

文章编号: 0253-2239(2009)07-1772-06

基于 POLDER 数据反演陆地上空气溶胶光学特性

孙 夏 赵慧洁

(北京航空航天大学, 教育部精密光机电一体化技术重点实验室, 北京 100083)

摘要 针对利用 POLDER 数据反演陆地上空气溶胶光学特性和地表反射率进行研究。POLDER 探测器能够提供可见光到红外的地气系统反射太阳光的反射率和偏振反射率的多方向数据。发展了一种基于多角度的总反射率和偏振反射率联合反演气溶胶光学参数的算法, 根据倍加累加法矢量辐射传输模式构建查找表, 反演过程中还考虑了测量数据的云检测处理, 气体吸收校正和平流层气溶胶校正, 通过 865 nm 波段总反射率和偏振反射率的模拟计算值和实际测量值的对比实现局部区域的气溶胶光学特性参数和地表反射率分布图的同时反演。并用 CNES 提供的 POLDER 气溶胶产品对反演结果进行了验证, 该方法能够得到气溶胶光学厚度、折射指数、粒子有效半径和地表反射率较合理的反演结果。

关键词 大气光学; 光学厚度; 偏振; 气溶胶; POLDER

中图分类号 P427.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.1772

Retrieval Algorithm for Optical Parameters of Aerosol over Land Surface from POLDER Data

Sun Xia Zhao Huijie

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Education of Ministry, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The retrieval of aerosol optical properties and surface albedo based on the POLDER are proposed. POLDER provides the multi-angle data of polarization and radiance of solar radiation reflected by the earth atmosphere-surface system in the visible and near-infrared wavelengths. An algorithm that estimates the aerosol optical properties based on combining radiance with polarization is developed. A look-up table (LUT) is built which is compiled based on doubling-adding vector radiative transfer mode in an atmosphere-ground system. The clouds mask, absorbing gas corrections and stratospheric aerosol correction are considered during the process. Aerosol characteristic and the surface albedo are estimated simultaneously based on comparison of measurements by POLDER with the numerical values of 865 nm band stored in LUT. The obtained results were validated with the POLDER aerosols products supplied by CNES. The retrieval results of aerosol optical properties and surface albedo show that the algorithm is valid.

Key words atmospheric optics; optical thickness; polarization; aerosols; POLDER

1 引 言

气溶胶粒子能够以辐射的形式吸收, 散射和发射能量, 它与地球的天气, 气候和环境污染有密切的关系, 而且作为大气中十分活跃的成分, 它也是定量遥感所要解决的问题, 因此气溶胶特性的研究越

来越受到广泛关注。利用遥感方法研究气溶胶特性主要可分为地基遥感和卫星遥感两部分。地基遥感具有精度高覆盖范围小的特点, 杨辉^[1]、韩道文^[2]等利用激光雷达对气溶胶消光系数分布特性和反演方法进行了研究。卫星遥感范围广, 可以覆盖全球, 提供

收稿日期: 2008-07-03; 收到修改稿日期: 2008-11-18

基金项目: 航遥中心基金项目(1212010816033)、中国地质调查局科研项目(1212030616010)和长江学者和创新团队发展计划(IR0705)资助课题。

作者简介: 孙 夏(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事偏振遥感方面的研究。E-mail: sunxia2006@tom.com

导师简介: 赵慧洁(1966-)女, 教授, 主要从事高光谱和偏振探测技术方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

的气溶胶信息可以弥补地面监测的不足。卫星测量的大气顶的辐射主要包括大气散射和地表反射,由于陆地上地表反射贡献要比大气散射大的多,使得陆地上空气溶胶的提取要比海洋上困难的多。在可见光波段,大气散射光具有很强的偏振特性,而地表是低偏振的^[3],卫星观测到的偏振辐射对气溶胶粒子的大小及折射指数比较敏感,对地表变化不敏感,利用偏振信息和辐射信息的联合可以更好的反演气溶胶的光学特性。目前运行的偏振探测器主要有法国空间局 CNES 研制的偏振探测器 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)。POLDER 为气溶胶的反演提供了辐射、偏振和多角度的信息。目前国外在利用 POLDER 数据反演气溶胶方面做了许多研究, Kawata 等^[4]对利用 POLDER 资料对反演日本海域上空气溶胶光学厚度进行了研究,比较了单独利用反射率或偏振反射率与两者同时利用的方法反演得到的光学厚度,用天空辐射计数据验证表明后者的反演结果更好。Sano 等^[5]用 POLDER 资料反演了陆地上空的气溶胶特性,给出陆地上空气溶胶指数和 Ångström 指数的全球分布,研究结果发现中非和东南亚终年气溶胶的光学厚度都较大。国内韩志刚等^[6]利用 POLDER 数据对草原上气溶胶特性进行了反演实验,推导了平行平面均匀植被的太阳光矢量传输反射模型,形成了陆地上空气溶胶反演的正问题模式系统。段民征^[7]利用卫星标量辐射和偏振信息和云下阴影法实现了陆地上空气溶胶和地表反射率的同时反演。可以看到,强度辐射和偏振辐射的联合利用对于全球气溶胶分布的研究具有独特的优势和发展潜力。本文对利用 POLDER 偏振数据反演气溶胶光学参数进行了研究。

2 矢量辐射传输模型

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,一般表述形式为

$$\begin{aligned} \mu \frac{d\mathbf{I}(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = & -\mathbf{I}(\tau, \mu, \phi) + \frac{\bar{\omega}(\tau)}{4\pi} \times \\ & \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') \mathbf{I}(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' + \\ & \frac{\bar{\omega}(\tau)}{4\pi} \mathbf{M}(\tau, \mu, \phi, \mu_0, \phi_0) \bar{F}_0 e^{-\tau/\mu_0} + \\ & (1 - \bar{\omega})B(T), \end{aligned} \quad (1)$$

$\mathbf{I}=[I, Q, U, V]$ 为斯托克斯矢量, μ 为 \mathbf{I} 的天顶角余

弦,正为向下辐射,负为向上辐射, ϕ 为 \mathbf{I} 的方位角, τ 为光学厚度, $\bar{\omega}$ 为单次散射反照率, \bar{F}_0 为地外太阳辐射通量, μ_0 为太阳天顶角余弦, ϕ_0 为太阳方位角, \mathbf{M} 为散射相矩阵。方程右边第二项为多次散射项,第三项为单次散射项,第四项为热辐射项。辐射传输方程是一个非线性微分积分方程,必须使用数值的方法求解,这里使用 K. F. Evans 和 G. L. Stephens 的倍加累加法求解矢量辐射传输方程^[7~9]。将大气分为多个均匀层,然后每个均匀层再均分为一系列的薄层,计算薄层近似条件下的反射矩阵,透射矩阵和源矢量,通过对薄层的逐次倍加递推得到整个均匀层,然后累加法计算联合层的反射矩阵,透射矩阵和源矢量,由边界条件就可以求得大气顶向上和大气底向下的矢量辐射。

3 反演方法

利用 POLDER 数据反演气溶胶光学特性的方法是基于地气系统的矢量辐射传输模拟计算值构成的查找表与实际观测值的对比。反演所用辐射参数有总反射率 R_1 , 偏振反射率 R_p ^[10]:

$$R_1 = \frac{\pi I}{\mu_0 F_0}, \quad (2)$$

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

其中 I, Q, U 为斯托克斯矢量参数 [$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$], μ_0 为太阳天顶角余弦, F_0 为太阳常数 [$W/(m^2 \cdot \mu m)$]。定义的偏振反射率 R_p 不依赖于地表反射率。

3.1 建立查找表

利用 Mie 散射原理计算气溶胶模型的光学特性,然后使用倍加累加法矢量传输模式进行计算,气溶胶尺度分布函数用对数正态谱分布,表述为^[11]

$$n(r) = Cr^{-1} \exp\left[\frac{-(\ln r - \ln r_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g}\right], \quad (4)$$

其中 r_g 表示粒子有效, σ_g 表示粒子半径的有效方差, C 为常数。

为建立多维参数查找表,设定相关参数在一定范围内变化,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 只能探测半径较小的细模态的气溶胶粒子,因此主要针对晴空条件下进行反演,未考虑沙尘暴这种极端天气情况。这两种类型气溶胶在可见光波段折射指数实部在 1.52 左右,大陆型气溶胶吸收较小折射指数虚部很小,城市型气溶胶的吸收较大折射指数虚部均值在 0.025 左右^[7],因此计算中选取粒子尺度分布

的有效半径变化范围为 $0.05 \sim 0.30 \mu\text{m}$, 有效方差为 $0.1 \mu\text{m}$, $0.2 \mu\text{m}$, 折射指数实部变化范围为 $1.50 \sim 1.52$, 虚部变化范围为 $0.0 \sim 0.030$, 地表反射率的取值为 $0.0 \sim 0.6$, 气溶胶的 865 nm 光学厚度取值范围为 $0.0 \sim 1.0$ 。根据实际观测数据设置太阳天顶角的取值范围为 $0 \sim 60^\circ$, 观测天顶角 $0 \sim 90^\circ$, 相对方位角为 $0 \sim 180^\circ$ 。

由于参数的采样有一定间隔, 需要进行插值, 所采用的插值方法与采样间隔密切相关, 而且间隔越细致, 插值方法越复杂计算量越大, 当采样间隔足够细致时一般采用线性插值, 另外常用的是拉格朗日插值, 比较发现拉格朗日插值计算的查找表精度明显高于线性插值, 同时考虑到计算速度的限制, 在实际数据反演气溶胶的光学厚度时, 使用多维拉格朗日插值方法对查找表进行插值。

3.2 反演算法

本文算法的基本思路是根据理论计算的查找表和卫星观测数据, 建立与实际数据的几何观测条件相对应的新的查找表, 构建总反射率和偏振反射率的关系图^[12], 查找出与观测数据偏差最小的理论值对应的气溶胶参数, 然后对所有观测方向上的结果进行平均作为最优的解。

具体步骤如下:

(1) 从 POLDER 的观测数据中选择 6 组不同的观测几何条件, 根据实际数据的观测角度找到在查找表中对应的位置, 进而从查找表中找到观测角度下所有气溶胶模式, 地表反射率和光学厚度对应的总反射率和偏振反射率, 构成新的查找表。

(2) 定义了一个相关误差和 S

$$S = \sum_i \{ |R_{\text{ob}}(i) - R_t(i)| / R_{\text{ob}}(i) + |P_{\text{ob}}(i) - P_t(i)| / P_{\text{ob}}(i) \}, \quad (5)$$

其中 R, P 分别表示总反射率和偏振反射率, 下标 ob, t 分别表示观测值和理论值, i 表示观测几何条件。对地表反射率进行插值, 找出最小相关误差对应的地表反射率, 以及其对应的局部查找表。

(3) 在一定的地表反射率, 折射指数下, 绘制不

同光学厚度和粒子尺度的总反射率和偏振反射率的关系图。如图 1 所示。利用总反射率和偏振反射率关系图与观测数据, 找出最小的相关误差值对应的一组光学厚度和粒子半径参数。

(4) 对于不同的折射指数, 分别计算所有观测方向上的光学厚度均值和粒子尺度的均值, 然后根据反演的光学厚度和粒子尺度的均值对折射指数, 总反射率和偏振反射率进行插值, 选择最小的相关误差对应的折射指数和光学厚度和粒子尺度的均值为反演结果。

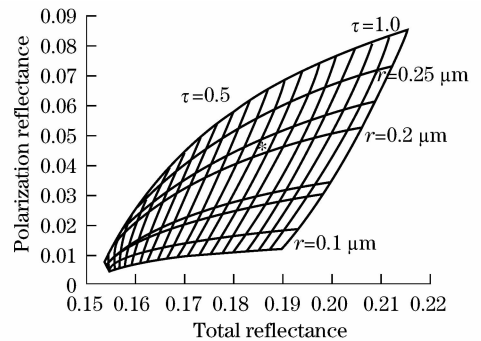


图 1 总反射率和偏振反射率图表。

τ 为光学厚度, r 为粒子有效半径

Fig. 1 Total reflectance and polarization reflectance diagram. τ is optical thickness, r is effective radius

4 气溶胶参数反演及结果验证

4.1 POLDER 数据处理

由法国空间研究中心(CNES)于 2004 年 12 月 18 日发射的 PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar) 卫星, 上面主要搭载了 POLDER3 仪器。POLDER3 的一级数据包含多波段的大气顶的标准化辐射矢量, 对于每一个像元有多达 16 个观测角度。POLDER3 的视场角沿轨道方向 $\pm 51^\circ$, 垂直轨道方向 $\pm 43^\circ$, 幅宽 1600 km , 海拔高度 705 km , 像元分辨率接近 $(6 \text{ km})^2$, 其光谱波段特性参数见表 1。

表 1 光谱波段特性参数

Table 1 Spectral band parameters

Central wavelength /nm	443	490	565	670	763	765	865	910	1020
Band width /nm	13.5	16.5	15.5	15.0	11.0	38.0	33.5	21.0	17.0
Polarization	no	yes	no	yes	no	no	yes	no	no

POLDER 一级数据不能直接用于反演算法, 反演前要对数据进行处理, 主要包括云污染检测, 气体

吸收校正, 平流层气溶胶校正和 Rayleigh 散射校正^[13]。

(1) 云像元检测

蓝光波段检测:在 443 nm 波段清洁天空和云覆盖有着最大的对比。如果 443nm 的反射率去除分子散射影响后满足下式,则像元判断为云像元:

$$R_{0.443}^{\text{mes}} - R_{0.443}^{\text{mol}} > \Delta R_{0.443}, \quad (6)$$

式中 $R_{0.443}^{\text{mes}}$ 为测量的反射率, $R_{0.443}^{\text{mol}}$ 为分子反射率, $\Delta R_{0.443}$ 为阈值设为 0.15。

偏振虹检测:水滴的偏振相函数在散射角为 140° 时有一个最大值,因此云的水滴散射的偏振信号在从入射方向的 142° 有最大值。通过比较在 142° 和偏离 142° 散射角方向的经观测角度校正的 $[\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v)]R_p$ 可以鉴别液态云。如果这种差别大于阈值 0.005 该像元判断为云。

(2) 气体吸收校正

POLDER 探测器与其他探测器相比,波段宽度较窄,已经将气体吸收影响减小,主要对臭氧和水汽吸收进行校正。臭氧吸收的校正公式为

$$R_{\text{corr}} = R_{\text{meas}}/T_{\text{O}_3}, \quad (7)$$

臭氧的传输系数 T_{O_3} 是臭氧柱状含量 U_{O_3} 的多项式函数。

水汽吸收的校正使用经验公式

$$R_{\text{corr}} = R_{\text{meas}}/T_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (8)$$

$T_{\text{H}_2\text{O}}$ 作为 910 nm 和 865 nm 波段的反射率比率的多项式函数。

(3) 平流层气溶胶校正和 Rayleigh 散射校正

美国的 SAGEII 卫星可以提供全球的 0.5 ~ 40 km 的高度上每隔 0.5 km 气溶胶的消光系数的探测,这里使用 SAGEII6.2 的资料,进行平流层气溶胶光学厚度的校正。利用 NCEP 月平均再分析资料提供的月平均气压,温度以及海拔数据,计算得

到整层大气的 Rayleigh 散射光学厚度。

4.2 气溶胶光学参数反演结果和验证

反演试验选择数据为 POLDER3 的 865 nm 波段偏振数据,范围为北纬 $40^\circ \sim 44^\circ$,东经 $108^\circ \sim 116^\circ$,时间为 2005 年 5 月 1 日,如图 2,该区域上空的云量较少,晴空范围较大,有利于气溶胶的反演。

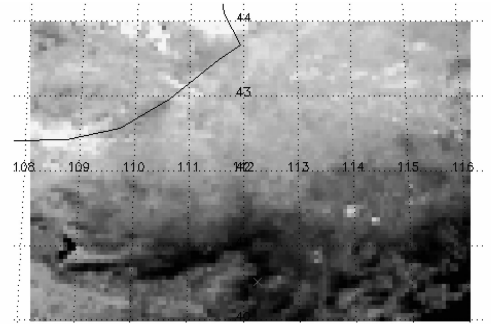


图 2 反演区域

Fig. 2 Retrieval region

利用前面介绍的反演方法对该区域上空的气溶胶光学特性进行反演,得到 865nm 波段的气溶胶光学厚度,折射指数,粒子有效半径的分布图,以及地表反射率分布图。由图 3 (a)可以看出该区域上空气溶胶光学厚度分布情况,该区域多分布草地和农作物,气溶胶光学厚度较小。将反演的光学厚度和 CNES 提供的 POLDER 的气溶胶光学厚度产品进行对比,如图 3(b)所示,两者的线性拟合关系为: $t_2 = 1.07 t_1 + 0.0029$,相关系数为 0.84,本方法反演结果的相关系数较小的原因主要是部分像元点的反演的光学厚度偏大,主要是辐射传输计算中大气和气溶胶参数的设定造成偏差,以及地表类型假定为朗伯体,不考虑地表二向反射特征也会产生误差,使得光学厚度的反演不准确。

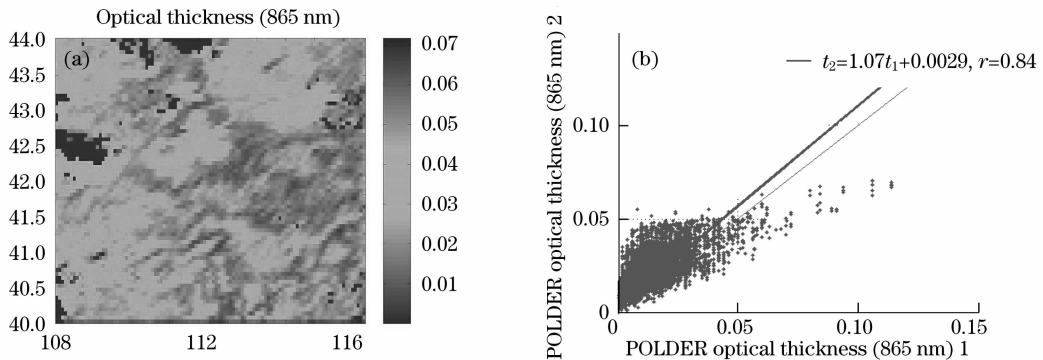


图 3 气溶胶光学厚度反演结果。(a)反演得到的 865 nm 光学厚度分布图;(b)反演的光学厚度与 CNES 提供的 POLDER 数据产品的对比

Fig. 3 Retrieved aerosol optical thickness distribution map. (a) Retrieved aerosol optical thickness distribution map in 865 nm; (b) comparison of retrieved aerosol optical thickness with products of CNES

图 4(a)为该区域上空气溶胶地表反射率分布情况,其中北纬 42° 以北的地表反射率大于 0.4,该区域草地,农作物分布较多,北纬 42° 以南地表反射率小于 0.3,多为土壤分布,部分区域的反射率小于 0.1,为水体分布。将反演的地表反射率和 CNES

提供的 POLDER 的地表反射率产品进行对比,如图 4(b)所示,两者的线性拟合关系: $a_2 = 1.04 a_1 + 0.0020$,相关系数为 0.97,可见地表反射率的反演结果比较合理。由图中可以看到,部分像元的地表反射率反演值偏小,影响光学厚度的反演结果。

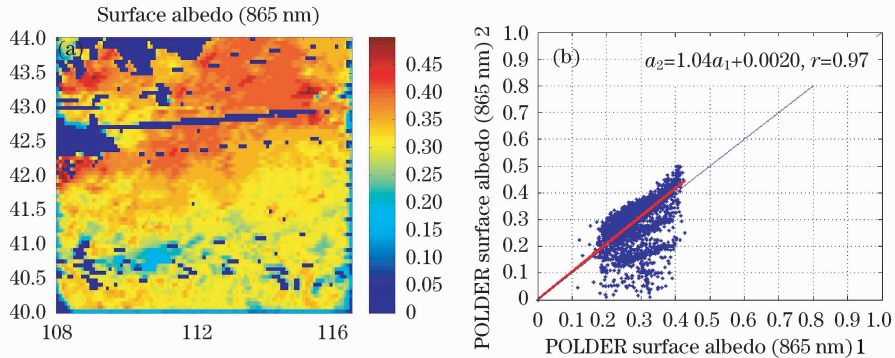


图 4 地表反射率反演结果。(a) 反演得到的 865 nm 地表反射率分布图;(b)反演的地表反射率与 CNES 提供的 POLDER 数据产品的对比

Fig. 4 Retrieved surface reflectance distribution map. (a) Retrieved surface reflectance distribution map in 865 nm; (b) comparison of surface reflectance with products of CNES

图 5 为反演的气溶胶尺度分布的有效半径分布,图 6 为反演的气溶胶折射指数的分布。由于缺少折射指数和粒子尺度的数据,只能定性的对反演结果进行分析,图中气溶胶粒子尺度普遍不大,相比之下,东经 $108^{\circ} \sim 110^{\circ}$,以及北纬 43° 以北的内蒙古和蒙古国范围内多为草地,分布有沙地,气溶胶粒子有效半径较大,折射指数的虚部很小,说明气溶胶吸收性较小。东经 $110^{\circ} \sim 116^{\circ}$ 范围内气溶胶粒子有效半径较小,折射指数虚部较大,吸收性相对较大,气溶胶成分主要是城市-工业气溶胶。通过以上定量验证和定性分析表明,气溶胶光学参数的反演结果和地表反射率的反演结果都较合理,利用偏振和辐射联合的反演方法是有效的。

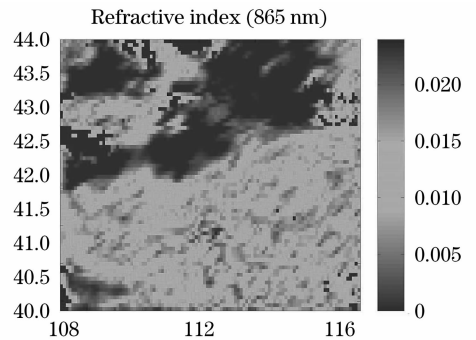


图 6 反演的气溶胶折射率分布图,实部为 1.5

Fig. 6 Retrieved aerosol refractive index distribution map, the real part is 1.5

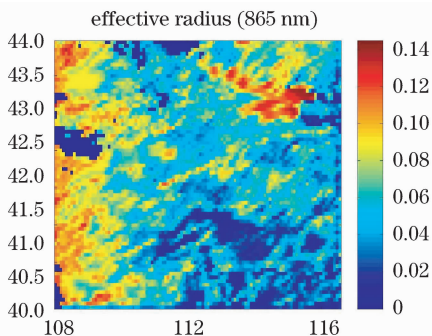


图 5 反演的气溶胶有效半径分布图

Fig. 5 Retrieved aerosol effective radius distribution map

5 结 论

详细描述了利用 POLDER 偏振数据反演陆地上空气溶胶光学参数的方法,发展了一种采用多角度的总反射率和偏振反射率联合的查找表反演方法,反演时选取 POLDER865 nm 通道的辐射和偏振数据,对时间为 2005 年 5 月 1 日,北纬 $40^{\circ} \sim 44^{\circ}$,东经 $108^{\circ} \sim 116^{\circ}$ 局部区域内的气溶胶光学参数和地表反射率进行反演。反演的气溶胶光学厚度和地表反射率结果与 CNES 的 POLDER 相应产品比较接近,折射指数和粒子有效半径没有定量的验证,定性分析在空间分布上较符合规律,说明本文方法能够得到合理的结果。下一步工作将联合使用 670 nm

和 865 nm 两通道数据, 提高反演精度, 对 Ångström 指数和气溶胶指数分布进行反演。此外, 由于大粒子的偏振特性更为复杂, 未考虑沙尘暴等极端天气下的气溶胶特性, 对于沙尘天气中的气溶胶特性研究还存在很多不足。

参 考 文 献

- 1 Yang Hui, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Urban planetary boundary layer aerosol monitoring by lidar at Beijing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1255~1259
杨 辉, 刘文清, 刘建国 等. 激光雷达监测北京城区夏季边界层气溶胶[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1255~1259
- 2 Han Daowen, Liu Wenqing, Lu Yihuai *et al.*. A retrieve method for aerosol extinction coefficient based on madaline networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):384~390
韩道文, 刘文清, 陆亦怀 等. 基于 Madaline 网络的气溶胶消光系数反演算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):384~390
- 3 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):900~1003
叶 松, 方勇华, 孙晓兵 等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):900~1003
- 4 Kawata Y, Izumiya T, Yamazaki A. The estimation of aerosol optical parameters from ADEOS/POLDER data [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2000, **116**:197~215
- 5 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.
- 6 Han Zhigang. *Aerosol Retrievals over Steppe with POLDER Data-Simulation Model System and Preliminary Tests* [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1999
韩志刚. 草地上空对流层气溶胶特性的卫星偏振遥感-正问题模式系统反演初步实验[D]. 北京: 中科院大气物理研究所, 1999
- 7 Duan Minzheng. *Simultaneously Retrieval of Atmospheric Aerosol Optical Thickness and Surface Albedo over Land by Using Polarized Radiance as well as Scalar Radiance from Satellite Measurement* [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001
段民征. 陆地上空大气气溶胶和地表反射率的同时反演—卫星标量辐射和偏振信息的联合应用[D]. 北京: 中科院大气物理研究所, 2001
- 8 K. F. Evans, G. L. Stephens. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1991, **46**(5):413~423
- 9 Yang Chunping, Wei Ling, Wu Jian *et al.*. Effect of the reflection of underlying surface on sky radiance distribution [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):125~127
- 10 S. C. Ou, K. N. Liou, Y. Takano *et al.*. Remote Sensing of Cirrus Cloud Particle Size and Optical Depth Using Polarimetric Sensor Measurements [C]. *SPIE*, 2004, **5548**:183~194
- 11 Michael I, Mishchenko, Larry D. Travis *et al.*. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles* [OL]. New York. Nasa Goddard Institute for Space Studies. 2004
- 12 Yoshiyuki Kawata, Atsuo Mori, Yasuyuki Kimura. The validation of retrieved aerosol's optical parameters from POLDER data [C]. *SPIE*, 2003, **4891**:343~352
- 13 J. C. Burize, C. Vanbauce, F. Parol *et al.*. Cloud Detection and Cloud Properties from POLDER [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1997, **18**(13):2785~2813.