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 II. 实例分析

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探测实验室,北京 100029

摘 要 由于陆地地表反照率的复杂性,陆地上空气溶胶的反演一直是卫星对地观测的一个难点,针对这个难 点,作者提出联合利用偏振反射率和总反射率提取陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率及其区域分布的 反演方案,提出了利用 NCEP 资料订正由海拔高度引起的 Rayleigh 散射变化的具体方法,并利用 POLDER (PO-Larization and Directionality of Earth's Reflectance)的 LEVEL-1B 资料进行实际反演计算,给出中国华北地区气 溶胶光学厚度和地表反照率的区域分布。反演结果与地基观测进行了对比验证分析,结果表明,综合利用标量辐 射和偏振信息的可以实现区域乃至全球尺度的大气气溶胶和地表反照率的定量反演。

关键词 气溶胶,地表反照率,光学厚度,偏振

文章编号 1006 − 9895 (2008) 01 − 0027 − 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 Measurement. II: A Case Study

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 Surface albedo and aerosol optical thickness are of two important factors for estimation of earth-atmosphere energy budget and climate change, and it is still a challenging problem to retrieve them simultaneously over land from satellite observations. Based on the characteristics analysis of atmospheric polarization, a new method is given to retrieve them simultaneously with both the radiance and polarization measurements. The distribution of aerosol optical thickness and surface albedo over North China was derived from POLDER measurements on 11 April 1997. An algorithm for correcting the effect of Rayleigh scattering due to terrain elevation is proposed. Some of the results are compared with ground-based in-situ measurements and/or that of other authors', which show that the results are reasonable.

Key words aerosol, albedo, optical depth, polarization

1 引言

近年来,随着全球变化研究的不断深入,气溶 胶的气候效应越来越受到人们的重视。气溶胶通过 两方面来影响全球能量辐射平衡,一是直接散射、 吸收太阳和地气系统的辐射^[1],称为气溶胶的直接 辐射效应;二是通过与云的相互作用,改变云的微 物理结构与寿命及其光学特性,从而影响全球的辐

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 40675018, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403702

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

射收支^[2,3],称为气溶胶的间接辐射效应。另外, 如果气溶胶为吸收较强的如黑炭类(BC)气溶胶, 其吸收加热可以对云起消散作用,并抑制大气对 流,有人把气溶胶的这种加热作用称为气溶胶的半 直接辐射效应^[4]。研究表明,气溶胶与云相互关系 及由此导致的辐射扰动成为预测气候变化的最大的 不确定性原因之一^[5]。

此外,气溶胶的环境效应也一直是人们关注的 话题。研究表明,大气颗粒物(MP10)污染已成为 影响人类健康的主要危害因素之一。世界卫生组织 2002年的估计表明,全球城市大气颗粒物污染造 成每年至少100万例居民死亡和740万例伤残,且 50%分布在大气颗粒物污染较为严重的包括我国在 内的东亚和东南亚国家^[6]。气溶胶不仅直接危害人 类健康,而且参与大气中异相化学反应,从而导致 大气严重污染。因此,我国十一五规划中也将大气 环境预报列为了重要研究课题。

随着科学与应用需求的增加,对地表和大气的 动态监测已经成为必需,尤其是利用卫星资料来获 取地表和大气的物理参数,即首先从卫星对地观测 信号中区分大气和地表各自的贡献,然后再从各自 的贡献中去分析反演大气和地表的物理参数。在陆 地上空,由于地表反射相对较大,其贡献经过大气 散射和吸收后被卫星探测器所接收,卫星观测所得 是二者的耦合,一般很难直接将地表反射和大气散 射区分开来,因此,大气气溶胶和地表反照率的同 时反演成为卫星定量遥感所追求的目标。所谓同时 反演即首先从卫星对地观测所得辐射信号中区分大 气和地表各自的贡献,然后再从各自的贡献中去分 析反演大气和地表的物理参数,从物理实质上看这 是地气系统辐射传输的退耦合问题。目前,陆地上 空的大气气溶胶的卫星反演一般利用特殊地表或利 用地表反射波谱的相关性来实现,如暗地表的方 法^[7~9]、多时相方法^[10,11]、地表反射相关法^[12,13]、 云下阴影法[14]等,这些方法在很大程度上依赖于 探测区域特定地表的存在与否,应用上有很大的局 限性。

利用天光的偏振现象研究地球大气和气溶胶起 始于 20 世纪 70 年代^[15], 90 年代进行了大量地表 尤其是植被的偏振研究和实验^[16,17], 空基实验研 究还很少。POLDER (POLarization and Directionality of Earth's Reflectance) 研制成功以后, 才进 行了一系列机载对地偏振测量[18],观测实验证明, 在可见和近红外波段, 地表反射是低偏振的。1996 年 POLDER 上天以后,利用偏振信息提取大气气 溶胶信息的反演算法和模拟实验得到进一步发展, 其中以法国 POLDER 研究小组最为著名,如 Herman 等^[19]和 Bréon 等^[20]以 POLDER 机载观测实验 为基础,验证了利用偏振辐射率反演陆地上空气溶 胶光学特性的可行性。在此基础上, Deuzé 等^[21]提 出了利用 POLDER/ADEOS 偏振信息提取陆地上 空气溶胶指数(气溶胶光学厚度和Ångström指数 的乘积)的反演算法,并给出其陆面上空的分布特 征,Sano^[22]用双通道方法,假定气溶胶复折射指数 不变情况下利用 POLDER 偏振辐射资料反演了气 溶胶光学厚度和 Ångström 指数的全球分布。在国 内,吴北婴等利用自主建立的第一个球面 Monte-Carlo 矢量辐射传输模式^[23]和自行研制的偏振光度 计^[24],分析了 Pinatubo 火山爆发后的曙暮光辐射 特征。韩志刚[25]利用此偏振光度计测量了内蒙古 锡林郭勒草原的地表反射的偏振特性,并利用 POLDER 资料进行了草地上空气溶胶光学特性的 反演实验,实验结果表明了利用偏振信息提取陆地 上空气溶胶光学参数的优势。但是,这些方法仅利 用偏振信息,经与其他方法如地基 AERONET 资 料和 MODIS 反演结果的比较分析证明^[22, 26], 仅利 用偏振信息来反演陆地上空的气溶胶光学特性是不 够的,还应当充分利用其同时观测得到的标量辐射 信息。理论研究也证明这一点,同时还指出,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[27,28]。

由于大气分子和气溶胶散射具有较强的偏振特 性,而卫星对地观测的偏振辐射信号对地表不敏 感^[29],因此,偏振信息的利用越来越受到人们重 视,并被成功地应用于气溶胶和云光学参数的遥感 反演^[21, 22, 25, 26],其反演结果也逐步被用以更精确 的描述和评估气溶胶与云的相互关系及其间接辐射 效应^[30]。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 $0.4 \sim 2.4 \ \mu m$ 的多通道的气溶胶偏振测量仪 APS (Aerosol Polarimeter Sensor),地基气溶胶全球观 测网络 AERONET 中的主要仪器 CIMEL 也增加 了偏振信息测量。 基于偏振辐射信号对地表不敏感,而标量辐射 对大气气溶胶和地表反照率都敏感的特性,本文提 出联合利用多波段、多角度星载辐射计 POLDER 的偏振和标量辐射资料,提取中国华北地区大气气 溶胶和地表反照率的区域分布,即首先利用偏振信 息提取陆地上空的气溶胶光学特性,然后利用标量 辐射对气溶胶反演结果进行订正,同时得到地表反 照率。考虑到中国北部地区地形变化较大,方案中 给出了由地形高度引起的 Rayleigh 散射的订正方 法。

2 POLDER 资料

POLDER 是由法国研制、搭载于日本 ADEOS 卫星上的多波段、多角度偏振辐射计,在 797 km 的轨道高度上,其星下点分辨率为 6×7 km,扫描 幅宽为 2200 km,围绕地球一周需要 101 min,周期 为 41 天。由于采用了 242×274 的 CCD 面阵传感 器,对地面同一像元最多可有 14 个方向的采样。 POLDER 的径向视场为±43°,横向视场为±51°, 对角视场为±57°。POLDER 共有 9 个波段,其中 443 nm、670 nm 和 865 nm 三个通道为偏振通道^①, 带宽分别为 20 nm、20 nm 和 40 nm,其归一化谱 响应透过率函数见图 1。POLDER^[31]的 LEVEL-1B资料已经对漂移、暗电流进行订正和数据校验, 并且同时给出了像元点的地形高度、云量和陆地所 占的比例。POLDER /ADEOS1 和 POLDER / ADEOS2 分别于 1997 年 6 月和 2003 年 10 月出现 故障,但具有相同性能的美国、欧洲卫星队列"A-TRAIN"计划中的 PARASOL^[32]已于 2004 年 12 月上天,目前运行状况良好。POLDER 资料最终 以归一化辐射矢量(Stokes 矢量中 I、Q、U 三个分 量)的形式分发资料,即乘以系数 $\pi/F_0(\lambda)$,经过 简单变换就可得到反演方案所需要的归一化反射 率。POLDER 的 LEVEL-1B 资料是以像元局地子 午面为参考系,并考虑了球面效应订正。为消除地 理定位、辐射及偏振定标精度的影响,我们还对 POLDER 资料进行 3×3 像元平均预处理。

3 反演算法及个例分析

反演采用查找表算法。由于偏振反射率主要来 自于大气散射贡献,近似与地表反照率无关^[29],因 此,首先根据 POLDER 的 670 nm 和 870 nm 两个 波段的多角度偏振反射率通过查找事先建立数值表 寻求气溶胶解,这个过程可能是个多解过程,因 此,我们称其解为可能解。然后,根据所得气溶胶 光学特性和 POLDER 总反射率资料计算地表反照 率,并对气溶胶的可能解作进一步的筛选和订正。

另外,由于多次散射具有退偏作用,因此,当



图 1 太阳地外谱(虚线)和归一化仪器谱响应透过率函数(实线) Fig. 1 Solar extraterrestrial irradiance (dashed line) and normalized spectral response function (solid line)

① PARASOL 中偏振通道改为 490 nm、670 nm 和 865 nm

利用偏振反射率反演陆地上空气溶胶时不宜采用多 次散射作用较强的大散射角方向的测量信息^[19]。 基于这个原理,我们洗取散射角小干135°的偏振反 射率资料进行气溶胶的查找表计算。

利用 POLDER 资料反演气溶胶和地表反照率 的整个流程分为三大部分:一是 POLDER 资料的 预处理,包括观测角度选取、角度订正、地形高度、 地理位置的计算和像元平均等;二是气候资料的统 计分析、像元点内插以准确计算并扣除由海拔高度 引起的 Rayleigh 散射的影响; 三是气溶胶和地表反 照率的反演计算。整个流程参见图 2。

3.1 查找表

查找表的建立采用了改进的倍加累加法矢量辐 射传输模式[33]和离散坐标法[34]标量辐射传输模式, 并采用了段民征提出的快速计算方法[35,36]。陆地 上空气溶胶复折射指数实部为 1.53 左右,因此计 算中选取 1.50 和 1.53, 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 散射模式计算得到[37]。

反演方案所用查算表是以归一化标量辐射强度 (也称总反射率) R_1 和偏振反射率 R_p 为参量, 二者 定义如下:

$$R_I = \frac{\pi I}{\mu_0 F_0},\tag{1}$$

$$R_{
m P} = rac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{\mu_0 F_0}.$$
 (2)

在数值表中 R₁和 R_p是以太阳出射方向为参考方 向,而POLDER的LEVEL-1B资料是以太阳所在 方位为参考方向(图 3)。Stokes 矢量具有方向性, 参考系的变化必定引起矢量辐射 $[I, Q, U, V]^{T}$ 值 的变化。因此,要与辐射传输计算结果相比较就必 须进行辐射矢量的参考平面旋转变换。事实上,由



Fig. 2 Schematic diagram of retrieving aerosol and surface albedo using POLDER data

于反演方案所用的参量是归一化总反射率和偏振反 射率,参考系的旋转不会引起二者在数值上的变 化^[29]。另外,POLDER Level-1B的角度资料已经 考虑了球面效应,直接给出了像元局地天顶角。因 此,反演计算时只需要订正观测方位角即可,并将 方位角转换到 0°~180°,同时将 POLDER 资料转 换为反射率形式以方便查找表计算。

3.2 Rayleigh 散射的订正

对于晴空大气,卫星测量的偏振辐射信号包含 气溶胶散射和 Rayleigh 散射。Rayleigh 散射的大 小与波长、大气压力有关,波长越短,Rayleigh 散 射愈强,其影响也越显著。气溶胶散射和 Rayleigh 散射相互作用、相互影响,关于二者对测量信号的 影响的详细内容可见参考文献[29]。另外,由于大 气压力的变化与地形相关,而中国北方地区地形起 伏较大,因此,地形高度引起的 Rayleigh 散射的变 化及其对偏振辐射的影响须加以考虑。辐射传输模 拟实验已经表明,Rayleigh 散射的变化对归一化总 反射率和偏振反射率的影响可以用线性函数来描 述^[29]。基于这个原理,我们设计了在区域范围内 订正由海拔高度引起的 Rayleigh 散射作用的算法。 Rayleigh 散射光学厚度由下式给出:

$$\tau_{\rm m}=\tau_{\rm m0}\,\frac{p}{p_0},\qquad\qquad(3)$$

其中, τ_{m0} 为标准大气条件下的 Rayleigh 散射光学 厚度, $\alpha = p/p_0$ 为 Rayleigh 散射订正系数。对某一 特定地区, α 值在一定时间范围内变化很小(小于 2%),主要受地形高度的控制。因此, α 可由气候 资料统计得到。我们利用 1987~1997 共 11 年的 NCEP 月平均再分析资料经过统计得到逐月的平均 气压和温度, 然后,用四点内插方法得到像元点的



α值。值得注意的是,NCEP 资料为 Gauss 网格资料,因 Gauss 网格点的地形高度不同,一般直接内插方法容易引起较大误差,为消除地形高度对内插结果的影响,我们考虑用多元大气压高公式将各Gauss 网格点的气压和温度订正到海平面:

$$p_Z = p_0 \left(\frac{T_0 - \gamma Z}{T_0}\right)^{\frac{g}{\gamma R_d}},\tag{4}$$

$$T_Z = T_0 - \gamma Z, \qquad (5)$$

式中, p_Z 、 T_Z 为 Gauss 网格点海拔高度 Z 处的气 压和温度, p_0 、 T_0 为 Gauss 网格点海平面处的气压 和温度, γ 为标准大气温度递减率, R_d 为干空气比 气体常数, g为重力加速度, Z为海拔高度(单位: m)。

由于 POLDER 观测像元点绝大部分不会与 Gauss 网格点重合,因此,像元点的海平面气压和 温度必须由 Gauss 网格点气候平均值内插得到。 由于地球为球面,且 Gauss 网格点较少(94× 192),采用平面几何内插已经不适宜,必须考虑球 面效应,因此,我们采用以球面距离的倒数为权重 的内插方法来计算像元点的海平面气压和温度,实 际应用中采用了以下变通方法。

设像元点*O*的地理纬度和经度分别为 η 和 φ , 位于如图 4 所示的 Gauss 网格内, 网格点的纬度和 经度用 (η_i , φ_i)表示 (其中 *i*=1, 2, 3, 4), 则像元 点的海平面气压和温度分别为 p_0 和 T_0 , 可由四点 加权内插公式得到:

$$p_0(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\varphi}) = \sum_{i=1}^4 w_i p_0(\boldsymbol{\eta}_i, \boldsymbol{\varphi}_i) \Big/ \sum_{i=1}^4 w_i, \qquad (6)$$

$$T_{0}(\boldsymbol{\eta},\boldsymbol{\varphi}) = \sum_{i=1}^{4} w_{i} T_{0}(\boldsymbol{\eta}_{i},\boldsymbol{\varphi}_{i}) \big/ \sum_{i=1}^{4} w_{i}, \qquad (7)$$

$$w_i = \sin\eta \sin\eta_i + \cos\eta \cos\eta_i \cos(\varphi - \varphi_i) . \qquad (8)$$



图 4 内插方法示意图 Fig. 4 Schematic diagram of interpolation

到,(35°N,115°E)附近为山东农田,4月11日小 麦已经返青,其地表反照率应符合图7中绿色草地 和农作物特征。比较图5c、d可以知道,这一地区 670 nm 和865 nm 地表分反射率反演结果也确实 具有农作物的反射率特征。另外,(43°N,115°E) 为浑善达克沙地,40°N以北、105°E~110°E 为内 蒙古和蒙古国境内沙地,图5c、d中地表反照率的 反演结果也符合图7中沙地反射率特征,因此,地 表反照率的反演结果也是合理的。

4 结论

本文提出联合利用多通道、多角度偏振和标量 辐射实现陆地上空大气气溶胶和地表反照率的同时 反演,即首先根据 POLDER 的 670 nm 和 870 nm 两个波段的多角度偏振反射率通过查找表方法寻求 气溶胶解,然后根据总反射率资料对气溶胶作进一 步的筛洗和订正,同时得到地表反照率结果。根据 此方法并利用 POLDER/ADEOS1 实际观测的 1997年4月11日晴空资料反演了华北地区气溶胶 光学厚度和地表反照率区域分布,并给出了利用 NCEP 再分析资料订正由地形高度引起的 Rayleigh 散射变化的具体方法。北京地区气溶胶光学厚度反 演结果与地基华盖计的地基观测结果较为接近,内 蒙古锡林郭勒草原与 Han 等^[40] 的反演结果也很接 近。地表反照率的结果与土地利用类型的地表反照 率特征进行了定性对比分析,这些对比分析证明反 演结果是可信的。另外,此反演方案同样也适用海 洋上空气溶胶的定量反演,因此,标量辐射和偏振 信息的联合利用为实现全球尺度的大气气溶胶和地 表反照率的定量反演提供了条件。

参考文献 (References)

- Liou K N, Freeman K P, Sasamori T. Cloud and aerosol effect on the solar heating rate of the atmosphere. *Tellus*, 1978, 30: 62~70
- [2] Twomey S A. Role of aerosols in influencing radiative properties of clouds. International Symposium on Radiation in the Atmosphere, H.-J. Bolla, Ed. Science Press, Princeton, USA, 1977. 171~174
- [3] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. Science, 1989, 245: 1227~1230
- [4] Hansen J E, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. J. Geophys. Res., 1997, 102: 6831~6864
- [5] Anderson T L, Charlson R J, Schwartz S E, et al. Climate

forcing by aerosols—A hazy picture. *Science*, 2003, **300**: 1103~1104

[6] 钱孝琳, 阚海东, 宋伟民, 等. 大气细颗粒物污染与居民每日死亡关系的 Meta 分析.环境与健康杂志, 2005, 22 (4): 246~248

Qian Xiaolin, Kan Haidong, Song Weimin, et al. Meta analysis of association between air fine particulate matter and daily mortality. J. Environ. Health, 2005, **22** (4): 246~248

- [7] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for atmospheric correction. Int. J. Remote Sen., 1988, 9: 1357~1381
- [8] Holben B N, Vermote E, Kaufman Y J, et al. Aerosol retrieval over land from AVHRR data—Application for atmospheric correction. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sen.*, 1992, 30: 212~222
- [9] Kaufman Y J, Remer L. Detection of forest using mid-IR reflectance: An application for aerosol studies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sen.*, 1994, **32**: 672~684
- [10] Fraser R S, Kaufman Y J, Mahoney R L. Satellite measurements of aerosol mass and transport. Atmos. Environ., 1984, 18 (12): 2577~2584
- [11] Kaufman Y J, Fraser R S, Ferrare R A. Satellite measurements of large scale air pollution methods. J. Geophys. Res., 1990, 95 (D7): 9895~9909
- [12] 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 (4):638~648
- [13] 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
- [14] 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——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 Sens. (in Chinese), 2002,6(5):321~ 327
- [15] Herman B M, Browning S R, Currant R J. The effect of atmospheric aerosols on scattered sunlight. J. Atmos. Sci., 1971, 28: 419~428
- [16] Rondeaux Genevieve, Herman M. Polarization of light reflected by crop canopies. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **38**: 63 \sim 75
- [17] Bréon F M, Tanre D, Lecomte P, et al. Ploarized reflectance of bare soils and vegetation: Measurements and models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sen.*, 1995, **33**: 487~499

- [18] 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
- [19] Herman M, Deuzé 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
- [20] Bréon F M, Deuzé J L, Tanré D, et al. Validation of spaceborne estimates of aerosol loading from sun photometer measurements with emphasis on polarization. J. Geophys. Res., 1997, 102 (D14); 17187~17195
- [21] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS1 polarized measurements. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D5): 4913~ 4926
- [22] 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
- [23] 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 Beiying,Lü Daren. Simulation of twilight characteristics after Pinatubo eruption with Monte-Carlo method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1989, 13: 204~213
- [24] 吴北婴, 吕达仁, 孙金辉. 曙暮光天光光度计. 科学通报, 1992, 15: 1437
 Wu Beiying, Lü Daren, Sun Jinhui. Photometer for twilight observation. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1992, 15, 1437
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 段民征, 吕达仁. 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. 大气科学, 2007, **31** (5): 757~765

Duan Minzheng, Lü Daren. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurements. I: Theory and simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (5): 757~765

- [29] 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
- [30] Quaas J, Boucher O. Constraining the first aerosol indirect radiative forcing in the LMDZ GCM using POLDER and MO-DIS satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L17814, doi: 10.1029/2005GL023850
- [31] Bréon F M. POLDER Level-1 Product Data Format and User Manual. CNES, Paris, France, 1997. 2~8
- [32] Bréon F M. Parasol Level-1 Product Data Format and User Manual. CNES, Paris, France, 2005. 2~8
- [33] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1991, 46 (5): 413~423
- [34] 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
- [35] 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* (in Chinese), 2007, 17(3):65~70
- [36] 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. J. Remote Sens. (in Chinese), 2007, 11(3):359~366
- [37] Wiscombe W J. Mie Scattering Calculations—Advances in Technique and Fast, Vector-Speed Computer Codes, revised 1996. NCAR Technical Note TN-140+STR, 1979
- [38] 许黎,冈田菊夫,张鹏,等.北京地区春末-秋初气溶胶理化 特性的观测研究.大气科学,2002,26(3):401~411
 Xu Li, Okada Kikuo, Zhang Peng, et al. An observational study of physical and chemical characteristics of atmospheric aerosol particles from late spring to early autumn over the Beijing area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, 26 (3): 401~411
- [39] Han Zhigang, Lü Daren. Retrieval of atmospheric aerosol over mid-latitude grassland with POLDER data. Advances in Space Research, 2002, 29 (11): 1759~1764