

利用透射太阳辐射反演 云光学厚度及有效粒子半径：方法研究*

王越 吕达仁 霍娟

中国科学院大气物理研究所 中层大气与全球环境探测实验室(LAGEO), 北京 100029

摘要 提出了一种利用地基观测透射太阳辐射反演层状云光学厚度及有效粒子半径的方法。通过原理分析和详细的数值模拟对该方法的可行性进行了讨论, 并给出了反演流程, 进行了误差分析。数值模拟采用了与 MODIS 遥感云原理相同的波长组合(0.75 和 2.13 μm), 结果表明, 当水云尺度化光学厚度 $\tau'_{0.75} > 1$, 且 $r_e > 5 \mu\text{m}$ 时, 利用 0.75 和 2.13 μm 的太阳透射值可以反演出该云的光学厚度及有效粒子半径。对于光学较薄的云, 由于透射的 2.13 μm 辐射值对于有效粒子半径敏感性变差, 该方法不再适用。随着光学厚度的增大, $\tau'_{0.75}$ 和 r_e 的反演误差均单调减小, 当 $\tau'_{0.75} \geq 2$ 以后, $\tau'_{0.75}$ 和 r_e 的误差分别下降到 10% 和 20% 以下。结合 0.75 和 1.65 μm 的太阳透射值也可以反演水云的光学厚度和有效粒子半径。

关键词 太阳透射 地基反演 云光学厚度 云有效粒子半径

气候变化是当前备受各国政府和科学界关注的重大问题。但由于目前认知的不足, 使得我们无论是对过去气候的模拟还是对未来气候的预测都存在很大的不确定性^[1]。地球的绝大部分能量都来自太阳, 如果气候系统处于平衡状态, 则吸收到的太阳辐射能量等于地球和大气系统向外出射的辐射能量。任何能够扰动这种平衡的因子(辐射强迫因子)都会因此而影响气候。简单来讲, 正的辐射强迫会使地球表面和低层大气变暖, 而负的辐射强迫使它们变冷。近几十年来, 许多观测事实表明全球正在变暖, 并且这种增暖已经导致地球气候发生变化, 而大气温室气体和气溶胶浓度的增加是导致这种变化的最瞩目的因子, 它们能够改变地球辐射收支平衡, 进而改变气候^[1]。

自然过程(如沙尘、火山爆发)和人为过程(如化石燃料及生物质燃烧)产生的气溶胶均对地气系统的辐射收支有重要影响, 主要表现在两个方面。一种是直接影响, 即气溶胶本身散射和吸收太阳辐射以及红外热辐射; 另一种是间接影响, 即作为云

的凝结核(CCN)气溶胶改变云的微物理特性, 进而对云量的大小和云的辐射特性有所影响。人类活动形成的气溶胶有可能导致云具有更高的反照率^[2,3]。气溶胶会导致云反照率增大, 从而减少地球对太阳辐射的吸收, 进而可能补偿由于 CO₂ 排放增加而导致的全球变暖效应^[4]。

云在地球的辐射收支及水循环中具有关键作用, 因而在地球的气候系统中同样扮演着很重要的角色^[5]。云可以吸收和散射太阳辐射(从而降低地表气温), 同时又能吸收和放射长波辐射(从而增暖地面), 这两种作用的相对强弱决定了云对辐射的影响的净效果。而云的辐射特性取决于多种因素, 它不仅依赖于云量及其分布, 还依赖于大气中水汽、气溶胶的分布, 云的高度、厚度、含水量及云的微物理特性等因子。未来气候预测中的最大不确定性来自云及其与辐射相互作用, 云表现为气候模拟中一个显著的潜在误差, 云对辐射的净反馈的符号是一个不确定的问题, 不同的模式给出的差异相当大^[1]。

2005-08-24 收稿, 2006-01-12 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40333034 和 40027002)和科技部基础研究前期专项(批准号: 2001CCA0200)资助项目

E-mail: wangyue@mail.iap.ac.cn

为了研究云-辐射-气候之间的相互关系,确定云在气候系统中的反馈机制及作用,必须了解云的物理属性与云的辐射属性之间的关系. 我们知道,给定云的粒子谱分布,利用 Mie 散射理论,就可以确定重要的光学参数,如体消光系数 β_{ext} , 单次散射反照率 ω_0 及不对称因子 g . 但是 Mie 散射的计算很耗时,不适合在 GCM 模式中应用,因此人们期望能发展出一种参数化方法,只利用与云粒子谱分布有关的几个特征参数来描述水云的辐射属性. 在太阳和地球光谱范围内,云的光学属性主要依赖于有效粒子半径,而对云粒子谱分布的细节不敏感,很多研究给出了利用云含水量(光学厚度)及有效粒子半径来对云的光学属性进行参数化的方案^[6-8]. 同时,当采用有效粒子半径作为描述云粒子谱分布的特征参数时,云的短波辐射属性对于云粒子谱分布细节的依赖性最小^[9].

正是基于云在气候系统中的重要性及所发展的将云微物理特性转换为光学属性的参数化方法,因此,很多学者进行了关于如何确定云的光学厚度及有效粒子半径的研究. 从研究所依托的平台区分,可分为空基(卫星或飞机)和地基两种.

1 空基反演和地基反演

1.1 空基反演

空基反演云光学厚度和有效粒子半径的研究很多. 这些研究所依据的理论基础是云在非吸收的可见光波段上,反射函数主要是云的光学厚度的函数,而在吸收的太阳近红外波段上,反射函数是云粒子大小的函数^[4,10,11].

在辐射传输研究中,反射函数 $R_\lambda(\mu, \mu_0, \phi)$ 的定义为

$$R_\lambda(\mu, \mu_0, \phi) = \frac{\pi I_\lambda(\mu, \mu_0, \phi)}{\mu_0 F_{0\lambda}}, \quad (1)$$

上式中, $I_\lambda(\mu, \mu_0, \phi)$ 为云顶处波长为 λ 的反射强度,可为卫星或飞机上所携带的辐射计观测到. μ 为观测天顶角的余弦, μ_0 为太阳天顶角的余弦, ϕ 为观测方位角与太阳方位角之间的夹角, $F_{0\lambda}$ 为入射到大气层顶的波长为 λ 的太阳辐射通量密度.

我们知道,描述云的辐射特性的主要参数为 β_{ext} , ω_0 , g , 它们均与粒子大小及波长有关. 前面 3 个参数可归结为两个参数——相似性参数 s 及尺度化光学厚度 τ'_c ^[12],

$$s = \left(\frac{1 - \omega_0}{1 - g\omega_0} \right)^{1.2}, \quad (2)$$

$$\tau'_c = (1 - g)\tau_c. \quad (3)$$

相似性参数 s 综合考虑了 ω_0 和 g 对粒子大小的依赖性, s 越小,散射作用越强,随着吸收的增加, s 趋近于 1. 尺度化光学厚度 τ'_c 则与云的光学厚度有关. 对于波长 $\lambda \leq 1.0 \mu\text{m}$ 的水汽窗区,散射近似为保守散射,因此 s 几乎为零. 所以,在这个波段范围内,可以由反射函数 R_λ 和 s 来得到 τ'_c (图 1 (a)). 而在水汽吸收可以忽略的 1.65 和 2.13 μm , 反射函数 R_λ 和 s 则对有效粒子半径的变化敏感,利用这两个波段中的任一个,均可反演出有效粒子半径(图 1 (b), (c)).

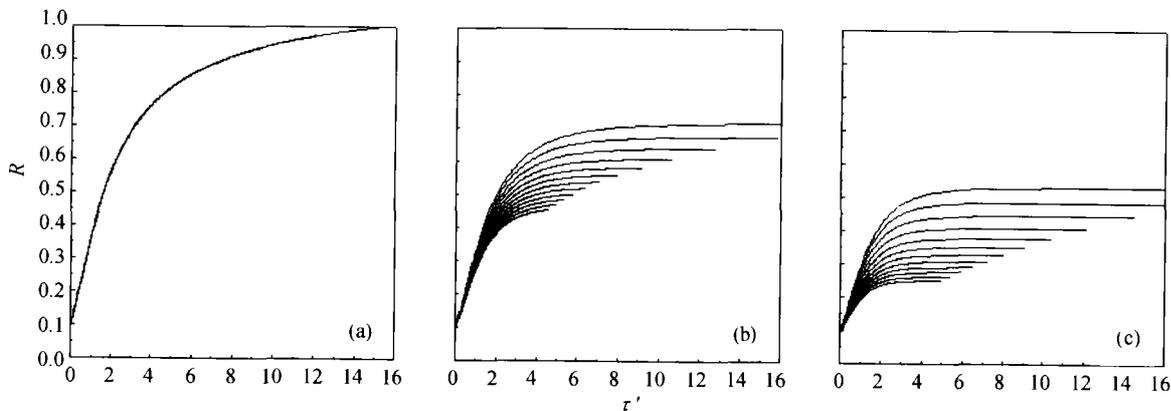


图 1 反射函数与尺度化光学厚度的关系

(a) $\lambda=0.75 \mu\text{m}$; (b) $\lambda=1.65 \mu\text{m}$; (c) $\lambda=2.13 \mu\text{m}$

基于前面介绍的反演原理, 很多星载仪器均设置了可见光及近红外通道来观测云顶的反射辐射强度 I_λ , 进而得到云的光学厚度及有效粒子半径, 如搭载于美国 EOS 计划中的 Terra 及 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪 MODIS (moderate resolution imaging spectrometer) 就设置了 0.65 及 2.13 μm (同时还有 3.75 μm) 通道, 并利用前面介绍的原理来反演陆上云的光学厚度及有效粒子半径^[13].

1.2 地基反演

尽管空基反演方法能够获得较大空间尺度上的云的光学和微物理特性, 但依然需要更多的理论研究与实际观测来对反演方法与结果进行验证, 因为诸如理论上的假定及近似等很多因素影响反演的准确性, 这也是发展地基反演方法的原因之一. 此外, 云是千变万化的, 其发展和演变也是很迅速的, 而一些卫星在时间分辨率上显然不能满足长期连续观测的要求, 发展地基反演方法也是对空基反演的一个补充. 因此, 有很多研究工作是围绕地基反演展开的, 如美国的 ARM (atmospheric radiation measurement) 计划, 就是致力于收集长期连续的地基观测资料, 并利用这些资料来反演所关注的气象参数, 这其中就包括对云的光学厚度与有效粒子半径, 已经有很多学者进行了这方面的研究^[14-18].

目前, 常规地基反演方法的基本思路是: 利用可见光波段来得到云的光学厚度, 结合由微波辐射计测量出的云液态水路径 (L_w) 来得出 r_e .

当用 r_e 作为描述云滴谱尺度分布的特征参数时, 云的光学属性对云滴谱的细节依赖性最小^[8,9]. 或者说, 只要保持 r_e 相等, 用不同的函数形式, 如 Γ 谱、对数正态谱等, 来描述滴谱分布的云所表现出的光学属性是很相近的.

因此, 我们不妨用对数正态分布来描述边界层层的云滴谱分布,

$$n(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_m}{\sigma_x}\right)^2\right]. \quad (4)$$

这里, $x = \ln r$, r 是云滴的半径, $x_m = \ln r_m$, r_m 是云滴的众数半径, σ_x 是对数宽度, N 是单位体积内云滴的总数.

设云厚为 $\Delta Z = Z_t - Z_b$, 液水的密度为 ρ_w , 消

光系数为 Q , 则光学厚度 τ_c , L_w 及 r_e 可用下面的公式来表达:

$$\tau_c = Q\pi r_m^2 \exp(2\sigma_x^2) N \Delta Z, \quad (5)$$

$$L_w = \rho_w \left(\frac{4}{3}\pi r_m^3 \exp(9\sigma_x^2/2)\right) N \Delta Z, \quad (6)$$

$$r_e = \int_0^\infty r^3 n(r) dr / \int_0^\infty r^2 n(r) dr = r_m \exp(5\sigma_x^2/2). \quad (7)$$

在 τ_c 的表达式中, 假设云滴的大小远远大于入射辐射的波长, 此时消光系数 Q 可近似为常数 2 (在可见光波长下可以满足这样的条件).

把(6), (7)式代入(5)式, 则可以得出

$$r_e = \frac{3L_w}{2\tau_c \rho_w}. \quad (8)$$

从(8)式可以看出, 只要知道了 L_w 和 τ_c 的值, 就可以得出 r_e 的估计值. 上述地基反演方法要求同时测量可见光及微波辐射.

过去一些观测实验 (如 FIRE) 曾经同时观测过云的透射与反射辐射. 但学者们在应用这些数据进行研究时主要探讨了利用反射同时反演光学厚度及有效粒子半径的方法. 对于透射只提出了反演光学厚度的方法, 对同时反演这两个参数未做深入讨论^[19]. 因此, 本文的目的是提出一种利用地基测量的太阳透射辐射来反演层云的光学厚度及有效粒子半径的方法. 考虑与 MODIS 遥感云参数原理相同的波长组合, 探讨利用其进行地基对天遥感的可行性. 从前面的介绍我们知道, 天基对云的观测获得的是太阳的反射辐射, 而地基对云观测获得的是太阳透射辐射. 两者的差别在于相对于云层的散射角的差异, 但两者都包含着云的信息. 本文选择了与 MODIS 原理相同的波长组合, 并遵循与卫星遥感云类似的路线来研究利用太阳透射遥感云的可行性. 若方法可行, 则这种一致性对于 MODIS 相关产品的验证是很有优势的.

2 反演原理

考虑到卫星反演云光学厚度和有效粒子半径时利用了反射函数在可见光波段只与云的光学厚度有关, 与有效粒子半径无关, 而在近红外波段只与有

效粒子半径有关的特点, 下面我们将探求在可见光及近红外波段, 透射函数与光学厚度及有效粒子半径间是否有与反射函数相似的关系.

透射函数 $T_\lambda(\mu, \mu_0, \phi)$, 它的定义为

$$T_\lambda(\mu, \mu_0, \phi) = \frac{\pi I_\lambda(-\mu, \mu_0, \phi)}{\mu_0 F_{0\lambda}} \quad (9)$$

上式中, $I_\lambda(-\mu, \mu_0, \phi)$ 为云底处波长为 λ 的透射强度, 可由地基的辐射计观测到. μ 为观测天顶角的余弦, 负号代表与定义的正 μ 方向(天顶)相反, 这里的意义指 I_λ 的方向向下. μ_0 为太阳天顶角的余弦, ϕ 为观测方位角与太阳方位角之间的夹角, $F_{0\lambda}$ 为入射到大气层顶的波长为 λ 的太阳辐射通量密度.

依据 MODIS 卫星反演所选择的波长组合原理, 我们选择了 0.75, 1.65, 2.13 μm 来考察透射函数 $T_\lambda(\mu, \mu_0, \phi)$ 对层云光学厚度及有效粒子半径的敏感性. 选择这些波长是因为他们处于水汽窗区, 避开了水汽吸收的影响.

很多研究指出, 绝大多数情况下陆上水云粒子的大小处于 5—10 μm 之间^[10]. 因此, 为了不失一般性, 我们计算了有效粒子半径 $5 \leq r_e \leq 16 \mu\text{m}$ 时, 不同液态水含量(C_w)的层云在 0.75, 1.65, 2.13 μm 的透射函数及尺度化光学厚度.

图 2 为 $\lambda=0.75 \mu\text{m}$ 时, 透射函数与尺度化光学厚度的关系. 从图中可以看出, 当 $\tau'_{0.75} \geq 1$ 时,

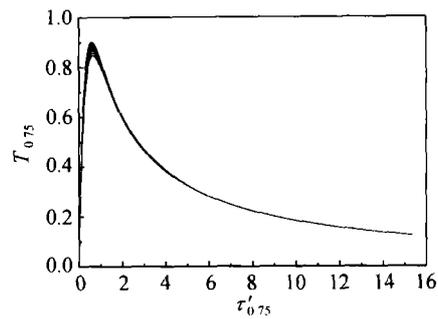


图 2 $\lambda=0.75 \mu\text{m}$ 时透射函数与尺度化光学厚度的理论关系

太阳天顶角 $\theta_0=30^\circ$, 有效粒子半径 $5 \leq r_e \leq 16 \mu\text{m}$, 观测方向 $\theta=180^\circ$, 即天底

$T_{0.75}$ 随 $\tau'_{0.75}$ 的增大而单调减小, 与 r_e 的大小无关. 而在 $\tau'_{0.75} < 1$ 时, $T_{0.75}$ 随 $\tau'_{0.75}$ 的变化表现出对 r_e 有一定的依赖性. 因此, 若 $\tau'_{0.75} \geq 1$, 根据测得的 0.75 μm 的透射辐射 $T_{0.75}$, 可以惟一地确定相应的尺度化光学厚度 $\tau'_{0.75}$.

图 3(a), (b) 为 $\lambda=2.13$ 及 1.65 μm 时, 透射函数与尺度化光学厚度的关系(图中只显示了 $r_e=5, 8, 11, 14 \mu\text{m}$ 的曲线). 从图 3(a) 可以看出, 当 $\tau'_{2.13} \geq 1$ 时, $T_{2.13}$ 与 $\tau'_{2.13}$ 的关系随着 r_e 的不同而不同, 变化规律相近, 但数值有明显差别. 而当 $\tau'_{2.13} < 1$ 时, $T_{2.13}$ 与 $\tau'_{2.13}$ 的关系对 r_e 的依赖性很小. 类似的关系在图 3(b) 中也可看到.

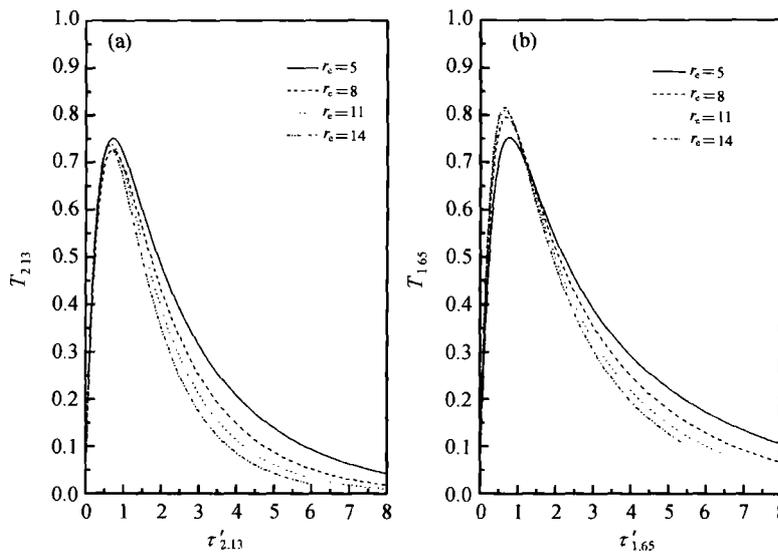


图 3 波长为 2.13, 1.65 μm 时透射函数与尺度化光学厚度的理论关系

计算条件与图 4 相同

因此,如果我们能够获得 2.13 (或 1.65) μm 的透射辐射 $T_{2.13}$ (或 $T_{1.65}$)及尺度化光学厚度 $\tau'_{2.13}$ (或 $\tau'_{1.65}$),就可以确定所对应的 r_e 的值.

综上所述,与反射函数相似,在可见光波段,透射函数只与尺度化光学厚度有关,与粒子大小无关;而在近红外波段,透射函数也只与 r_e 有关.这表明利用透射函数来反演层云的光学厚度及有效粒子半径是可行的.

3 反演方法

在第2节中我们提到,如果能够获得 $2.13 \mu\text{m}$ (因为 2.13 与 $1.65 \mu\text{m}$ 的反演原理一致,下面的讨论中我们只关注 $2.13 \mu\text{m}$)的透射辐射 $T_{2.13}$ 及相应的尺度化光学厚度 $\tau'_{2.13}$,就可以确定所对应的 r_e . $T_{2.13}$ 可由仪器直接测量得到,由于 $\tau'_{2.13}$ 与 r_e 有关,不能由 $T_{2.13}$ 直接得到 $\tau'_{2.13}$,需要通过 $\tau'_{0.75}$ 与 $\tau'_{2.13}$ 的

关系来进行反演求解.

从图4中我们知道,当 $\tau'_{0.75} \geq 1$ 时, $T_{0.75}$ 随 $\tau'_{0.75}$ 单调减小,且与 r_e 无关.因此,我们选取了 $r_e = 5$ 拟合 $T_{0.75}$ 随 $\tau'_{0.75}$ 变化的曲线,它具有如下的函数形式,

$$T_{0.75} = a \times (1 - e^{(-\tau'_{0.75}/c_1)})^b \times e^{(-\tau'_{0.75}/c_2)} + d, \quad (10)$$

式中 a, b, c_1, c_2, d 为拟合参数.在稍后的部分,我们会介绍如何由测量到的 $T_{0.75}$ 来得到 $\tau'_{0.75}$.

图4(a)给出了不同 r_e 下, $\tau'_{2.13}$ 与 $\tau'_{0.75}$ 间的关系.从图中可以看到,不同 r_e 下, $\tau'_{2.13}$ 与 $\tau'_{0.75}$ 间具有很好的线性关系,即

$$\tau'_{2.13} = K(r_e)\tau'_{0.75}. \quad (11)$$

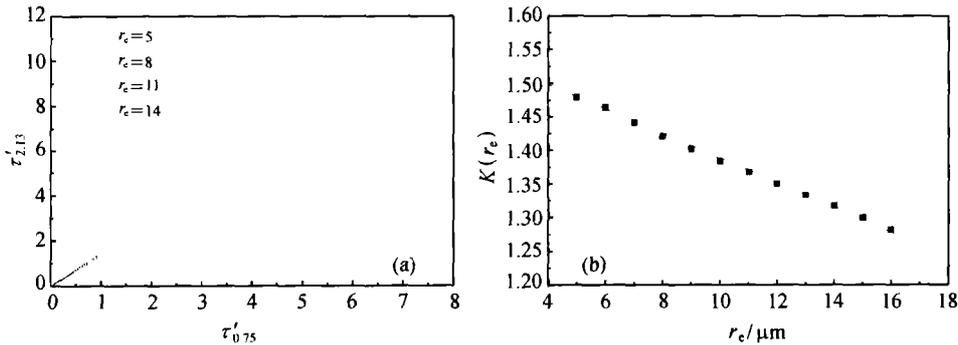


图4 $\tau'_{2.13}$, $\tau'_{0.75}$ 及 r_e 间的关系

(a) 尺度化光学厚度 $\tau'_{2.13}$ 与 $\tau'_{0.75}$ 的理论关系; (b) $\tau'_{2.13}$ 与 $\tau'_{0.75}$ 拟合直线的斜率 K 与 r_e 的关系

$K(r_e)$ 为不同 r_e 时 $\tau'_{2.13}$ 与 $\tau'_{0.75}$ 间直线的斜率.针对于我们所关注的 r_e 的范围,我们拟合了不同 r_e 时 $\tau'_{2.13}$ 与 $\tau'_{0.75}$ 的关系,并将拟合直线的斜率与 r_e 的关系表示在图4(b)中.从图中可以看到, $K(r_e)$ 与 r_e 同样具有很好的线性关系,

$$K(r_e) = 1.571 - 0.018r_e. \quad (12)$$

因此,对于给定的 r_e ,可以利用(11), (12)式,将 $\tau'_{0.75}$ 转换为 $\tau'_{2.13}$.

类似地,由于 $T_{2.13}$ 与 $\tau'_{2.13}$ 之间的关系在不同的 r_e 下表现出趋势相近、数值不同的规律,因此,我

们同样可以拟合出不同 r_e 下 $T_{2.13}$ 与 $\tau'_{2.13}$ 间的关系.图5给出了 $r_e = 5, 8, 11, 14 \mu\text{m}$ 时 $T_{2.13}$ 与 $\tau'_{2.13}$ 的理论关系及拟合曲线,它们具有如下的函数形式:

$$T_{2.13}(r_e) = A(r_e)(1 - e^{(-\tau'_{2.13}/C_1(r_e))})^{B(r_e)} \cdot e^{(-\tau'_{2.13}/C_2(r_e))}. \quad (13)$$

对于其他 r_e ,我们可以得到与(13)式形式相同、参数值不同的拟合曲线.可见,各拟合参数 A, B, C_1, C_2 都是 r_e 的函数.图5(a)给出了各拟合参数与 r_e 的关系及各参数与 r_e 的拟合曲线.

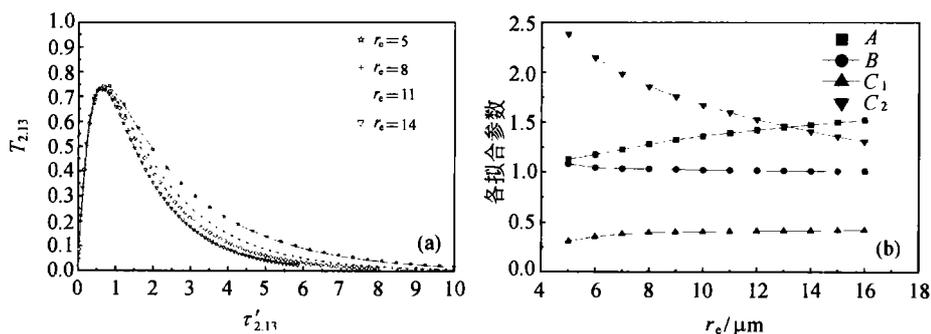


图5 $T_{2,13}$ 与 $\tau'_{2,13}$ 的拟合关系

(a) $T_{2,13}$ 与 $\tau'_{2,13}$ 的理论关系及拟合曲线；(b) 各拟合参数与 r_e 的关系及拟合曲线

(14)–(17)式给出了各参数与 r_e 的拟合方程：

$$A(r_e) = 0.798 + 0.075r_e - 0.002r_e^2, \quad (14)$$

$$B(r_e) = 1.149 - 0.020r_e + 7.110 \times 10^{-4}r_e^2, \quad (15)$$

$$C_1(r_e) = 0.178 + 0.036r_e - 0.001r_e^2, \quad (16)$$

$$C_2(r_e) = 3.331 - 0.235r_e + 0.007r_e^2. \quad (17)$$

需要指出的是，上面所有的结果都是在太阳天顶角 $\theta_0 = 30^\circ$ 的条件下获得的。对于其他天顶角我们

可以得到相似的结果，差别只是各拟合参数 (K, A, B, C_1, C_2) 与 r_e 拟合方程的系数不同，图 6(a)–(d)说明了这一点。

因此，对于不同的太阳天顶角 θ_0 及有效粒子半径 r_e ，根据上面的方法可建立一个关于拟合参数 $a, b, c_1, c_2, d, K, A, B, C_1, C_2$ 的查找表 LUT (look up table)，之后可以用图 7 框图中的流程来反演层云的光学厚度及有效粒子半径。

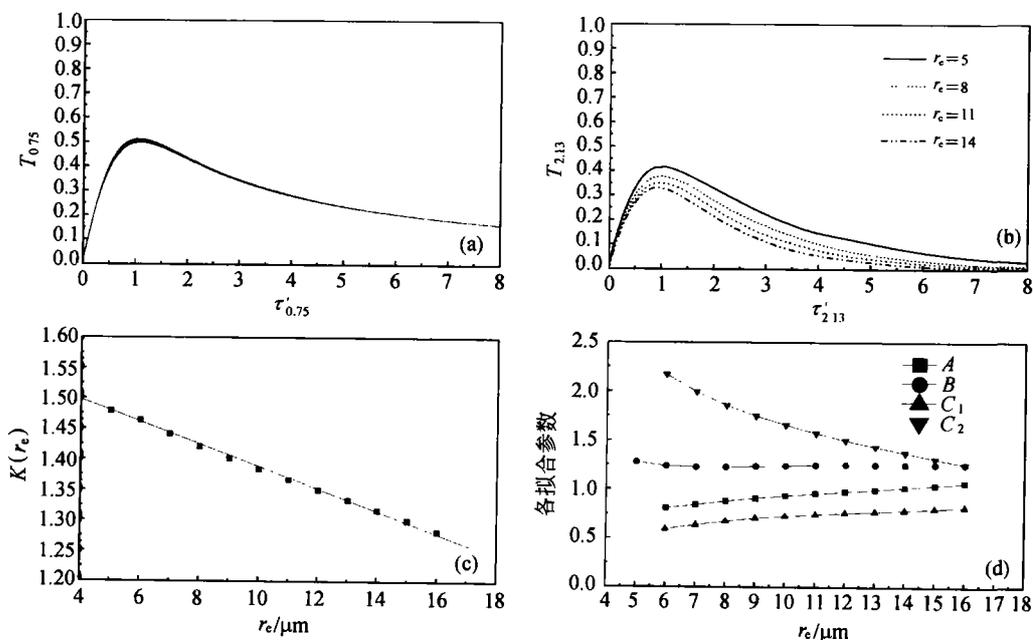


图6 反演方法在太阳天顶角 $\theta_0 = 60^\circ$ 时的应用

(a) $T_{0,75}$ 与 $\tau'_{0,75}$ 的理论关系；(b) $T_{2,13}$ 与 $\tau'_{2,13}$ 的理论关系
(c) K 与 r_e 的关系；(d) 拟合参数 A, B, C_1, C_2 与 r_e 的关系

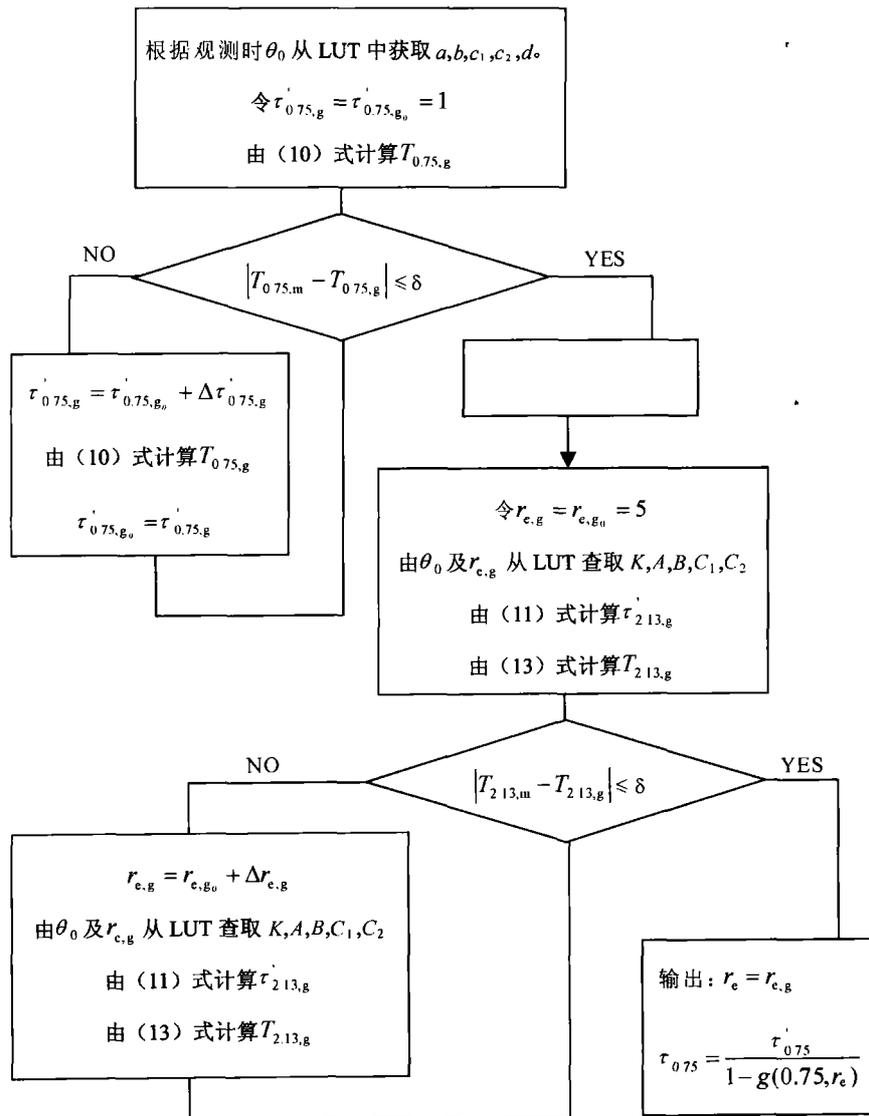


图7 利用透射反演层云光学厚度及有效粒子半径的概念流程图
(下标 m, g 分别代表测量值及猜值)

4 误差分析

依据前面介绍的方法反演得到的层云的 $\tau'_{0.75}$ 及 r_e 的误差主要来自两方面. 一方面是透射辐射 ($T_{0.75}$, $T_{2.13}$) 的测量精度, 一方面是对曲线的拟合精度. 对于后者, 可通过提高拟合的精度来避免, 依据前面所给出的拟合函数形式, 平均拟合精度的误差小于 0.1%. 因此, 下面我们将主要讨论由于透射辐射 ($T_{0.75}$, $T_{2.13}$) 的测量误差对反演结果的影响, 对反演的误差做一个总体上的估计.

对于函数 $y=f(x)$, 其相对误差的计算公式为

$$\delta y = \left| \frac{x f'(x)}{f(x)} \right| \delta x. \quad (18)$$

因此, 对于(10), (13)式给出的关于 $T_{0.75}$, $T_{2.13}$ 及 $\tau'_{0.75}$, r_e 的解析表达式, 可以利用(18)式导出 δx 的解析表达式. 经过烦琐的推导与整理后, 我们计算了当 $\delta T_{0.75}=0.05$ 及 $\delta T_{2.13}=0.05$ 时 $\tau'_{0.75}$ 及 r_e 的反演误差 $\delta\tau'_{0.75}$ 及 δr_e , 见图 8 与图 9.

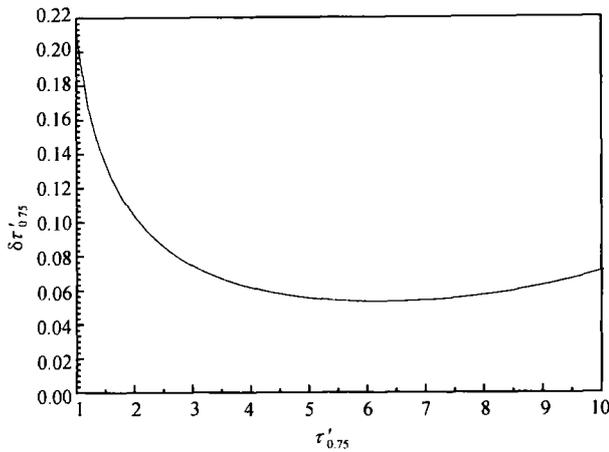


图8 0.75 μm 透射辐射测量值有5%的误差时 $\tau'_{0.75}$ 的反演误差(太阳天顶角 $\theta_0 = 36^\circ$)

从图8中可以看到,当 $1 \leq \tau'_{0.75} \leq 2$ 时, $\tau'_{0.75}$ 的反演误差由20%单调下降到10%,当 $\tau'_{0.75} \geq 2$ 以后, $\tau'_{0.75}$ 的反演误差均小于10%.

r_e 的确定要依赖于 $T_{2.13}$ 及 $\tau'_{0.75}$, 因此,在讨论 r_e 的反演误差时,我们分别讨论了 $\tau'_{0.75}$ 没有误差及 $\tau'_{0.75}$ 有5%的误差两种情况,对比图9(a)及(b),可以发现, $\tau'_{0.75}$ 的误差对 r_e 的反演影响较小.随着光学厚度的增大, r_e 的误差单减小.当云是光学较薄时($\tau'_{0.75} < 1.5$), r_e 的误差较大, $\tau'_{0.75} > 2$ 后, r_e 的误差降低到小于20%.

需要提出的是,虽然我们只对天顶角为 30° 时的反演误差进行了讨论与估计,但是对于其他天顶角,反演误差的趋势及范围是相近的.

5 结论

本文提出了一种利用透射太阳辐射反演层状云光学厚度及有效粒子半径的方法.从理论研究的角度对方法的原理、应用条件、误差等进行了分析.数值模拟采用了与MODIS空基反演云参数原理相同的波长结果.结果表明,当水云尺度化光学厚度 $\tau'_{0.75} > 1$, 且 $r_e > 5 \mu\text{m}$ 时,利用0.75和2.13 μm的太阳透射辐射可以反演出该云的光学厚度及有效粒子半径.其反演误差与MODIS空基反演误差相当.因此天基、地基完全可以采用同样的波长组合来同时进行反演,进行天基、地基反演结果的对比较

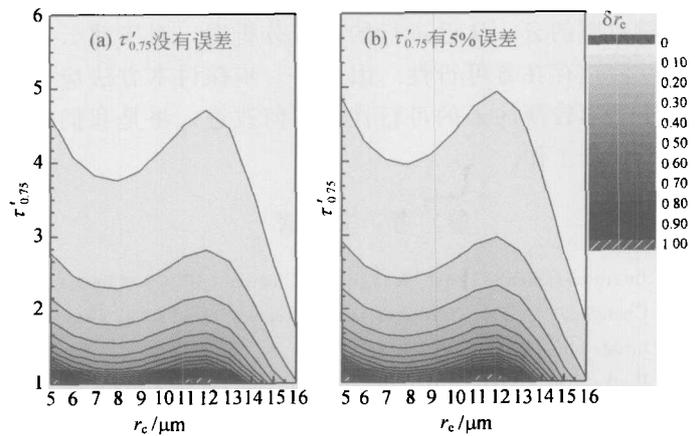


图9 2.13 μm 透射辐射测量值有5%的误差时, r_e 的反演误差 δr_e (太阳天顶角 $\theta_0 = 36^\circ$)

(a) $\tau'_{0.75}$ 没有误差时 r_e 的反演误差; (b) $\tau'_{0.75}$ 有5%的误差时 r_e 的反演误差

证. 本文为所发展的反演方法设计了反演流程,其中所涉及到的经验系数查找表能以很高的精度事先计算获取,实际反演可顺利实现.以上的结论同样适用于0.75和1.65 μm 波长组合的情况,仅需要以同样的方法预先计算出1.65 μm 的经验系数查找表.

对于光学较薄的云,由于透射的2.13 μm 辐射值对于有效粒子半径敏感性变差,目前所提的方法不再适用.

反演结果的误差主要来自于0.75和2.13 μm 透射辐射的测量精度.在假定透射辐射存在5%的测量误差的情况下,我们对于反演误差的趋势和范围进行了估计.结果表明,随着光学厚度的增大, $\tau'_{0.75}$ 和 r_e 的反演误差均单调减小,当 $\tau'_{0.75} \geq 2$ 以后, $\tau'_{0.75}$ 和 r_e 的误差分别下降到10%和20%以下,这说明本方法适用于光学较厚的云.

需要指出的是,空基MODIS利用反射函数来反演层云光学厚度及有效粒子半径,是基于渐近理论近似,该理论只适用于光学较厚的云,对于薄云,地表反射率的不确定性将影响反演精度.因此,如何精确地反演出光学较薄的云的光学厚度及有效粒子半径依然是目前一个值得研究的问题.尽管本文所提出的反演方法目前也限定应用于光学较厚的云,但基于文中的分析可以看出,我们所拟合的曲线包括了光学较薄的云的情况,只是在应用

时, 我们限定将所拟合的曲线应用于 $\tau'_{0.75} > 1$, 即光学较厚的云. 从已进行的初步分析看, 对于薄云的反演也存在着可行性. 因此进一步探讨本方法应用于光学较薄的云的可行性及如何改进, 将是我们的下一步工作.

参 考 文 献

- 1 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Climate Change 2001. The Third Assessment Report. New York: Cambridge Univ Press, 2001
- 2 Radke L F, Coakley J A Jr, et al. Direct and remote sensing observations of the effects of shins on clouds. *Science*, 1989, 246: 1146—1149
- 3 Coakley J A Jr, Bernstein R L, et al. Effect of ship-stack effluents on cloud reflectivity. *Science*, 1987, 237: 1020—1022
- 4 Twomey S, Seton K J. Inferences of gross microphysical properties of clouds from spectral reflectance measurements. *J Atmos Sci*, 1980, 37(56): 1065—1069
- 5 Min Q, Joseph E, Duan M. Retrievals of thin cloud optical depth from a multifilter rotating shadowbandradiometer. *J Geophys Res*, 2004, 109(D02201)
- 6 Slingo A, Nicholls S, Schrecker J. Aircraft observations of marine stratocumulus during JASIN. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1983, 108: 833—856
- 7 Slingo A. A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds. *J Atmos Sci*, 1989, 46(10): 1419—1427
- 8 Hu Y X, Stamnes K. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models. *J Clim Appl Meteorol*, 1992, 6: 728—742
- 9 Damiano P, Chylek P. Shortwave radiative properties of clouds. Numerical study. *Notes and Correspondence*, 1994: 1223—1233
- 10 Curran R J, Wu M-L C. Skylab near-infrared observations of clouds indicating supercooled liquid water droplets. *J Atmos Sci*, 1982, 39: 635—647
- 11 Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J Atmos Sci*, 1990, 47(15): 1878—1893
- 12 van de Hulst H C. The spherical albedo of a planet covered with a homogeneous cloud layer. *Astron Astrophys*, 1974, 35: 209—214
- 13 King M D, Tsay S C, Platnick S E, et al. Cloud Retrieval Algorithms for MODIS: Optical Thickness, Effective Particle Radius, and Thermodynamic Phase. Algorithm Theoretical Basis Document(ATBD), MODIS Science Team, 1997
- 14 Dong X, Ackerman T P, Clothiaux E E, et al. Microphysical and radiative properties of boundary layer stratiform clouds deduced from ground-based measurements. *J Geophys Res*, 1997, 102(D20): 23829—23843
- 15 Dong X, Ackerman T P, Clothiaux E E. Parameterizations of the microphysical and shortwave radiative properties of boundary layer stratus from ground-based measurements. *J Geophys Res*, 1998, 103(D24): 31681—31693
- 16 Dong X, Minnis P, Ackerman T P, et al. A 25-month database of stratus cloud properties generated from ground-based measurements at the atmospheric radiation measurement southern great plains site. *J Geophys Res*, 2000, 105(D4): 4529—4537
- 17 Graemel L S. Aircraft observations of the radiative and microphysical properties of stratocumulus and cumulus cloud fields. *J Clim Appl Meteorol*, 1987, 26: 1243—1269
- 18 Mace G G, Sassen K. A constrained algorithm for retrieval of stratocumulus cloud properties using solar radiation, microwave radiometer, and millimeter cloud radar data. *J Geophys Res*, 2000, 105: 29 099—29 108
- 19 Rawlins F, Foot J S. Remotely sensed measurements of stratocumulus properties during FIRE using the C130 aircraft multi-channel radiometer. *J Atmos Sci*, 1990, 47(21): 2488—2504