# 气溶胶光学特性偏振遥感反演算法

孙 夏 赵慧洁

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191)

**摘 要**：陆地上空大气顶的辐射主要由大气散射和地表反射组成，一般地表反射的贡献要大于大气散射的贡献，使得陆地上空气溶胶的特性提取非常困难，而偏振信息只强烈依赖于散射粒子的特性，发展基于偏振信息的气溶胶反演方法是非常有效的. 通过对矢量辐射传输方程求解进行研究，基于倍加累加法矢量辐射传输模式分析影响气溶胶反演的主要因素，确定多维参数查找表建立方法，利用 POLDER(Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)提供的反射率和偏振反射率数据，发展了一种利用反射率和偏振反射率查找表迭代查找反演气溶胶光学参数和地表反射率的算法，实现了对北京、香河、Dalanzadgad 观测站上空气溶胶光学厚度、粒子半径、折射指数和地表反射率的反演. 用 AERONET(Aerosol Robotic Network)地基数据对反演结果进行了验证.

**关 键 词**：偏振；气溶胶；矢量辐射传输；地球反射偏振与方向性探测器

**中图分类号**：TP 79

**文献标识码**：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)08-1027-04

# Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol using polarized remote sensing

Sun Xia Zhao Huijie

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: The upwelling radiances at the top of the atmosphere consist of both atmospheric scattering and ground surface reflection. In general, the latter is larger than the former over the land. This makes the extraction of aerosols over land very difficult. It is known that polarization features strongly depend on characteristics of scattering particles. So it is efficient that to retrieve the aerosol characteristics over land area by using this polarization information. Based on the theory of vector radiative transfer algorithms, the relationship of the aerosol's properties with parameters in the vector radiative transfer mode was analyzed and the algorithm of look-up table method was confirmed. Using the multi-angle data of polarization and radiance of the polarization and directionality of the earth's reflectances(POLDER), an algorithm that estimates the aerosol optical properties and surface albedo was developed based on radiance and polarization look-up table with an iterative method. The aerosol optical thickness, efficient radius, refractive index and surface albedo over the Beijing, Xianghe and Dalanzadgad stations were retrieved. The obtained results were validated with the aerosol robotic network (AERONET) measurements.

**Key words**: polarization; aerosols; vector radiative transfer; polarization and directionality of the earth's reflectances(POLDER)

气溶胶是大气的重要组成部分，对大气环境、 气候辐射和光在大气中的传输等有重要的影响，

**收稿日期**：2008-07-03

**基金项目**：中国国土资源航空物探遥感中心基金资助项目(1212010816033)；中国地质调查局科研资助项目(1212030616010)

**作者简介**：孙 夏(1983—)，女，硕士生，甘肃金昌人，sunxia2006@tom.com.

研究大气气溶胶对深入了解全球辐射收支平衡、气候研究以及促进全球污染控制具有重要的科学意义.气溶胶特性遥感方法有地基遥感和卫星遥感,地基遥感由于受到观测站点的限制难以实现全球化观测,而卫星遥感技术的发展,使人们能够获得全球范围内的气溶胶信息.国外卫星遥感气溶胶的研究始于20世纪70年代中期,目前利用卫星遥感气溶胶已经形成了一个非常丰富的研究体系,已发展的气溶胶反演的方法主要有暗像元法[1],多角度多通道遥感法[2],结构函数法[3],基于地表模型的方法[4],直方图匹配法[5]以及偏振遥感法[6]等.对于陆地上空气溶胶反演来说,由于标量辐射对地表反射率和气溶胶光学厚度都很敏感,因此利用标量反演方法不易区分两者的差别.而偏振辐射只对气溶胶粒子特性敏感,偏振信息有助于气溶胶特性的提取,可以更好的反演气溶胶的光学特性.法国空间研究中心研制的POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)为全球气溶胶的反演提供了多角度辐射和偏振信息,利用偏振信息反演气溶胶和地表反射率的方法越来越受到人们的关注,本文就是利用POLDER多角度辐射偏振数据,对陆地上空气溶胶特性和地表反射率反演方法进行了研究.

## 1 偏振遥感探测原理

用斯托克斯矢量完整的表示辐射,辐射的传输和能量的再分配可以由矢量辐射传输方程描述,一般表述形式如下[7]:

$$\mu\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}(\tau,\mu,\phi)}{\mathrm{d}\tau}=-\boldsymbol{I}(\tau,\mu,\phi)+\frac{\omega(\tau)}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{1}\boldsymbol{M}(\tau,\mu,\phi,\mu',\phi')\boldsymbol{I}(\tau,\mu',\phi')\mathrm{d}\mu'\mathrm{d}\phi'+\frac{\omega(\tau)}{4\pi}\boldsymbol{M}(\tau,\mu,\phi,\mu_0,\phi_0)F_0\mathrm{e}^{-\tau/\mu_0}\tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{I}=[I,Q,U,V]$为斯托克斯矢量,$I$为光波的总强度,$Q$为0°方向与90°方向上的线偏振光的强度差,$U$为45°方向与135°方向上的线偏振光的强度差,$V$为圆偏振光强度;$\mu,\mu'$分别为散射光和入射光的天顶角余弦;$\phi,\phi'$分别为散射光和入射光的方位角;$\tau$为光学厚度;$\omega$为单次散射反照率;$F_0$为地外太阳辐射通量;$\mu_0$为太阳天顶角余弦;$\phi_0$为太阳方位角;$\boldsymbol{M}$为散射相矩阵.

对于复杂的散射相矩阵,必须使用数值的方法求解方程(1),一般方位角独立于斯托克斯矢量,相矩阵可以分解为Fourier级数,将方位角分离.对散射相矩阵做Legendre多项式展开,将方程进行离散化,对天顶角的积分改为离散求和,最终将辐射传输方程转化为一系列与天顶角、方位角独立的矢量微分方程,形式如下:

$$\mu\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{I}^m(\tau,\mu_i)}{\mathrm{d}\tau}=-\boldsymbol{I}^m(\tau,\mu_i)+\sum_{\substack{j=-N\\ j\neq 0}}^{N}\frac{\omega(\tau)}{4}\cdot[\boldsymbol{M}^m(\tau,\mu_i,\mu_j)\boldsymbol{I}^m(\tau,\mu_j)]W_j+\frac{\omega(\tau)}{4\pi}\boldsymbol{M}^m(\tau,\mu_i,\mu_0)F_0\mathrm{e}^{-\tau/\mu_0}\tag{2}$$

其中,$m$为Fourier展开阶数;$\mu_i,\mu_j$为高斯分割点;$W_j$为高斯积分加权系数.然后利用倍加累加法由以上方程求解矢量辐射传输方程.

## 2 查找表构建

气溶胶的反演研究是基于辐射传输模型的,由于求解辐射传输方程非常复杂,目前使用查找表法是一种既能保证计算精度又能加快计算速度的方法.为建立气溶胶反演的查找表,用大气矢量辐射传输模型进行正向模拟计算,对影响气溶胶光学参数反演的主要因素进行分析.所用矢量辐射传输模型是倍加累加法求解矢量辐射传输模式RT3[8].

### 2.1 影响因素分析

在利用倍加累加矢量辐射传输模式计算时,大气顶的总反射率和偏振反射率计算使用的是平行平面大气和均一地表边界假设,大气模式为中纬度春夏大气模式,主要对臭氧和水汽吸收进行校正.臭氧根据臭氧总量气象探测卫星提供的同温层臭氧柱状含量校正,水汽吸收的校正使用经验公式,气溶胶尺度分布函数用$\Gamma$分布表示[9].

1) 地表反射率的影响

设置气溶胶粒子有效半径为0.15 μm,有效方差为0.2,太阳天顶角为45°,观测天顶角为30°,$\tau$分别为0.05,0.20,0.70.

反演所用总反射率$R_\mathrm{I}$,偏振反射率$R_\mathrm{P}$为

$$R_\mathrm{I}=\frac{\pi I}{\mu_0 F_0}\tag{3}$$

$$R_\mathrm{P}=\frac{\pi\sqrt{Q^2+U^2}}{\mu_0 F_0}\tag{4}$$

观察图1中$R_\mathrm{I}$和$R_\mathrm{P}$与地表反射率$a$的变化关系,可以看出随$a$增加$R_\mathrm{I}$很快增大,对$a$的变化很敏感,当相对方位角为0°时,$R_\mathrm{P}$几乎不随$a$的变化而变化,说明$R_\mathrm{P}$对地表变化不敏感.

研究发现,如果相对方位角过大,由于大散射角方向多次散射作用较强,$R_\mathrm{P}$将随$a$的变化而变化.因此,利用偏振辐射反演气溶胶光学特性时,

应避开大散射角方向辐射.

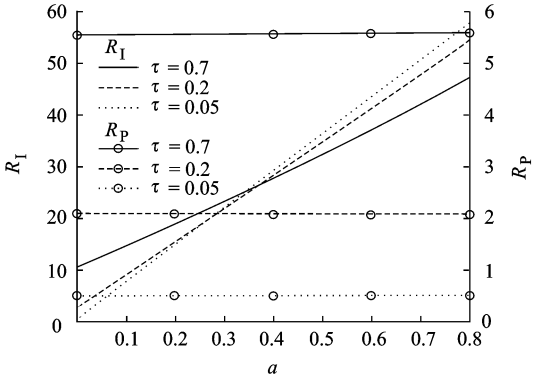


图 1　不同 $\tau$ 时 $R_I$ 和 $R_P$ 与 $a$ 的变化关系

2) 观测几何位置的影响

观察图 2 中 $R_I$ 和 $R_P$ 与观测几何角度的关系.随着观测天顶角 $\theta$ 的减小,$R_I$ 减小,曲线弯曲特征越不明显,$R_I$ 的最小值对应的相对方位角 $\phi-\phi_0$ 越大.

随着 $\theta$ 减小,$R_P$ 减小,曲线弯曲程度减小,$\phi-\phi_0$ 为 0°和 180°时对应的 $R_P$ 差值减小.

由于 $\theta$,$\phi-\phi_0$ 的增大,使光在大气中传播的路径增加,使得大气散射效应增强.因此,观测几何条件是气溶胶反演中必不可少的参数.

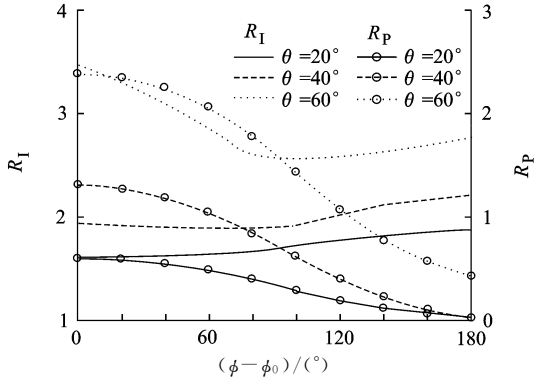


图 2　观测几何角度与 $R_I$ 和 $R_P$ 的变化关系

3) $\tau$ 和气溶胶模式的影响

如图 1,随着 $\tau$ 的改变,$R_P$ 变化很快,对 $\tau$ 的变化很敏感,因此利用 $R_P$ 可以定量反演气溶胶.

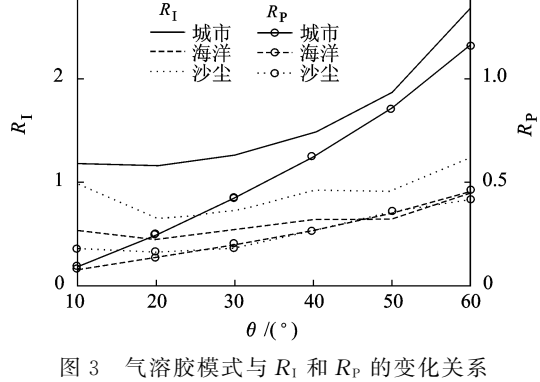


图 3　气溶胶模式与 $R_I$ 和 $R_P$ 的变化关系

如图 3 所示,当 $\tau$ 较小时,对于 $R_I$ 和 $R_P$,沙尘模式与海洋模式气溶胶之间的平均绝对误差较小,沙尘,海洋模式与城市模式的气溶胶之间的平均绝对误差较大,各种模式之间的 $R_P$ 误差都要小于 $R_I$ 误差.研究发现,气溶胶模式的不同会给反演 $\tau$ 带来误差.

### 2.2　查找表参数确定

在气溶胶参数反演过程中,主要考虑气溶胶的类型为大陆型和城市型,粒子尺度都属于小粒子范围,而且 POLDER 只能探测半径小于 0.35 μm的细模态的气溶胶粒子,因此针对晴空条件下进行反演,未考虑沙尘暴等极端天气情况.

具体参数设置为:气溶胶粒子有效半径范围为 0.05～0.30 μm,间隔 0.05 μm;气溶胶折射指数实部范围为 1.50～1.52,虚部范围为 0～0.030,间隔 0.005;$\tau$ 的范围为 0～1.0,间隔 0.05;太阳天顶角范围为 0°～90°,间隔 10°;$\theta$ 范围为 0°～90°,间隔 5°;$\phi-\phi_0$ 范围为 0°～360°,间隔 45°;$a$ 的范围为 0～0.6,间隔 0.1.

### 2.3　反演算法

建立查找表后,基于偏振和辐射联合的方法,发展了同时反演 $\tau$,$a$ 以及气溶胶折射指数 $m$,粒子尺度 $r$ 的四维参数迭代算法[10].

算法的基本过程为:首先,应定义相关误差和:

$$S=\frac{1}{2}\sum_i\{|R_I^{ob}(i)-R_I^t(i)|/R_I^{ob}(i)+|R_P^{ob}(i)-R_P^t|/R_P^{ob}(i)\} \quad (5)$$

其中,上标 ob,t 分别表示观测值和理论值;$i$ 表示观测方向.为使得 $R_I$ 和 $R_P$ 的观测值和查找表理论值之间的相关误差最小,确定 4 个参数值($a$,$\tau$,$r$,$m$)作为初始值.$a$ 很小的变化为 $\Delta a$,计算相关误差,在 $S_1=S(a-\Delta a,\tau,r,m)$,$S_2=S(a,\tau,r,m)$,$S_3=S(a+\Delta a,\tau,r,m)$中获得最小值,得到最小值 $S$ 对应的一个新的值 $a'$,依次类推,最后找到一组新的参数集($a'$,$\tau'$,$r'm'$).通过连续的减小搜索范围反复迭代查找,直到反演值收敛于一定的值,或者迭代次数达到一个最大值.

## 3　反演实验及结果验证

反演实验选择数据为 POLDER3 的 865 nm 波段偏振数据,为了与全球气溶胶监测网 AERONET(Aerosol Robotic Network)数据进行对比验证,选择北京观测站(116.38E,39.98N),香河观测站(116.92E,39.75N),Dalanzadgad 观测站点(104.42E,43.56N)进行定点反演实验.

表1中给出了利用POLDER数据反演的3个站点的 $\tau$ 值，北京站点的 $\tau$ 反演值的相对误差为29%，香河站点的相对误差为17%，Dalanzadgad站点的相对误差为22%，反演结果与AERONET地面观测结果存在一定的误差，原因是：①POLDER分辨率较低与地面观测值相比存在误差；②POLDER偏振测量只对细模态气溶胶粒子敏感，而地基测量的是所有尺度的粒子的光学厚度，所以POLDER反演结果普遍偏小.

根据反演算法得到的气溶胶光学参数利用矢量辐射传输算法计算 $R_I$ 和 $R_P$ 模拟值，并与POLDER观测值进行对比，图4显示了北京反演模拟计算值和POLDER观测值，可以看出模拟计算值和观测值基本一致. 分析其误差主要在于矢量辐射传输模型中大气、气溶胶和地表参数的假设，以及查找表计算精度影响. 在误差范围内本文的反演方法能够得到比较合理的结果.

**表1 气溶胶光学参数定点反演结果**

| 865 nm 波段 | 北京 | 香河 | Dalanzadgad |
|---|---|---|---|
| $\tau$(反演值) | 0.160 | 0.121 | 0.209 |
| $\tau$(AERONET) | 0.225 | 0.147 | 0.270 |
| $a$ | 0.21 | 0.33 | 0.24 |
| $m$ | 1.5−0.009i | 1.5−0.010i | 1.5−0.012i |
| $r$ | 0.16,0.2 | 0.14,0.2 | 0.25,0.2 |

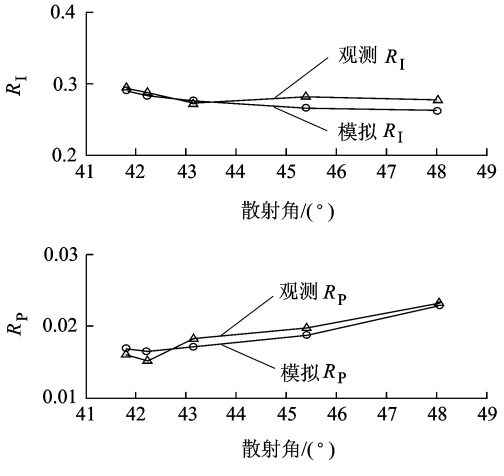


图4 北京站反演模拟计算 $R_I$ 和 $R_P$ 与POLDER观测值比较

## 4 结束语

本文对利用偏振遥感反演陆地上空气溶胶进行了初步的研究，基于矢量辐射传输模型，分析了影响气溶胶光学参数反演的主要因素，建立了描述地气系统辐射和偏振的多维参数查找表，采用多角度的 $R_I$ 和 $R_P$ 联合的四维参数迭代反演方法，就实验个例进行反演，利用POLDER 865 nm通道的辐射和偏振数据，对北京、香河、Dalanzadgad观测点实现气溶胶的 $\tau$，$m$，$r$ 和 $a$ 的反演，$\tau$ 的反演结果与AERONET站点数据进行比较，结果基本一致，表明文中所用方法能够得到合理的反演结果.

## 参考文献（References）

[1] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery [J]. Int J Remote Sens, 1988, 9:1357−1381

[2] Xue Yong, Y u Tong. Aerosol optical depth determination from along track scanning radiometer (ATSR) data[C]// Kostek P. Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE CS, 2003:793−796

[3] 李晓静，刘玉洁，邱红，等. 利用MODIS资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究[J]. 气象学报，2003，61(5)：580−591
Li Xiaojing, Liu Yujie, Qiu Hong, et al. Retrieval method for optical thickness of aerosols over beijing and its vicinity by using the modis data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(5):580−591(in Chinese)

[4] 邓蠕蠕，田国良，柳钦火. 基于多次散射的植被-土壤二向反射模型[J]. 遥感学报，2004，8(3)：193−200
Deng Ruru, Tian Guolang, Liu Qinghuo. Bi-directional reflectance model of canopy and soil based on multi-scatterings [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(3):193−200(in Chinese)

[5] Liang Shunlin. Atmospheric correction of landsat ETM+ land surface imagery-part l: methods [J]. IEEE Trans Geosi Remote Sens, 2001, 39(11):2490−2498

[6] Sano I. Optical thickness, angstrom exponent of aerosols over the land and ocean from space-borne polarimetric data [J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 833−837

[7] 何贤强，潘德炉，白雁，等. 基于矩阵算法的海洋-大气耦合矢量辐射传输数值计算模型[J]. 中国科学D辑(地球科学)，2006，36(9)：860−870
He Xianqiang, Pan Delu, Bai Yan, et al. The vector radiative transfer mode in an atmosphere-ocean system based on matrix algorithm [J]. Science in China Ser D (Earth Sciences), 2006, 36(9): 860−870(in Chinese)

[8] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model[J]. J Q S R T, 1991, 46(5), 413−423

[9] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A, et al. Scattering, absorption, and emission of light by small particles [M/OL]. New York: Nasa Goddard Institute for Space Studies, 2004[2008−07−01]. http://www.giss.nasa.gov

[10] Takashi K, Tomoya N. Simultaneous estimation of optical parameters of the Asian dust and ground reflectance from POLDER data[J]. SPIE, 2004, 1:84−88

(责任编辑：刘登敏)