

文章编号: 1672-8785(2019)01-0024-08

非线性最优化的 MODIS 气溶胶多参数反演研究

岳家宝¹ 谢东海^{1,2,*} 郑利娟³ 吴 昊⁴ 林允晖¹ 鲁 晗¹

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048;

3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

4. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘 要: 为了弥补地基观测气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)范围受限等缺点, 通过卫星影像反演 AOD 的方法逐渐兴起, 而简化气溶胶反演算法(Simplified Aerosol Retrieval Algorithm, SARA)与传统反演方法相比更具普适性。为进一步提升精度, 提出了一种非线性最优化的中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)气溶胶多参数反演方法。该方法以 SARA 反演的 AOD 为初始值, 对 AOD、单次散射反照率(Single Scattering Albedo, SSA)(ω)、不对称性因子(Asymmetric Factor, ASY)(g)、地表反射率拟合参数($\rho'_s = k * \rho_s + b$)同时优化, 以期得到最优解。结果表明, 同等条件下, 非线性最优化方法明显优于 SARA。单点精度验证结果与全球气溶胶自动观测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)相比, 非线性最优化方法的相关系数为 0.8118, 优于 SARA 的 0.2624。与官方气溶胶产品(MOD04)相比, 7 月 6 日非线性最优化方法的相关系数为 0.7612, 优于 SARA 的 0.5916; 5 月 3 日非线性最优化方法的相关系数为 0.9036, 优于 SARA 的 0.8788。

关键词: SARA; 非线性最优化; AOD; MODIS; AERONET

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.01.005

Study of Nonlinear Optimization of MODIS Aerosol Multi-parameter Inversion

YUE Jia-bao¹, XIE Dong-hai^{1,2,*}, ZHENG Li-juan³, WU Yu⁴, LIN Yun-hui¹, LU Han¹

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environment Processes and Digital Simulation,
Capital Normal University, Beijing 100048, China;

3. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;

4. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100048, China)

收稿日期: 2018-12-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0212302)

作者简介: 岳家宝(1994-), 男, 山东临沂人, 硕士, 主要研究领域为定量遥感。

E-mail: yuejiabao@Foxmail.com *通讯作者 Email: xdhbj@126.com

Abstract: To overcome the shortcoming of traditional ground-based methods of which the observation is limited, the method of inverting aerosol optical depth (AOD) by remote sensing image is gradually emerging. Compared with the traditional inversion methods, the Simplified Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) is more universal. To further improve the accuracy, a nonlinear optimization method which uses multi-parameters to invert aerosol from Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is proposed. By treating the aerosol optical depth inverted by SARA as the initial value, the method optimizes the optical thickness, single scattering albedo (ω), asymmetry factor (g) and surface reflectance fitting parameter ($\rho' = k * \rho_s + b$) simultaneously, so as to obtain the optimal solution. The results show that under the same conditions, the nonlinear optimization method is obviously superior to the SARA. The correlation coefficient of the nonlinear optimization method for single point precision verification is 0.8118, which is better than the 0.2624 of SARA. Compared with the inversion values from MODIS aerosol product (MOD04), for the case of July 6, the correlation coefficient of the nonlinear optimization method is 0.7612, which is better than 0.5916 of SARA. For the case of May 3, the correlation coefficient of nonlinear optimization method is 0.9036, which is better than 0.8788 of SARA.

Key words: SARA; nonlinear optimization; AOD; MODIS; AERONET

0 引言

气溶胶是指悬浮在大气中的液体或固体微粒共同组成的相对稳定的多相体系,其主要来自于自然源和人为因素等^[1],自然源主要包括沙尘、海盐粒子等,人为因素主要包括城市交通污染、工业气体排放等。气溶胶质粒能吸收并散射大气辐射,影响大气中的许多物理和化学过程。目前,气溶胶观测方法主要有两种^[2-4]:一种是地基气溶胶观测,主要通过地面环境监测站或 AERONET 对大气中的气溶胶进行监测;另一种是通过卫星遥感监测。地基点监测具有连续、实时的特点,但仅能对小范围内的气溶胶监测,大范围的监测尚不可行^[5],也不能反映出气溶胶的空间动态变化趋势。而气溶胶具有生存周期短、时空尺度变化大的特点。卫星遥感具有覆盖范围广、实时性强等特点,利用卫星遥感可以对大范围内气溶胶的动态变化趋势进行有效监测^[6],从而弥补地基监测的局限性。

MODIS 是搭载在 TERRA 和 AQUA 两颗卫星上的传感器,是用于观测全球生物和物理过程的重要仪器。它共有 36 个光谱通道,光谱范围在 0.405 ~ 14.385 μm 波段内,覆盖可见光、近红外、中红外和热红外波段,提供三种空间分辨率的数据:250 m(band1~2)、500

m(band3~7)和 1 km(band8~36);其时间分辨率高,每 1~2 天可获取地球表面的白天可见光数据和夜间的红外影像。由于 MODIS 具有波段多、时间分辨率高的特点,在大范围的资源调查上更具优势,在实时监测和应急处理方面具有很大的价值,也被广泛应用于地表、大气研究当中。使用 MODIS 数据进行气溶胶反演,不仅能较好地监测气溶胶的动态变化趋势,也能更好地利用 MODIS 数据分辨率较高的特点对特定区域进行监测。

国际上卫星遥感气溶胶反演理论研究始于 20 世纪 70 年代中期^[6]。早期反演过程中使用的算法主要有 Kaufman Y J 等^[7]提出的暗目标法(Dark Target, DT)和 Hsu N C 等^[8]提出的深蓝算法(Deep Blue, DB)。DT 算法适用于浓密植被地区,DB 算法适用于亮地表,两者各有优缺点。随着卫星传感器的增多,反演算法也更加多样化,主要有 Leeuw G D 等^[9]提出的改进暗像元法、Tanré D 等^[10]提出的结构函数法、Deuzé J L 等^[11]提出的偏振方法、Hsu N C 等^[12]提出的改进混合 DB 算法、唐家奎等^[13]提出的双星协同法。Chu D A^[14]提出了利用 MODIS 数据进行 AOD 反演的方法。为了验证利用 MODIS 数据反演方法的可行性,毛节泰等^[15]对北京地区 MODIS 卫星的气溶胶数据与地面光度计做了精度验证,结果表明两

者的相关性较好。杨东旭等^[16]使用 MODIS L1B 数据对北京地区的 AOD 进行了反演, 结果与地基数据的相关性较高。刘佳雨等^[17]基于 MODIS 数据对北京地区进行了 AOD 反演, 结果符合地基监测趋势。Ichoku C 等^[18]则在不同空间尺度下对气溶胶遥感方法进行了论证, 发现局部气溶胶的反演值高于实测值。夏祥鳌^[19]通过 AERONET 数据与 MODIS 数据资料进行对比, 发现 MODIS 气溶胶产品数据值高于 AERONET 监测值。利用 MODIS 数据结合相关方法, 戴燃坡等^[20]基于两天的 MODIS 数据中多幅卫星影像, 并通过构建 Angstrom 指数方程来进行 AOD 反演。李晓静等^[21]则基于 6S 辐射传输模型, 通过暗像元法以及结构函数法, 利用 $0.47\ \mu\text{m}$ 和 $0.66\ \mu\text{m}$ 通道数据进行 AOD 反演。范娇等^[22]基于 MODIS 数据, 结合确定气溶胶类型的数学模型进行 AOD 反演。

以 DT 和 DB 算法为代表的 AOD 反演方法在反演过程中需要大量的先验知识, 需要输入模型构建查找表(Look Up Table, LUT)。该过程较复杂, 针对不同地表、不同区域需要输入不同的气溶胶条件。Bilal M 等^[23]在 2013 年提出了 SARA, 该算法不需要建立查找表, 可直接利用 MODIS 相关数据进行气溶胶反演。Bilal M 等^[24]于 2014 年在北京地区对不同灰霾条件下的 SARA 的稳定性和反演精度进行了验证, 结果表明与地基数据的相关性较高。他们又于 2015 年^[25]在京津冀地区对不同分辨率数据下 SARA 与 DT、DB 算法的性能做了实验, 结果表明, SARA 的误差范围小于 DT 和 DB 算法。王晶杰等^[26]基于 SARA 反演了京津冀地区的 AOD, 反演结果的精度较高。

SARA 的优点是不依赖查找表, 而且能得到较高分辨率的气溶胶反演结果。但是输入的数据依赖 MODIS 和地基产品数据, 其中对反演精度影响较大的地表反射率值来自地表反射率产品(MOD09), ω 和 g 来自 AERONET 产品, 这些数据的精度会影响

AOD 的反演精度。为了提高 SARA 的反演精度, 本文以 SARA 反演得到的 AOD、MODIS 和 AERONET 产品数据为初始值, 并采用线性函数对地表反射率进行模拟, 同时对 AOD、地表反射率模型参数、 ω 和 g 进行优化, 得到精度更高的 AOD 反演值。

1 研究原理与方法

1.1 SARA 反演流程

MOD02HKM 数据主要用于获取大气顶层的反射率(ρ_{TOA}), MOD03 数据主要用于获取太阳角度和观测角度, MOD09GA 数据为地表反射率数据(ρ_s), MOD04 为气溶胶产品, 用于精度验证。AERONET 数据可获取反演参数 ω 和 g , 也可用于卫星反演结果精度验证。SARA 只使用绿波段(band4, $0.55\ \mu\text{m}$)来进行反演。相比传统的 DT 方法, SARA 可以获得任意地表上空较高分辨率的 AOD。

卫星影像获取的 ρ_{TOA} 可认为近似由三部分组成: 气溶胶反射率(ρ_{Aer})、瑞利散射反射率(ρ_{Ray})和大气程辐射反射率, 可表述为

$$\rho_{\text{TOA}}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Phi) = \rho_{\text{Aer}}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Phi) + \rho_{\text{Ray}}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Phi) + \frac{T(\theta_s) T(\theta_v) \rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Phi)}{1 - \rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Phi) S(\lambda)} \quad (1)$$

在单次散射过程中, ρ_{Aer} 可由气溶胶光学厚度 τ_a 、 ω 与气溶胶散射相函数 P_a 求出:

$$\rho_{\text{Aer}}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Phi) = \frac{\omega \tau_{a, \lambda}}{4 \mu_s \mu_v} P_a(\theta_s, \theta_v, \Phi) \quad (2)$$

其中

$$P_a(\theta_s, \theta_v, \Phi) = \frac{1 - g^2}{4\pi[1 + g^2 - 2g\cos(\pi - \Theta)]^+} \quad (3)$$

式中, λ 是波长, θ_s 是太阳天顶角, θ_v 是观测天顶角, Φ 是相对方位角, μ_s 是太阳天顶角的余弦值, μ_v 是观测天顶角的余弦值, 其中 ω 、 g 值可根据地基数据求出。由于地基观测数据不包含 $0.55\ \mu\text{m}$ 波段的数据, 需根据地基观测数据中的 $0.44\ \mu\text{m}$ 和 $0.675\ \mu\text{m}$ 波段进行插值计算得到。

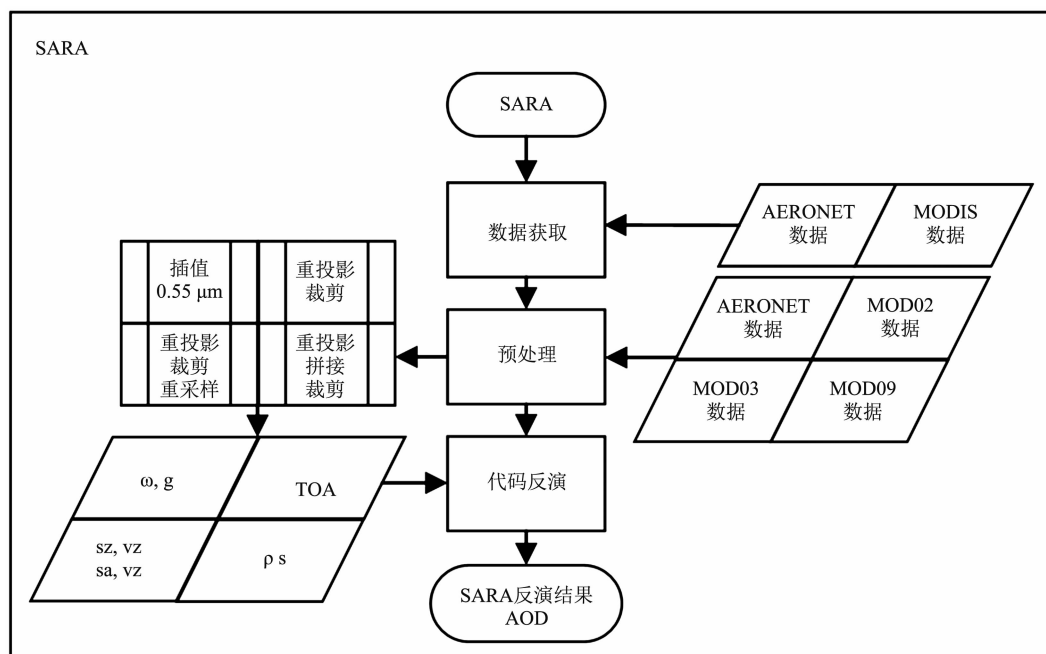


图 1 SARA 流程图

卫星接收到的光谱辐射中,一部分来自瑞利散射。瑞利散射是指当粒子尺度远小于入射光波长(小于波长的十分之一)时各方向散射光强度不同的一种现象。瑞利散射的反射率可由瑞利散射的光学厚度与相函数求出,其中瑞利光学厚度(τ_R)的计算可根据:

$$\tau_R = \frac{P_z}{P_0} (0.00864 + 6.5 \times 10^{-6} \times z) \lambda^{-(3.196 + 0.074 \times \lambda + \frac{0.65}{\lambda})} \quad (4)$$

瑞利散射相函数的计算可根据:

$$P_r(\Theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \Theta) \quad (5)$$

因此瑞利散射的反射率可由式(4)和式(5)联合得到:

$$\rho_{Ray} = \tau_R \times P_r(\Theta) \quad (6)$$

式中, P_z 是辐射仪处的气压值, $P_0 = 1013.25$ mbra, z 是辐射仪所在的高程值, Θ 是散射角, 取值范围为 $[0, 180]$ 。

地表反射率在卫星反演 AOD 过程中是一个重要的因素^[27-28]。研究表明, 地表反射率 1% 的误差会使反演 AOD 的误差达到 10%^[7]。在 SARA 算法中, 使用大气后向散射率 $S_{(a)}$ 对

地表反射率进行修正:

$$S(\lambda) = (0.92\tau_r + (1-g)\tau_a) \exp[-(\tau_r + \tau_a)] \quad (7)$$

地表与大气层之间存在多次反射, 这部分辐射被称为程辐射, 具体可分为大气上行辐射透过率($T_{(\theta_s)}$)和大气下行辐射透过率($T_{(\theta_v)}$), 可用公式表达为

$$T(\theta_s) = \exp\left(-\frac{\tau_r + \tau_a}{\mu_s}\right) \quad (8)$$

$$T(\theta_v) = \exp\left(-\frac{\tau_r + \tau_a}{\mu_v}\right) \quad (9)$$

1.2 非线性最优化算法

为了提高反演精度, 针对地表反射率及相关输入参数的不确定性等因素提出了一种非线性最优化的气溶胶多参数反演算法。该算法对参与反演的相关参数进行优化运算, 从而求得最优解。SARA 算法使用的 ω 、 g 为地基数据中获取到的固定值; 直接采用 MOD09 获取的值为地表反射率。这些数据和实际的气溶胶参数存在差异。为了提高 MOD09 数据的稳定性, 采用线性变化模型来拟合地表反射率:

$$\rho'_s = k * \rho_s + b \quad (10)$$

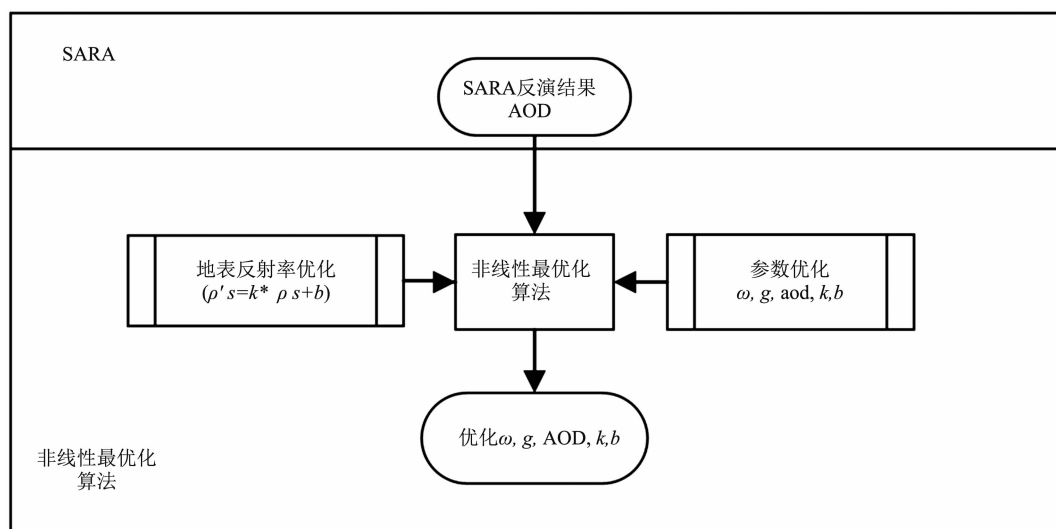


图 2 非线性最优化算法的流程图

最终参与非线性优化的参数共有 5 个，包括 ω 、 g 、SARA 反演初始值(AOD)、地表反射率线性优化中的 k 、 b 。由于输入的优化参数较多，在算法计算中开辟了 3×3 窗口，通过 9 个已知数求解 5 个未知数。非线性最优化方法可以通过设定初值提高结果的准确性， ω 、 g 均以地基数据获得的值作为初始值，AOD 则以 SARA 算法得到的结果作为初始值，将 k 的初值设为 1，将 b 的初值设为 0。

2 数据结果处理与分析

2.1 研究区域简介

本文以京津冀地区作为反演区域。京津冀位于我国华北地区，主要包括北京、天津以及河北部分地级市。近年来，京津冀地区发展迅

速，人口和交通压力持续增长。由于高污染、高耗能产业的出现以及机动车保有量的迅速增长，京津冀地区成为世界性雾霾问题最突出的地区之一。仅仅依靠地面观测站不能及时获取周边环境状况，也不利于实时掌握气溶胶的变化规律。使用卫星反演可以更有效地监测气溶胶长期的动态变化，为环境治理提供决策依据。

2.2 研究数据分析

AERONET 数据使用的是 Beijing(116.381E, 39.977N)站点数据。站点位于城区国家奥林匹克中心的西南侧。图 3(a)、3(b)、3(c)是分别对 Beijing 站点 2007~2009 年观测到的 AOD、SSA、ASY 有效数据(Level2)统计分析的结果：AOD 值大多数处于 0.5 以下，部分大于 0.5，极少数大于 2。这说明在观测时间内北京

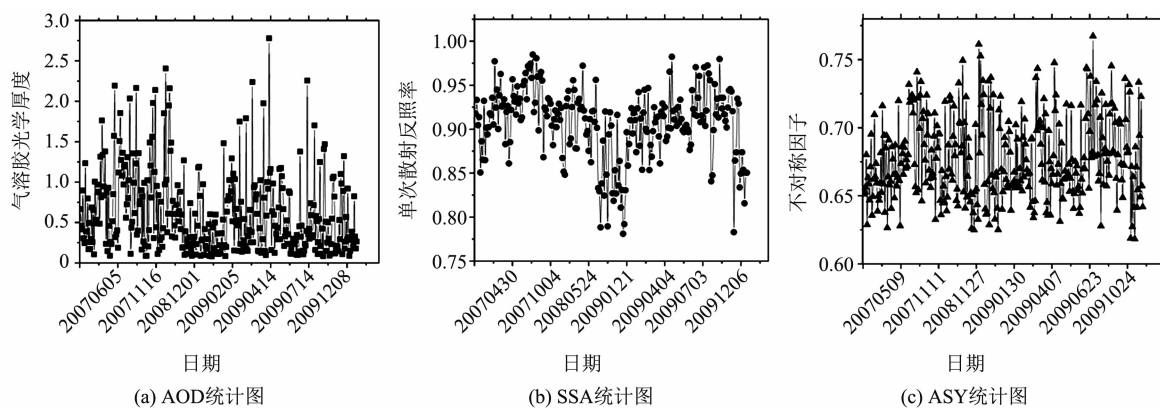


图 3 AERONET 数据统计图

地区以轻度污染为主, 重污染天气的天数较少。从季节变化方面看, 在冬春季, 气溶胶的日均值基本较低(0.25 以下); 夏秋季气溶胶的浓度值起伏较大, SSA 值变化较大, 但大多数处于 0.9 附近。从季节变化方面看, 冬春季 SSA 的值明显偏低, 主要原因可能为空气中存在具有吸光作用的细粒子, 且由于冬季取暖排放大量的未燃烧完全的煤炭粒子^[29], 夏秋季 SSA 值略高于冬春季, 主要原因可能是夏秋季节多风, 空气中易漂浮大量沙尘粒子。ASY 值的变化没有 SSA 的变化显著, 无起伏较大的值, 大多数处于 0.66 附近。从季节变化上看, ASY 值在夏秋季时的变化比冬春季显著, 整体值偏高。

2.3 结果分析

图 4(a)、4(b)为 SARA、非线性最优化算法与 AERONET 数据单点的对比图, 在影像中选择离站点最近的像元进行反演。同时, 为了保证反演的精度, 选择在卫星数据获取时间的邻近值作为地基数据中 SSA 和 ASY 的值。由图 4 可以看出, 同等条件下, 和 SARA 算法相比, 非线性最优化算法的反演值与地基数据的相关性较高, 非线性最优化后的结果相关性可以达到 0.8118, SARA 的相关性仅有 0.2624。优化前后均存在反演误差相对较大的点。非线性最优化对较小值的优化效果优于较大值, SARA 的反演精度随着地基值的增大而降低。由图 4(c)可以看出, 与 SARA 相比, 非线性最优化后的结果与地基数据变化趋势的一致性较高。

图 5 为 AOD 反演结果的影像, 图 5(a)、5(b)、5(c)、5(d)为 2008 年 7 月 6 日, Beijing 站点的 AOD 监测值为 0.15; 图 5(e)、5(f)、5(g)、5(h)为 2009 年 5 月 3 日, Beijing 站点的 AOD 监测值为 0.23。AOD 反演结果与 MOD04 相比, 大致趋势一致, 并且对 MOD04 未反演到的区域做了补充。为了验证整体精度, 将 SARA 反演后的结果、非线性最优化的结果分别与 MOD04 进行对比, 结果如图 6 所示。由图 6(a)

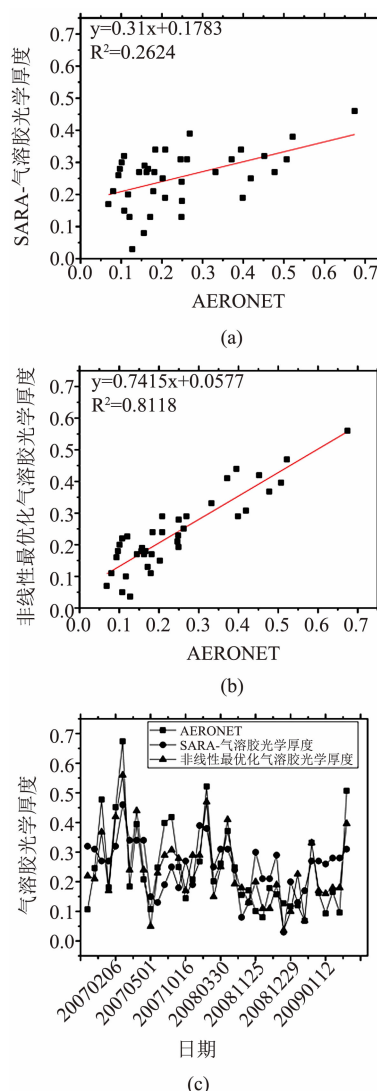


图 4 SARA、非线性最优化结果与 AERONET 的对比图

可以看出, 相同反演条件下, SARA 与 MOD04 的相关系数为 0.5916, 非线性最优化结果与 MOD04 的相关系数为 0.7612, 优于 SARA。图 6(b)中, 相同反演条件下, SARA 与 MOD04 的相关系数为 0.8788, 非线性最优化结果与 MOD04 的相关系数为 0.9036, 优于 SARA。整体来看, SARA 算法的反演结果在 0.2 左右变化较大, 反演误差也较大, 而最优化后的结果比 SARA 有一定的精度提升, 并且能保持较好的相关性。SARA 在 AOD 较小时(<0.1), 反演结果存在较大误差, 从而导致数据出现上下聚集, 而经非线性最优化后的结果能保持数据的稳定性, 虽也有误差大的点, 但总体相关性较好。

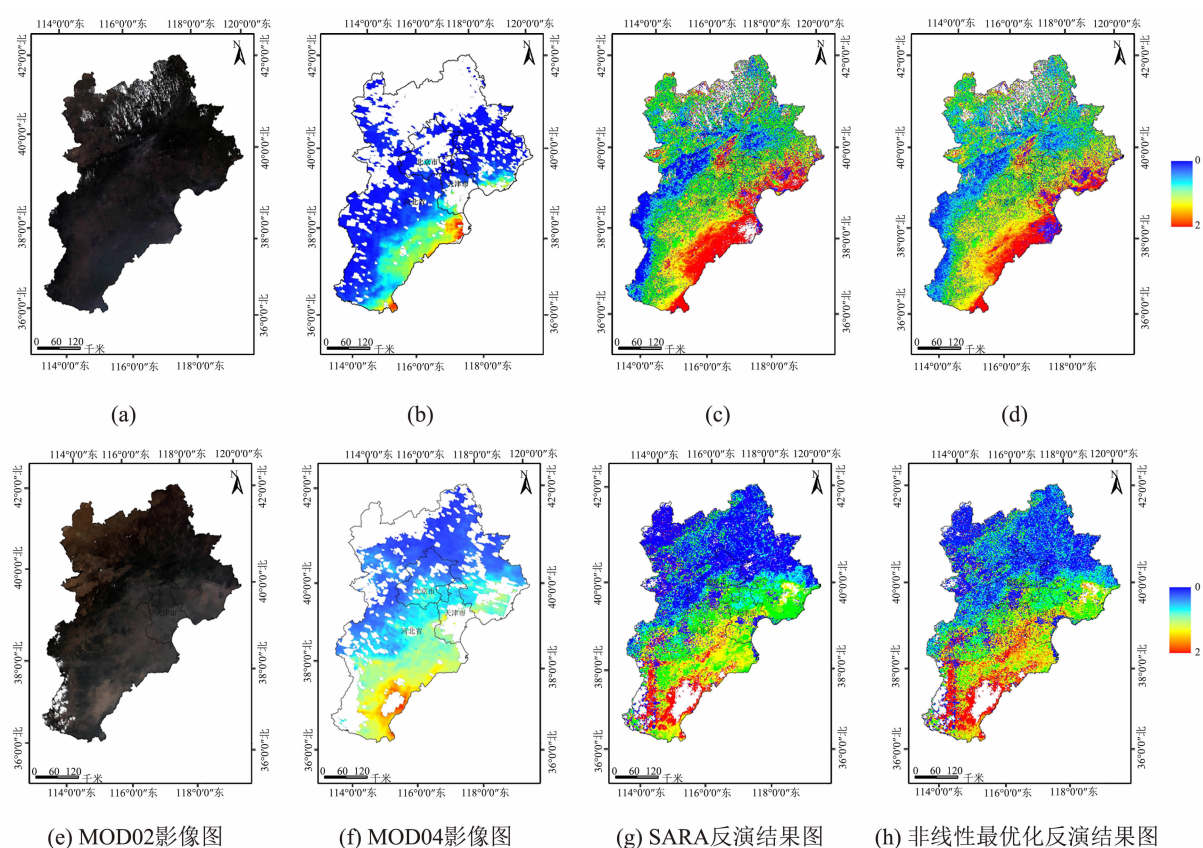


图 5 京津冀地区气溶胶光学厚度反演的对比图

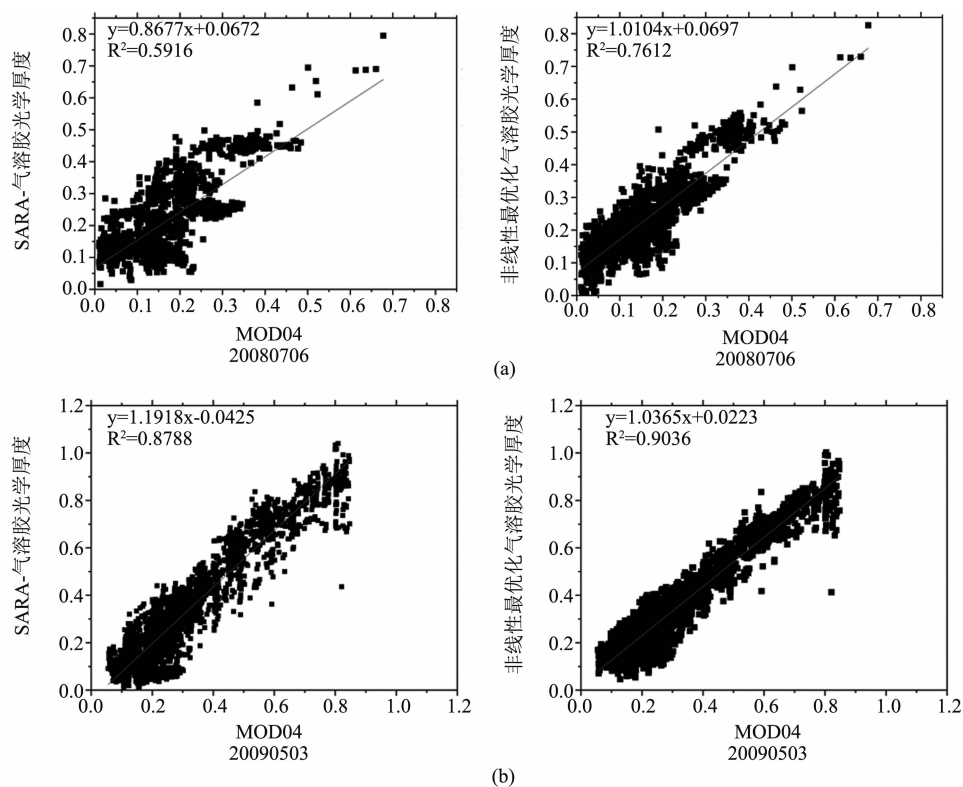


图 6 SARA、非线性最优反演结果与 MOD04 的对比图

3 结论

在 SARA 反演得到的 AOD 基础上, 提出了一种非线性最优化的多参数反演算法, 并利用地基观测数据和 MOD04 数据对结果进行了初步验证。

由于地表反射率对气溶胶反演的精度影响较大, 在反演过程中对地表反射率进行了线性拟合。单点验证及影像多点验证的结果表明, 利用拟合后的地表反射率及非线性多参数最优化方法得到的反演结果优于 SARA 算法, SARA 对 AOD 极低值的反演结果不太理想, 非线性最优化的方法能较好地保持反演结果的稳定性。后续研究工作中, 需要对算法继续进行优化, 主要包括利用长时间序列的影像进行反演, 并验证反演精度, 保证算法的稳定性; 通过统计分析地基数据中的 ω 、 g , 给出不同气溶胶条件下的最优输入值; 检验不同气溶胶条件下算法的适用性并验证精度; 提高算法在优化时的时间效率。

参考文献

- [1] Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, *et al.* Passive Remote Sensing of Tropospheric Aerosol and Atmospheric Correction for the Aerosol Effect [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D14): 16815–16830.
- [2] 汤玉明, 邓孺孺, 刘永明, 等. 大气气溶胶遥感反演研究综述 [J]. *遥感技术与应用*, 2018, **33**(1): 25–34.
- [3] 李加恒, 刘厚凤, 赵丹婷. 基于 MODIS 的气溶胶光学厚度反演算法及应用进展 [J]. *绿色科技*, 2012(2): 108–111.
- [4] 余卫国, 房世波, 余学祥. 中国卫星遥感气溶胶研究进展 [J]. *能源环境保护*, 2016, **30**(1): 1–6.
- [5] 王磊, 张鹏, 孙凌, 等. 多角度气溶胶遥感研究进展 [J]. *遥感信息*, 2012(1): 110–115.
- [6] 宋薇, 张镭. 大气气溶胶光学厚度遥感研究概况 [J]. *干旱气象*, 2007, **25**(3): 76–81.
- [7] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, *et al.* Operational Remote Sensing of Tropospheric Aerosol over Land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D14): 17051–17067.
- [8] Hsu N C, Tsay S, King M D, *et al.* Aerosol Properties over Bright — reflecting Source Regions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(3): 557–569.
- [9] Leeuw G D, Holzer — Popp T, Bevan S, *et al.* Evaluation of Seven European Aerosol Optical Depth Retrieval Algorithms for Climate Analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **162**: 295–315.
- [10] Tanre D, Deschamps P Y, Devaux C, *et al.* Estimation of Saharan Aerosol Optical Thickness from Blurring Effects in Thematic Mapper Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**(D12): 15955.
- [11] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote Sensing of Aerosols over Land Surfaces from POLDER — ADEOS — 1 Polarized Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D5): 4913–4926.
- [12] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced Deep Blue Aerosol Retrieval Algorithm: The Second Generation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(16): 9296–9315.
- [13] 唐家奎, 薛勇, 虞统, 等. MODIS 陆地气溶胶遥感反演—利用 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 数据协同反演算法 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2005, **35**(05): 474–481.
- [14] Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, *et al.* Validation of MODIS Aerosol Optical Depth Retrieval over Land [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(12): 1–4.
- [15] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比 [J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(S1): 127–135.
- [16] 杨东旭, 韦晶, 钟永德. 利用 MODIS 卫星资料反演北京地区气溶胶光学厚度 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, **38**(11): 3464–3469.

(下转第 38 页)