0.4 and $1.0 \mu\text{m}$, both of the two wave bands can be used to obtain a unique result with high accuracy.

Keywords : optical thickness , effective radius , polarization , remote sensing

PACC : 4225B , 9265D , 4110H