

利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气 气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演

I. 理论与模拟

段民征 吕达仁

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境开放实验室, 北京 100029

摘 要 陆地上空标量辐射对地表反射率和大气气溶胶散射都具有很强的敏感性, 而偏振反射只对大气气溶胶敏感, 对地表不敏感。根据这个原理并结合 POLDER (POLarization and Directionality of Earth Reflectance) 资料的特点, 作者提出综合利用标量辐射和偏振反射信息来实现陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演。首先, 利用多角度偏振辐射观测提取大气气溶胶光学参数, 再利用标量辐射测量对偏振反演结果作进一步筛选和订正, 同时获得地表反射率。数值模拟试验结果证明, 仅利用偏振信息只能获取大气气溶胶信息, 而且其结果误差较大, 特别是对于散射作用较强的短波长通道如 670 nm 误差更大, 但经过标量辐射订正后的结果得到明显改善, 气溶胶光学厚度和地表反射率与真实值之间相关系数都达到 0.99 以上。为提高查找表的计算效率, 提出并建立了反演方案所需要的半参数化数值表, 利用内插方法寻求气溶胶光学厚度和地表反射率的数值解的反演方法。

关键词 气溶胶 反照率 偏振反射率 矢量辐射传输

文章编号 1006-9895(2007)05-0757-09

中图分类号 P422

文献标识码 A

Simultaneously Retrieving Aerosol Optical Depth and Surface Albedo over Land from POLDER's Multi-angle Polarized Measurements

I: Theory and Simulations

DUAN Min-Zheng and LÜ Da-Ren

Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The remote sensing of aerosol optical thickness and surface albedo has long been a challenge in the earth observation since both the atmosphere and surface contribute to the space-borne measurements, and they are difficult to be separated from the measurements, especially over land where radiances from the surface reflectance and atmospheric scattering are comparable. The satellite measured intensities are sensitive to both atmospheric scattering and surface albedo, while polarized radiances are only sensitive to the atmospheric scattering. Based on this principle, the aerosol optical parameters are first given through look-up table method, and then they are corrected with the total intensity measurements. The POLDER (POLarization and Directionality of Earth Reflectance) multi-angle polarized measurements are simulated and then used in retrieval simulations, results show large errors for aerosol optical parameters if only polarized measurements are used in retrieval algorithm, especially for short wavelength channel of

收稿日期 2006-05-08, 2006-07-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40333034、40504022

作者简介 段民征, 男, 1968 年出生, 博士, 目前主要从事气溶胶和云的遥感反演, 矢量辐射传输理论与算法, 超高光谱辐射传输与反演研究等。E-mail: dmz@mail.iap.ac.cn

670 nm, in which multiple scattering effect is relatively strong. The results can be improved if intensities are also be used, and meanwhile surface albedo over land can be given. The statistics show that the correlation coefficients between the retrieved and simulated values, both for aerosol optical depth and surface albedo, are above 0.99. New semi-parameterized look-up tables are also established to speed up the efficiency of retrieval algorithm.

Key words aerosol, albedo, polarized reflectance, vector radiative transfer

1 引言

大气气溶胶和地表反照率及其时空分布是研究地气系统的能量收支、陆气相互作用以及全球变化的重要参量,而遥感反演是获取这些信息的重要手段。气溶胶遥感最简单和最直接的方法就是地基观测太阳直射光消光法,这也是最准确的测量方法。但是,由于地基观测不能满足大尺度乃至全球尺度上实现定量观测的需求,利用卫星资料获取大气气溶胶参数成为必然。与地基消光法对应的天基遥感方法为掩星法,但掩星法因受地表反射和低层大气散射的影响,只适用于平流层或高对流层气溶胶探测。因此,卫星对地观测成为当前地球科学研究应用中的关键手段。人类应用卫星探测气溶胶始于 20 世纪 70 年代中期海上沙尘粒子的探测,之后人们对于利用卫星标量辐射的反演进行了一系列探索,但其成功应用还仅限于海洋上空^[1, 2]或特殊的陆地地表上空^[3~7],一般情况下陆地上空的应用还存在很多困难。

卫星或地基测量的光束是一种带有偏振结构的电磁波,其准确描述可由 Stokes 矢量 (I 、 Q 、 U 、 V) 来表征,一般来说,Stokes 矢量是以散射平面即入射光和散射光方向所在的平面为参考平面,其中 Q 、 U 、 V 三个分量与参考平面的选取方向有关,而线偏光强 $\sqrt{Q^2 + U^2}$ 不随参考平面的旋转而改变^[8]。对于大气辐射而言, V 分量很小,可以不予考虑,这也是 POLDER (POLarization and Directionality of Earth Reflectance) 系列平台中只观测 (I 、 Q 、 U) 三个分量的原因^[8]。关于 Stokes 矢量具体表征和观测方法可以参见文献^[9]。

模拟分析^[10]及观测^[11~13]证明,陆地上空标量辐射对地表反射率变化很敏感,对气溶胶的变化也有一定的敏感性。但是,对于某一类型的气溶胶,当地表反射率为某一数值时,卫星测量的标量反射率对大气气溶胶光学厚度的变化极度不敏感。由此可见,地表和气溶胶对标量辐射的影响非常复杂,

仅应用标量辐射很难获取陆地上空气溶胶精确信息。对于陆地上空的小粒子气溶胶来说,POLDER 的 670 nm 和 865 nm 两个通道的偏振反射率对气溶胶敏感而对地表不敏感^[10, 14]。基于这个原理,人们越来越重视利用偏振信息来探测和提取大气气溶胶参数^[14~17]。Mishchenko 和 Travis^[18]在反演海洋上空的气溶胶时指出,将偏振信息和辐射强度信息联合利用比单独利用其中一种信息进行反演的结果精度要高很多。近几年来,一些含偏振通道的对地探测仪器也陆续发射上天,以提供更高质量的大气气溶胶和地表观测数据,其中以法国空间局 CNES 的 POLDER 最引人注目,至今已有三颗发射上天^①(POLDER I、POLDER II 和 PARASOL)。基于 POLDER 观测的反演结果也逐步被用以更精确地描述气溶胶与云的相互关系及其间接气候效应^[17~19],美国下一代极轨对地环境监测卫星系统 NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System) 中也专门配置了涵盖 0.4~2.4 m 的多通道气溶胶偏振测量仪 APS (Aerosol Polarimeter Sensor),地基气溶胶全球观测网络 AERONET 中的主要仪器 CIMEL 的 870 nm 通道也增加了偏振信息测量。

因此,本文的目标是建立半参数化查找表方法,利用标量和偏振辐射观测实现陆地上空大气气溶胶和地表反射率的同时反演。方案中给出了 Rayleigh 散射的订正方法,这种方法可被用于订正由地形高度引起 Rayleigh 散射的影响。

2 基本原理

对于水平均一的地表和大气模式,在可见光和近红外波段卫星对地观测到的地气系统反射的辐射矢量 (Stokes 参数) $\mathbf{I} = [I, Q, U, V]^T$ 可由矢量辐射传输方程精确描述:

$$\mu \frac{d\mathbf{I}(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = -\mathbf{I}(\tau, \mu, \phi) +$$

① POLDER / ADEOS-I 和 POLDER / ADEOS-II 分别于 1997 年 6 月和 2003 年 10 月出现故障。

$$\frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\tau, \mu, \phi; \mu', \phi') \mathbf{I}(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' + \frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp(-\tau/\mu_0) \mathbf{M}(\tau, \mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) \cdot [1, 0, 0, 0]^T, \quad (1)$$

当只考虑 I 分量时即得到一般的标量辐射传输方程。上式右边第二项为单次散射的贡献, 第三项为多次散射的贡献。式中上标 T 表示转置矩阵; μ 为极角余弦, 向下为正, 向上为负; ϕ 为相对于太阳出射光线的方位角; τ 为光学厚度; ω 为单次散射反照率; F_0 大气顶太阳入射辐射通量; μ_0, ϕ_0 为太阳天顶角的余弦和方位角; \mathbf{M} 为 4×4 阶散射相矩阵, 又称 Mueller 矩阵。

目前, 对于矢量辐射传输方程式 (1) 的数值解法主要有 Monte-Carlo^[20] 方法、离散坐标法 VDIS-ORT^[21]、倍加累加法 RT3^[22] 和逐次散射法^[23], 本文采用改进后的 Evans&Stephens 倍加累加法^[22] 矢量辐射传输模式^[24~26]。其基本原理是: 将整层大气分为 N 层, 则同一层内可以看作均匀大气, 再将各层分为 2^n 薄层 (n 由各分层的光学厚度确定), 则每薄层的反射矩阵和透射矩阵相同, 因而各分层内可采用倍加法计算, 分层间采用倍加法, 从而可提高计算效率。

反演方案所需要的总反射率 R_I 和偏振反射率 R_p 定义为

$$R_I = \frac{\pi I}{\mu_0 F_0}, \quad (2)$$

$$R_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_0 F_0}. \quad (3)$$

由于总反射率 R_I 和偏振反射率 R_p 与气溶胶之间的定量关系没有可以描述的分析解, 也没有简单的函数关系, 因此, 我们采用了常用的查找表法求解。但与常规查找表法不同的是, 我们利用半参数化数值表和内插法寻找最优解以提高计算效率和精度。

3 半参数化数值表的建立

查找表法即由辐射传输模式对一系列大气条件 (Rayleigh 散射、气溶胶光学特性) 和地表反射率条件进行模拟计算, 预先给定这些条件与辐射矢量的对应关系表, 然后由辐射测量与模拟的辐射矢量相比较, 最接近的计算条件即为所求的解。即对一组计算条件 V_i 、观测方式 Ω_j 、观测值 $f_{\text{obs}}(V_i, \Omega_j)$ 、

模式计算值 $f_{\text{cal}}(V_i, \Omega_j)$, 则观测与模式计算的平方差 δ_i 达到最小的 V_i 即为所求的解, 其中:

$$\delta_i = \sum_{j=1}^N [f_{\text{obs}}(V_i, \Omega_j) - f_{\text{cal}}(V_i, \Omega_j)]^2. \quad (4)$$

为提高解的准确度, 这些参数必须以很小的增量进行辐射传输计算, 这为数值表的建立带来很大困难, 同时庞大的数值表造成查找计算需花费大量时间以寻找符合条件的解, 即使在计算机技术高度发展的今天, 庞大的多参数数值表仍然是一个计算负担。

因此, 为提高计算效率, 必须在不降低计算精度的条件下将数值表进行简化, 因而, 我们考虑建立半参数化的数值表, 即能够用参数化表示的变量仅仅存储其参数, 不能用参数化表示的参量, 考虑到矢量辐射随计算条件的连续缓慢变化, 将计算参数的增量增大, 从而缩小数值表的体积。下面将详细介绍半参数化数值表的具体过程

3.1 气溶胶参数的选取

考虑陆地地表上空气溶胶主要为两类: 一类为吸收较小的乡村型气溶胶, 另一类为吸收较大的城市型气溶胶粒子, 这两种气溶胶粒子尺度均属于小粒子范围^[27], 其在可见光波段内的复折射指数实部为 1.53 左右, 因此计算中选取 1.50 和 1.53 两个复折射指数实部, 虚部从 0.0 到 0.025 之间变化, 步长 0.005, 气溶胶粒子尺度谱选用对数正态谱, 粒子的有效半径取 0.1 到 0.5 之间, 步长 0.05, 有效方差取 0.1、0.2, 气溶胶散射相函数由 Mie 散射模式^[28] 得到。

3.2 Rayleigh 散射

Rayleigh 散射是随气压或者地形高度而变化的, 在较短时间范围内, 局地 Rayleigh 散射变化很小, 而主要由海拔高度决定。考虑到中国华北大部分地区位于海拔 3 km 以下, 海拔 3 km 高度的 Rayleigh 散射大约为海平面的 70% 左右。敏感性分析已经证明^[10], 在这个范围内由卫星测量的总反射率和偏振反射率随 Rayleigh 散射呈线性变化。因此, 建立半参数化数值表时选取了标准和 70% 的标准大气 Rayleigh 散射两种情况, 其它 Rayleigh 散射时的辐射矢量由这两点数值线性内插得到。

3.3 地表反照率

对 670 nm 和 865 nm 通道而言, 偏振反射率对地表反射率的变化极度不敏感, 因此, 在进行矢量

计算时并未考虑地表反射率的变化;标量辐射计算时,考虑了 0.0、0.1、0.2、0.3、0.5、0.8 六种情况,这六种地表反射率情况对于标量辐射的拟合精度已经足够^[5, 10],数值表中存储的为地表反射率的拟合系数,这样就大大缩减了查找表,从而提高反演计算效率。

3.4 大气及气溶胶分层模式

将整层大气分为三层(如图 1),0~2 km、2~10 km 和 10 km 以上,对 670 nm 气溶胶光学厚度分别取 0.0~1.0,对 865 nm 气溶胶光学厚度取 0.0~0.7,步长为 0.05,其垂直分布取为随高度指数递减,标高取为 2 km,这也是实际大气情况。分子散射的各层光学厚度由标准大气模式得到。

3.5 计算模式及方法

为提高计算效率,我们选取了两个辐射传输模式,一是由 Evans 和 Stephens^[22]发展的,经韩志刚^[24]、段民征和吕达仁^[25, 26]改进的倍加累加法矢量辐射传输模式,此模式用来计算偏振反射率;二是由 Stamnes 等^[29]发展的离散坐标法标量辐射传输模式(DISORT),用来计算大气顶标量辐射强度。这两个模式在 670 nm 和 860 nm 波段的标量辐射强度的计算结果差 < 2%,这个差别不会引起较大反演误差。另外,为提高计算精度和速度,在矢量和标量辐射传输计算中采用了段民征和吕达仁^[25, 26]提出的高效、快速计算方法。

由于大气分层的每一层均为 Rayleigh 散射与气溶胶散射的共同作用,因此,混合大气的散射相矩阵、单次散射反照率和光学厚度由下式计算:

$$\tau = \tau_m + \tau_a + \tau_{\text{abs}}, \quad (5)$$

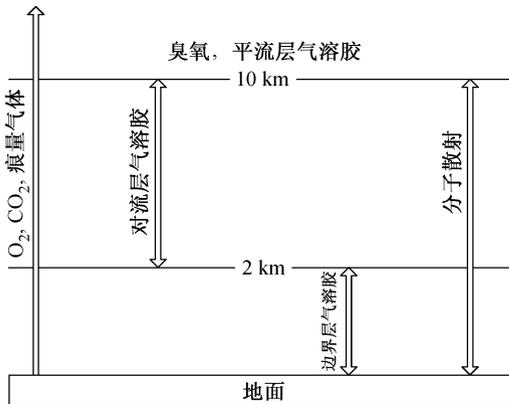


图 1 大气分层及起主要作用的成分示意图

Fig. 1 Diagram of three layer structure of atmosphere and the primary compositions

$$\omega = (\tau_m + \omega_a \tau_a) / \tau, \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = (\tau_m \mathbf{P}_m + \omega_a \tau_a \mathbf{P}_a) / (\tau_m + \omega_a \tau_a), \quad (7)$$

式中, τ 、 ω 、 \mathbf{P} 分别为光学厚度、单次散射反照率和散射相矩阵,下标 m、a、abs 分别代表分子、气溶胶和吸收气体。

数值表计算时取太阳天顶角分别为 30°、45°和 60°,输出天顶角为 12 个 Double-Gauss 节点,方位角相对于太阳的 0°、45°、90°、135°、180°共 5 个方位角,由于反演所需要总反射率 R_I 与标量辐射 I 成正比,偏振反射率 R_p 与 $\sqrt{(Q^2 + U^2)}$ 成正比,并且二者具有如下对称关系:

$$\begin{cases} R_I(\mu, -\phi) = R_I(\mu, \phi), \\ R_p(\mu, -\phi) = R_p(\mu, \phi). \end{cases} \quad (8)$$

因此,方位角 180°~360°的总反射率与偏振反射率可由 0°~180°的值计算得到。完成辐射传输计算后,将计算结果分别整理为偏振反射率表和总反射率表,其中总反射率表为按下式拟合后的系数 $I_{\text{path}}(\mu, \phi)$ 、 $C_1(\mu, \phi)$ 、 $C_2(\mu, \phi)$, 即:

$$R_I(\mu, \phi) = I_{\text{path}}(\mu, \phi) + C_1(\mu, \phi)A + C_2(\mu, \phi)A^2, \quad (9)$$

其中, A 为地表反射率,为书写方便省去了参量 μ_0 和 τ 。

4 反演方案

半参数化数值表建立后,就可利用偏振反射率测量和总反射率测量进行查表计算大气气溶胶和地表反射率,而气溶胶参数的获得将是关键的一步。由于偏振辐射主要来自于大气散射贡献,近似与地表反射无关^[10]。另外,多次散射具有退偏作用,而大散射角条件下多次散射作用较强,从而使得偏振信息对气溶胶光学厚度缺少可标示性,因此,当利用偏振反射率反演陆地上空气溶胶时,不宜利用多次散射作用较强的大散射角方向的测量信息。Herman 等^[30]给出了偏振反射率与散射角的关系(图 2),从中也可以得出相同的结论。基于这个原理,我们认为,利用偏振反射率进行查表计算时应选取散射角小于 135°的观测。

由于反演过程不一定唯一,由多个观测角度偏振反射率查表得到的气溶胶解可能是多解过程,因此,我们称其解为可能解。然后,将每个气溶胶可能解应用于由总反射率计算地表反射率,并对气溶胶的可能解作进一步的筛选,具体步骤如下:

(1) 选取散射角 $< 135^\circ$ 范围的偏振反射率观测值 $R_p^{obs}(\mu_i, \phi_i)$ 。

(2) 对每一个 $R_p^{obs}(\mu_i, \phi_i)$ 查表搜索其所位于的 R_p 区间, 即

$$R_p(\tau_1, \mu_i, \phi_i) < R_p^{obs}(\mu_i, \phi_i) < R_p(\tau_2, \mu_i, \phi_i). \quad (10)$$

(3) 利用二次插值求 τ , 使

$$R_p^{obs}(\mu_i, \phi_i) = R_p(\tau, \mu_i, \phi_i). \quad (11)$$

则 τ 为由 (μ_i, ϕ_i) 方向的观测得到的解, 记为 τ^i 。

(4) 如果 $\max(\tau^i) - \min(\tau^i) < \epsilon$, 则 $\tau^j = \tau^i$ 为可能解。

(5) 变换气溶胶模式, 重复步骤 2 和 4。

利用上述步骤所得即为气溶胶参数的可能解, 可能解中可能包含不符合条件的多解, 因此, 还必须经标量辐射的进一步筛选。

(6) 利用上述气溶胶可能解 τ^j , 计算 τ^j 所在区间 τ_1 和 τ_2 , 使 $\tau_1 < \tau < \tau_2$, 根据归一化总反射率的观测角度 (μ_i, ϕ_i) 和反演得到气溶胶类型 (包括气溶胶复折射指数、粒子有效半径和有效方差), 利用二次插值求得参数 $I_{path}(\mu_i, \phi_i)$ 、 $C_1(\mu_i, \phi_i)$ 和 $C_2(\mu_i, \phi_i)$ 。

(7) 根据(9)式, 可得:

$$R_p^{obs}(\mu_i, \phi_i) = I_{path}(\mu_i, \phi_i) + C_1(\mu_i, \phi_i)A + C_2(\mu_i, \phi_i)A^2, \quad (12)$$

从而可得地表反射率 A , 记为 A^i ,

$$A^i = \frac{1}{2C_2(\mu_i, \phi_i)} \left\{ -C_1(\mu_i, \phi_i) + \right.$$

$$\left. \sqrt{C_1^2(\mu_i, \phi_i) - 4C_2(\mu_i, \phi_i)[I_{path}(\mu_i, \phi_i) - R_p^{obs}(\mu_i, \phi_i)]} \right\}. \quad (13)$$

(8) 如果解 A^i 存在且 $0 < A^i < 1$, 则 A^i 和 τ^i 是所求的解, 否则滤掉。

(9) 对每一个观测方向的辐射测量重复步骤 7 和 8, 如果对所有方向 A^i 存在, 则可得地表反照率:

$$A^j = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i A^i}{\sum_{i=1}^N \mu_i}. \quad (14)$$

(10) 对所有 τ^j 重复步骤 6~9, 地表反照率 A 和气溶胶光学厚度 τ 由下式给出:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^N A^j}{N}, \quad (15)$$

$$\tau = \frac{\sum_{j=1}^N \tau^j}{N}, \quad (16)$$

其中, N 为步骤 9 得到的解的个数。

5 模拟反演及结果分析

为考查上述方案的可行性, 我们利用倍加累加法矢量辐射传输模式模拟了 POLDER 辐射计 670 nm 和 865 nm 两个通道的矢量辐射观测。

模拟观测的计算条件为: 大气模式取标准大气, 气溶胶粒子折射指数实部取 1.50 和 1.53, 虚部取 0.0 和 0.025, 粒子有效半径取 0.15, 有效方差为 0.1 和 0.4, 共 8 种气溶胶类型。太阳天顶角取 35° 和 45° , 与建立数值表时是不同的。对于 670 nm 通道, 气溶胶光学厚度分别取 0.08、0.14、0.28、0.42、0.56、0.70、0.84、0.98, 共 8 种气溶胶浓度; 对于 865 nm 通道, 气溶胶光学厚度分别取 0.07、0.12、0.24、0.36、0.48、0.60, 共 6 种气溶胶浓度, 以区别于建立数值表时的气溶胶光学厚度值, 地表反照率为 0.05、0.20、0.35、0.50、0.65, 共 5 种地表反照率条件, 也区别于数值表中的参数。由以上可知, 模拟观测与数值表建立时的计算条件不同, 是完全独立的。

图 3 为由方案步骤 1~5 利用偏振反射率反演的 670 nm 和 865 nm 的气溶胶光学厚度值, 可以看到, 大部分结果与模拟真实值是比较接近的, 尤其是对 865 nm 通道, 反演结果更理想一些, 但对于散射作用较强的 670 nm 通道来说, 有些结果远远偏离真实值, 还存在很大误差。表 1 为太阳天顶角 (θ_0) 为 35° 和 55° 时的反演的统计分析, 可以看到, 对 670 nm 通道, 太阳天顶角 35° 时反演结果与原始

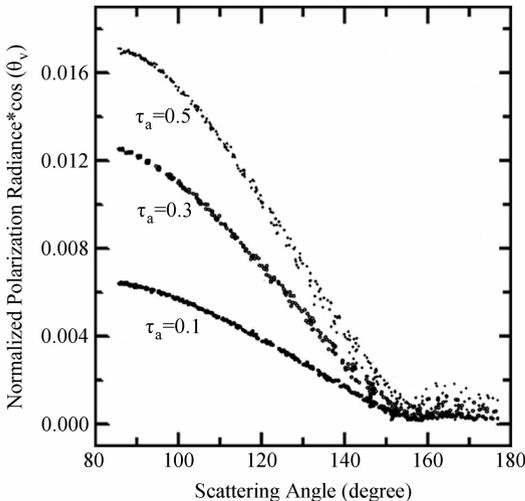


图 2 偏振反射率与散射角的关系(引自文献[30])。横坐标: 散射角; 纵坐标: 归一化偏振反射率与观测天顶角余弦的乘积
 Fig. 2 Polarized reflectance vs. scattering angle (from reference [30])

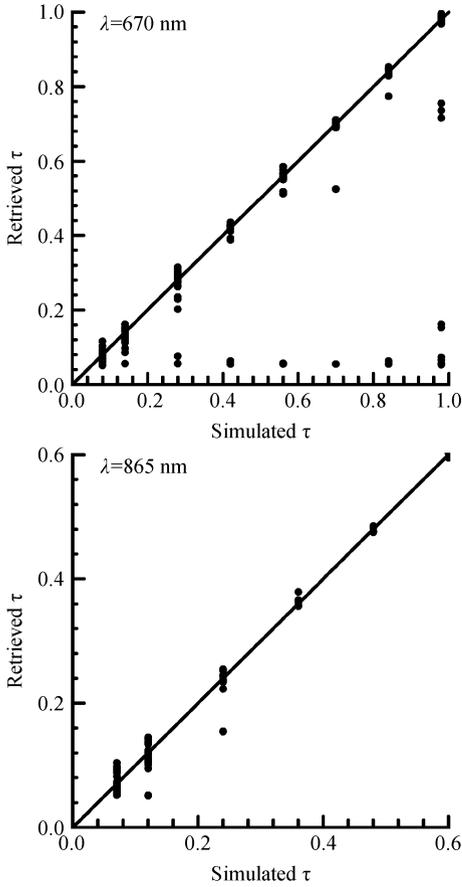


图3 气溶胶光学厚度的模拟反演结果(未作标量辐射订正)
Fig. 3 Retrieved aerosol optical depth vs. "true optical depth"
(before correction)

表1 气溶胶反演结果的统计分析(未作标量辐射订正)

Table 1 Statistics of aerosol retrievals (before correction)

波长 (λ)	θ_0	样本数	偏差	相关系数
670 nm	35°	200	0.05285	0.98591
	55°	202	0.22531	0.75701
865 nm	35°	100	0.01763	0.99580
	55°	106	0.00801	0.99942

值的相关系数0.98, 平均偏差0.05左右, 但是太阳天顶角55°时平均偏差达0.22, 相关系数只有0.75。而对于865 nm通道来说, 两个太阳天顶角时的平均反演误差小于0.02, 相关系数大于0.99, 精度比较高。太阳天顶角55°时670 nm通道反演结果较大的原因在于多次散射作用较强, 多解的出现引起较大误差。因此, 单纯由偏振反射率获得的气溶胶解还必须利用标量辐射作进一步订正。

图4为应用方案步骤6~9和标量辐射订正后

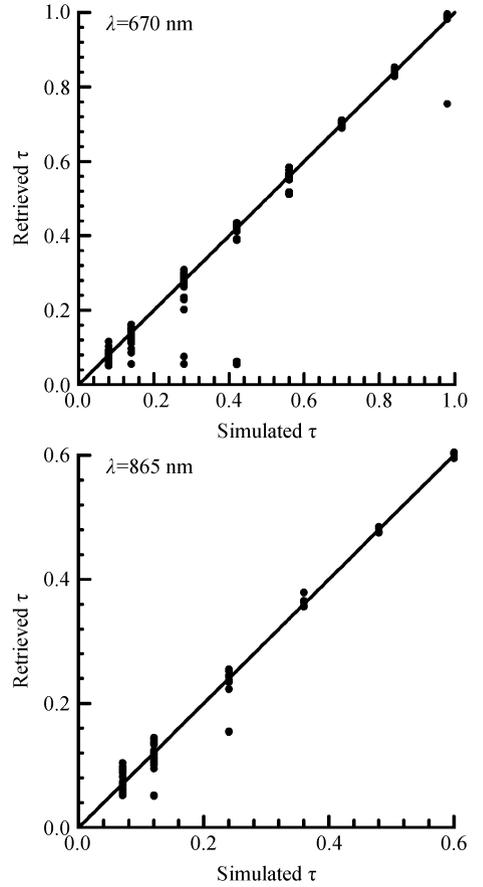


图4 作标量辐射订正后气溶胶光学厚度的模拟反演结果
Fig. 4 Retrieved aerosol optical depth vs. "true optical depth"
(after correction)

表2 作标量辐射订正后气溶胶和地表反照率反演结果的统计分析

Table 2 Statistics of aerosol optical depth and surface albedo retrievals (after correction)

波长 (λ)	θ_0	样本数	光学厚度 τ		地表反照率 A	
			偏差	相关系数	偏差	相关系数
670 nm	35°	969	0.03996	0.99166	0.01157	0.99850
	55°	825	0.01351	0.99904	0.01335	0.99803
865 nm	35°	500	0.01763	0.99580	0.01053	0.99878
	55°	530	0.00801	0.99942	0.00820	0.99934

的气溶胶光学厚度反演结果, 与图3比较可知, 经过标量辐射订正后的结果得到明显改善。表2列出了反演结果的统计分析, 670 nm和865 nm的气溶胶光学厚度订正后相关系数都达到0.99以上, 平均偏差明显减小, 尤其是当太阳天顶角55°时, 670 nm的气溶胶光学厚度偏差由原来的0.22减小到

0.04, 相关系数由原来的 0.75 上升到 0.99 以上。

表 3 为气溶胶参数的反演结果的统计分析, 可见对于确定气溶胶光学性质的四个参数(复折射指数的实部 M_r 和虚部 M_i , 粒子尺度谱的有效半径 R_{eff} 和有效方差 V_{eff}) 的反演虽然还有一些误差, 但其平均偏差在可允许范围内。

一旦气溶胶光学厚度及其参量确定以后, 就可

表 3 反演的气溶胶参数的统计分析

Table 3 Statistics of aerosol optical parameters retrievals

参数	实验	$\lambda=670$ nm		$\lambda=865$ nm	
		真实值	反演值	真实值	反演值
M_r	实验 1	1.500	1.501	1.500	1.506
	实验 2	1.530	1.526	1.530	1.523
M_i	实验 1	0.000	0.002	0.000	0.002
	实验 2	0.025	0.022	0.025	0.022
R_{eff}	实验 1	0.150	0.150	0.150	0.150
V_{eff}	实验 1	0.100	0.101	0.100	0.107
	实验 2	0.400	0.397	0.400	0.392

由步骤 6~9 及标量辐射测量确定地表反照率, 模拟反演结果如图 5, 其统计分析结果也列于表 2 中, 可见反演结果与真实值之间的线性相关非常好, 相关系数达到 0.99 以上, 偏差小于 0.02。

6 结论

本文从实用性、计算时效性的角度提出建立半参数化查找表的反演方案, 并且利用倍加累加法矢量辐射传输模式建立偏振反射率与气溶胶参量的数值关系表, 而利用标量辐射传输模式 (DISORT) 建立总反射率与气溶胶参量和地表反照率相对应的参数化表。建立查找表的辐射传输计算中高效快速的计算方法, 大大提高了计算速度和精度。

为避免数值表过于庞大, 还考虑应用矢量辐射 (包含偏振反射率和总反射率) 随大气光学厚度的缓变性, 只建立有限个气溶胶光学厚度的数值表, 然后应用二次插值方法寻求数值解, 从而大大减小了查找表的规模和缩短了查找表的计算和查表时间。

模拟反演结果证明所建立的数值表和反演方案可行, 但对于散射作用较强的 670 nm 通道, 单纯利用偏振反射率提取气溶胶信息的误差较大, 如当太阳天顶角为 55° 时, 670 nm 通道气溶胶光学厚度反演值与“真实值”的相关只有 0.75。因此, 这些结果还必须配合标量辐射作进一步订正, 订正后的结果误差明显减小, 相关系数由 0.75 增加到 0.99 以上。气溶胶其它参数反演结果证明, 此反演方案对气溶胶复折射指数、粒子有效半径和有效方差反演也是可行的。

应当说明的是, 此方案只是初步实验, 方案中未考虑地表偏振反射的影响, 虽然观测实验证明了地表偏振反射很小, 但利用地表覆盖植被类型, 建立分类地表全矢量反射模型, 将此矢量反射模式应用到反演中, 使此反演方案应用范围更广。另外, 限于篇幅, 文中并未涉及有关气溶胶参数、地表反射及大气分层结构对反演结果的敏感性分析, 有关这方面的内容将另文论述。

参考文献 (References)

[1] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J. Atmos. Sci.*, 1990,

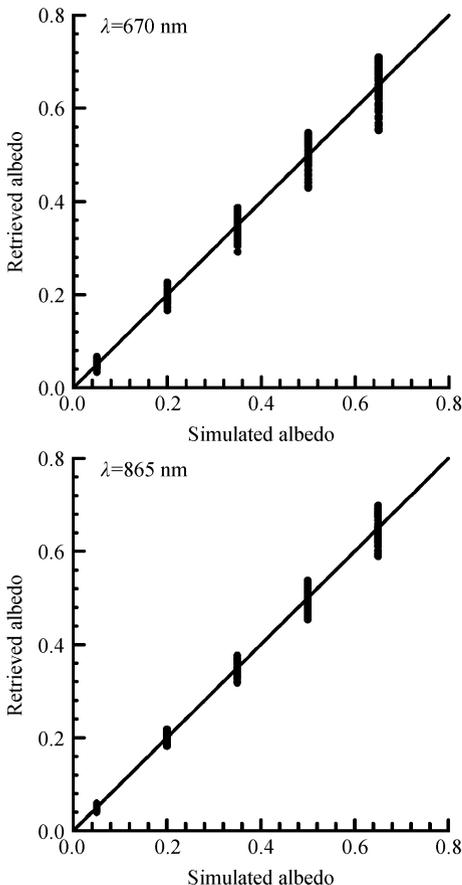


图 5 地表反照率的模拟反演结果

Fig. 5 Retrieved surface albedo vs. “true surface albedo”

- 47: 1878~1893
- [2] Higurashi A, Nakajima T. Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA / AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 924~941
- [3] Fraser R S, Kaufman Y J, Mahoney R L. Satellite measurements of aerosol mass and transport. *Atmos. Environ.*, 1984, **18**: 2577~2584
- [4] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for atmospheric correction. *Int. J. Remote Sens.*, 1988, **9**: 1357~1381
- [5] 吕达仁, 段民征. 卫星对地观测中大气与地表辐射贡献的参数化. *大气科学*, 1998, **22**: 638~648
Lü Daren, Duan Minzheng. Parameterization of radiance from surface and the atmosphere in earth observation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 638~648
- [6] Qiu Jinhuan. A method for space-borne synthetic remote sensing of atmospheric aerosol optical depth and vegetation reflectance. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, **15**: 17~30
- [7] 段民征, 吕达仁, 崔克俭, 等. 利用云下阴影实现陆地上空气溶胶和地表反射率的同时反演: 1. 理论方法和模拟. *遥感学报*, 2002, **6** (5): 321~327
Duan Minzheng, Lü Daren, Cui Kejian, et al. Retrieval of surface reflectance and aerosol optical thickness simultaneously from space measurement over land: Basic theory and simulation. *J. Remote Sensing* (in Chinese), 2002, **6** (5): 321~327
- [8] Bréon F M. Parasol Level-1 Product Data Format and User Manual. CNES, Paris, 2005. 2~8
- [9] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmosphere. *Space Science Review*, 1974, **16**: 527~610
- [10] 段民征. 陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时反演——卫星标量辐射和偏振信息的联合利用. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2001
Duan Minzheng. Simultaneously retrieval of atmospheric aerosol optical thickness and surface albedo over land by using polarized radiance as well as scalar radiance from POLDER measurement. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 2001
- [11] Rondeaux G, Herman M. Polarization of light reflected by crop canopies. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **38**: 63~75
- [12] Santer R X, Gu X F, Guyot G, et al. SPOT calibration at the La Crau test site (France). *Remote Sens. Environ.*, 1992, **41**: 68~75
- [13] Bréon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. Polarized reflectance of bare soils and vegetation: Measurements and models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1995, **33** (2): 487~499
- [14] 邱金桓, 陈洪滨, 王普才, 等. 大气遥感研究展望. *大气科学*, 2005, **29** (1): 131~136
Qiu Jinhuan, Chen Hongbin, Wang Pucui, et al. A prospect on future atmospheric remote sensing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 131~136
- [15] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS 1 polarized measurements. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D5): 4913~4926
- [16] Sano I. Optical thickness and angstrom exponent of aerosols over the land and ocean from space-borne polarimetric data. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**: 833~837
- [17] Vachon F, Royer A, Aube M, et al. Remote sensing of aerosols over North American land surfaces from POLDER and MODIS measurements. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 3501~3515
- [18] Mishchenko M I, Travis L D. Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16989~17013
- [19] Quaas J, Boucher O. Constraining the first aerosol indirect radiative forcing in the LMDZ GCM using POLDER and MODIS satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L17814, doi:10.1029/2005GL023850
- [20] 吴北婴, 吕达仁. 用 Monte-Carlo 方法模拟火山爆发后的曙暮光特征. *大气科学*, 1989, **13**: 204~213
Wu Beiyong, Lü Daren. Monte-Carlo simulations of twilight characteristics after El Chichon eruption. *Chinese Journal of Atmospheric Science (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1989, **13**: 204~213
- [21] Schulz F M, Stamnes K, Weng F. VDISORT: an improved and generalized discrete ordinate method for polarized (Vector) radiative transfer. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1999, **61** (1): 105~122
- [22] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1991, **46** (5): 413~423
- [23] Min Qilong, Duan Minzheng. A successive order of scattering model for solving vector radiative transfer in the atmosphere. *J. Quant. Spect. Radiat. Transfer.*, 2004, **87**: 243~259
- [24] 韩志刚. 草地上空对层流气溶胶特性的卫星偏振遥感——问题模式系统和反演初步实验. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999
Han Zhigang. Aerosol retrievals over steppe with POLDER data—simulation model system and preliminary tests. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1999
- [25] 段民征, 吕达仁. 矢量辐射传输方程求解中的 δ -M 方法. *自然科学进展*, 2007, **17** (3), 65~70
Duan Minzheng, Lü Daren. δ -M method for vector radiative transfer. *Progress in Natural Science*, 2007, **17** (3): 65~70
- [26] 段民征, 吕达仁. 适用于遥感应用的辐射传输高精度快速计

算方法. 遥感学报, 2007, **11** (3): 359~366

Duan Minzheng, Lü Daren. Rapid yet accurate radiative transfer algorithm for remote sensing application. *Journal of Remote Sensing*, 2007, **11** (3): 359~366

[27] Lenoble J, Brogneiz C. A comparative review of radiation models. *Contr. Atmos. Phys.*, 1984, **57** (1): 1~20

[28] Wiscombe W J. Mie scattering calculations—advances in technique and fast, vector-speed computer codes. NCAR Technical Note TN-140+STR, National Center For Atmos-

pheric Research, Boulder, Colorado. 1996

[29] 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

[30] Herman M, Deuze J L, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces including polarization measurements and application to POLDER measurements. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D14): 17039~17049