

文章编号: 0253-2239(2010) 10-2837-08

基于 AERONET SACOL 站观测资料的 沙尘气溶胶光学厚度卫星反演试验研究

白鸿涛¹ 冯建东² 陈勇航¹ 黄建平³ 张武³ 亢燕铭¹ 潘鹤¹
(¹ 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; ² 四川省农业气象中心, 四川 成都 610072)
³ 兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要 利用兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室(SACOL站)气溶胶地基观测资料订正出的地表反射率及构建的沙尘气溶胶模型,借助6S大气辐射传输模式,对Terra卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)的L1B多光谱资料,进行了沙尘气溶胶光学厚度的个例反演试验。结果表明,四种反演方案的沙尘气溶胶光学厚度的区域分布均比较合理,说明反演方法可行;考虑了波长指数,并用SACOL资料构建的气溶胶模型进行大气订正得出的地表反射率反演出的沙尘气溶胶光学厚度最接近实际测量值,误差为-7.3%。通过对反演过程中的误差进行数值试验检验,结果表明反演方法比较稳定。

关键词 沙尘气溶胶; 光学厚度; 地表反射率; 反演

中图分类号 P407.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2837

Experimental Study of Satellite Retrieval of Dust Aerosol Optical Thickness Using AERONET SACOL Site Observations

Bai Hongtao¹ Feng Jiandong² Chen Yonghang¹ Huang Jianping³
Zhang Wu³ Kang Yanming¹ Pan Hu¹

(¹ College of Environmental Science and Engineering, Donghua University of China, Shanghai 201620, China)
² Agricultural Meteorological Center in Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610072, China
³ Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract Employing the 6S atmospheric radiation transport model and Terra moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) L1B data, the experimental retrieval of dust aerosol optical thickness is performed using surface reflectance atmospheric correction and dust aerosol model built with aerosol observations at Semi-arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL). The results show that the four schemes of regional algorithm are feasible. The retrieval result derived from the atmospheric correction scheme using the aerosol model built by SACOL data with consideration for the Ångström exponent is closest to the surface observation. The relative error is -7.3%. The quantitative analysis of error using a numerical test is performed and the results show that the retrieval is stable.

Key words dust aerosol; optical thickness; surface reflectance; retrieval

收稿日期: 2009-12-09; 收到修改稿日期: 2010-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(40633017, 40575015)、国家973计划(2006CB403700)和干旱气象科学研究基金(IAM200807)资助课题。

作者简介: 白鸿涛(1985—),女,硕士研究生,主要从事大气辐射与遥感等方面的研究。

E-mail: yanshumole@yahoo.com.cn

导师简介: 陈勇航(1965—),女,博士,副教授,主要从事大气辐射与遥感等方面的研究。

E-mail: yonghangchen@yahoo.com.cn (通信联系人)

1 引 言

近年来东亚沙尘对其源区和下游地区的辐射平衡和气候的影响逐渐成为气溶胶研究中的热点问题之一^[1]。我国黄土高原半干旱地区是东亚沙尘气溶胶的主要源区^[2]，利用卫星遥感技术定量研究该地区的沙尘气溶胶特性及其时空变化，对深入研究东亚沙尘气溶胶的辐射强迫及其气候环境效应有着重要的意义，但目前该地区沙尘气溶胶光学厚度的卫星反演精度还有待改进。

国内学者利用卫星资料反演不同地区气溶胶光学厚度已做了不少工作，如利用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 资料基于 6S 辐射传输模式采用暗像元方法、扩展的暗像元以及 V5.2 算法，反演了西北兰州地区气溶胶光学厚度^[3~9]；冯建东等^[7] 尝试利用西北水库上空多通道 MODIS 遥感信号，建立类似于 Tamé 等的反演查算表，进行了反演陆地上空气溶胶粒子尺度分布的试验研究；毛节泰等^[8] 利用 MODIS 资料反演了北京地区气溶胶光学厚度分布，并用地面多波段太阳光度计作对比；李晓静等^[9] 基于 6S 辐射传输模式，同时采用暗像元方法和结构函数法反演了北京及周围地区的气溶胶光学厚度；王新强等^[10] 基于 6S 模型利用暗像元方法从 MODIS 图像反演江西省中部地区上空大气气溶胶光学厚度。目前利用卫星资料定量反演沙尘气溶胶的研究还很少。

我国黄土高原半干旱地区的兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室 (SACOL) 在兰州市东部 40 km，位于兰州大学榆中校区的翠英山 (35.946N, 104.137E, 1765 m) 上，站周围地貌以黄土高原为主，包括平原、山脊及土丘等，海拔高度在 1714~2089 m 之间^[11]。2006 年 8 月，SACOL 加入国际气溶胶自动监测网 (Aerosol Robotic Network, AERONET)。AERONET 有丰富的气溶胶观测资料，利用该站经过严格的校准、云掩码处理以及质量控制的 Version 2 Level 2.0 气溶胶数据集，构建比以往更为接近实际的气溶胶模型，在此基础上基于 6S 大气辐射传输模式对 MODIS 资料进行沙尘气溶胶光学厚度的反演试验研究，以探索改进反演精度的方法。

2 MODIS 遥感陆地上空气溶胶的基本原理

卫星观测的特定波长 λ 处大气顶部反射率 ρ_{λ}^* 可近似写为^[12]

$$\rho_{\lambda}^*(\theta_s, \theta_v, \phi) = \rho_{\lambda}(\theta_s, \theta_v, \phi) + \frac{\rho_{\lambda}^s(\theta_s, \theta_v, \phi)}{1 - \rho_{\lambda}^s(\theta_s, \theta_v, \phi) S_{\lambda}} F_{d,\lambda}(\theta_s) T_{\lambda}(\theta_v),$$

式中 ρ_{λ} 为大略径反射率， ρ_{λ}^s 为地表反射率， S_{λ} 为大气后向散射比， $F_{d,\lambda}$ 为地表反射率为零时归一化向下固徽通量， T_{λ} 为卫星观测的向上传输通量。根据上式，确定气溶胶模型和地表反射率后，可从表观反射率反演得到气溶胶光学厚度。通过 6S 大气辐射传输模式 (V4.1) 建立查算表 (LUT) 来进行辐射传输计算。在反演过程中，根据辐射的入射和接收角度，将查算表中的 ρ_{λ}^* 与卫星实测的大气上界通道反射率进行比较，当两者的拟合误差最小时，则其对应的值即为反演的气溶胶光学厚度。拟合误差均小于 0.0002，若某一像元存在多个小于阈值的解，则对其取平均作为反演解。

由于粒子体积尺度分布和复折射指数可以唯一地确定出的气溶胶辐射特性，即相函数 P 和单次散射反照率 ω_0 ，因此用 AERONET 的 SACOL 站点的气溶胶体积尺度分布和复折射指数来构建气溶胶模型 (SACOL 气溶胶模型)。地表反射率的获取在第 3 节详细描述。另外，模式中需要输入的几何条件、目标海拔高度和表观反射率取自 MODIS/Terra 影像资料 (LIB 的 1 km 分辨率)。大气模型通过输入水汽和臭氧浓度两种吸收气体定义，水汽浓度取自最接近卫星过境时次的 AERONET 的 SACOL 站点的气柱水汽资料，臭氧浓度由臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 提供。

3 地表反射率的确定

3.1 地表反射率的敏感性试验

对地表反射率对卫星观测的反射率的影响做敏感性试验。用 6S 辐射传输模式模拟不同气溶胶光学厚度，0.47 μm 蓝光通道，0.66 μm 红光通道和 2.12 μm 近红外通道表观反射率随地表反射率的变化情况，如图 1 所示。其中图 1(a) 红光通道，图 1(b) 为蓝光通道，图 1(c) 为近红外通道，气溶胶光学厚度 τ_{550} (550 nm) 取 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 七个值；地表反射率假定为均一朗伯体地表反射率，以步长为 0.05 从 0~0.3 变化。

由图 1(a) 可见，地表反射率较小时，0.66 μm 通道表观反射率对气溶胶光学厚度非常敏感，随着气溶胶光学厚度增大而显著增大；随着地表反射率的增大，表观反射率随着气溶胶光学厚度增大而增大的趋势逐渐减小。图中没有出现的阈值点^[3,4]，

除气溶胶模型的不同, 可能受几何路径条件以及大气条件等的综合影响。如图 1(b) 所示, 与红光通道不同, 蓝色通道表观反射率对气溶胶光学厚度不敏感, 表观反射率随气溶胶光学厚度的变化出现阈值点 $0.21^{[4]}$ 。如图 1(c) 所示, $2.12 \mu\text{m}$ 近红外通道的表观反射率也受气溶胶的影响, 尤其是地表反射率

低的时候, 近红外通道的表观反射率均随着光学厚度的增大而逐渐增大。假设近红外通道的表观反射率和地表反射率相当, 用 VISvs2.12 关系式^[11] 求出的可见光通道的地表反射率来进行气溶胶光学厚度的反演将会产生很大的误差。

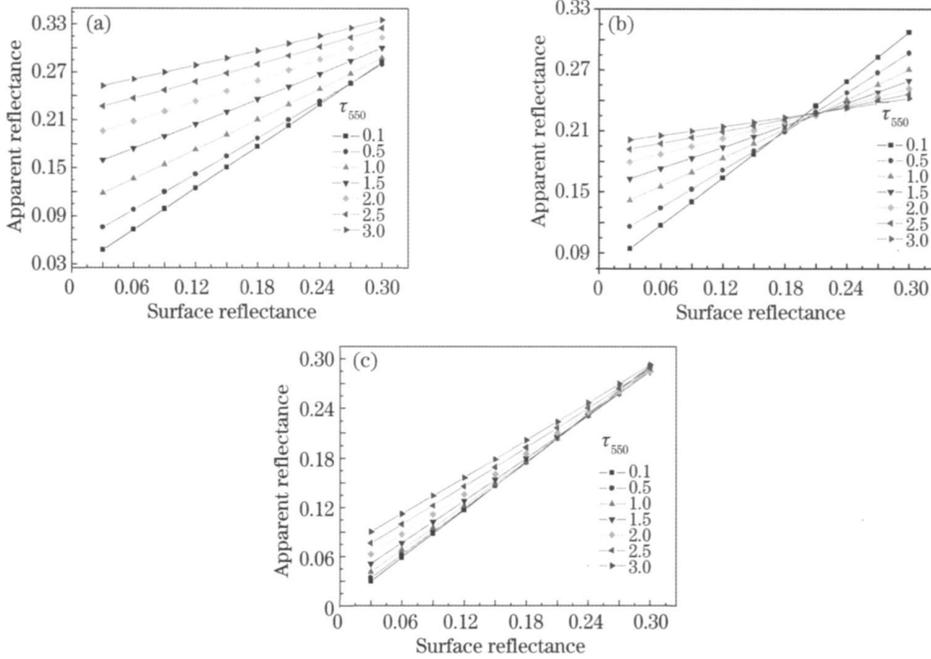


图 1 三个通道表观反射率随气溶胶光学厚度和地表反射率的变化。(a) 红光通道; (b) 蓝光通道; (c) 中红外通道
Fig. 1 Apparent reflectance against aerosol optical depth and surface reflectance in three channels. (a) red channel; (b) blue channel; (c) mid-infrared channel

3.2 地表反射率的确定

由于 $2.12 \mu\text{m}$ 通道受沙尘粒子影响, 不能直接应用 VISvs2.12 地表反射率关系来得到沙尘天气发生时的可见光通道地表反射率, 利用订正出的可见光通道地表反射率平均值作为反演沙尘时的地表反射率。根据 $\tau_{550} < 0.3^{[11]}$ (2007 年 3 月 21 日, 3 月 27 日, 4 月 18 日, 5 月 1 日, 5 月 4 日, 5 月 5 日, 5 月

24 日, 5 月 28 日) 及 Ångström 指数 $\alpha > 0.6$ (2007 年 3 月 21 日, 4 月 18 日, 5 月 24 日和 5 月 28 日) 选取 2007 年 3~5 月间晴空 MODIS 资料进行大气订正, 从而得到 4 种 3 个通道 ($0.47, 0.66$ 和 $2.12 \mu\text{m}$) 地表反射率, 如表 1 所示。所用气溶胶模型分别为 SACOL 气溶胶模型和 6S 的大陆气溶胶模型 (6S 模式中自带)^[11]。

表 1 用于气溶胶反演的四种地表反射率方案

Table 1 Four schemes of surface reflectance used for aerosol retrieval

Schemes	1	2	3	4
Select condition	$\tau_{550} < 0.3$	$\tau_{550} < 0.3$ and $\alpha > 0.6$	$\tau_{550} < 0.3$	$\tau_{550} < 0.3$ and $\alpha > 0.6$
Aerosol Model	SACOL aerosol model		Continent aerosol model	

针对研究区域, 如何选取合适的通道 ($0.47 \mu\text{m}$ 或 $0.66 \mu\text{m}$) 进行沙尘光学厚度的反演, 还需要知道 SACOL 地区的地表反射率范围。表 2 和表 3 列出了以上 4 种地表反射率方案中可见光通道 ($0.47 \mu\text{m}$ 和 $0.66 \mu\text{m}$) 和近红外通道 ($2.12 \mu\text{m}$) 地表反射率的统计结果。

光) 通道地表反射率在 $0.0983 \sim 0.1711$ 之间, 在这个范围内, 随着气溶胶光学厚度增大, 表观反射率仍然对地表反射率的变化很敏感。而 $0.47 \mu\text{m}$ (蓝光) 通道地表反射率最大值为 0.0814 , 虽小于阈值点 0.21 , 但与红光相比, 表观反射率对光学厚度敏感性不大。因此选取 $0.66 \mu\text{m}$ 红光通道来进行沙尘气溶胶光学厚度的反演试验。

从表 2 和表 3 中可知, 研究区域 $0.66 \mu\text{m}$ (红

表 2 SACOL 气溶胶模型大气订正得出的三个通道地表反射率的统计

Table 2 Statistics of surface reflectance (SACOL aerosol model) in three channels

	Scheme 1			Scheme 2		
	0.66 μm	0.47 μm	2.12 μm	0.66 μm	0.47 μm	2.12 μm
Min	0.1174	0.0586	0.1832	0.0983	0.0492	0.1567
Max	0.1639	0.0814	0.2551	0.1514	0.0775	0.2451
Mean	0.1394	0.0700	0.2156	0.1244	0.0631	0.1990
SD	0.0110	0.0060	0.0163	0.0122	0.0070	0.0201

表 3 大陆型气溶胶模式大气订正得出的三个通道地表反射率的统计

Table 3 Statistics of surface reflectance (continental aerosol model) in three channels

	Scheme 3			Scheme 4		
	0.66 μm	0.47 μm	2.12 μm	0.66 μm	0.47 μm	2.12 μm
Min	0.1212	0.0507	0.1865	0.1033	0.0401	0.1600
Max	0.1711	0.0756	0.2586	0.1623	0.0697	0.2487
Mean	0.1427	0.0622	0.2189	0.1317	0.0552	0.2024
SD	0.0109	0.0060	0.0163	0.0131	0.0072	0.0201

4 沙尘气溶胶光学厚度的反演

2007年3月27日至4月2日,我国北方受蒙古气旋东移和冷空气的影响,新疆、甘肃、内蒙古中西部以及华北等地区发生强沙尘天气。2007年3月28日SACOL站出现气溶胶光学厚度全年最大值2.0389,选取该天作为个例来进行沙尘气溶胶光学厚度的反演试验。图2为2007年03月28日以SACOL站点为中心的10 km \times 10 km 面积的沙尘

气溶胶光学厚度分布(6S大气辐射传输模式输出为550 nm气溶胶光学厚度),把MODIS遥感反演结果与地面测量结果进行对比,两者吻合较好。

总体来看,SACOL西部区域沙尘光学厚度空间变化不大,而在SACOL东部,气溶胶光学厚度空间变化很大。从4种反演结果可见气溶胶的区域分布强烈受到地形的影响,均有以下特征:1)海拔较高的山区气溶胶光学厚度明显低于盆地地区。区域中

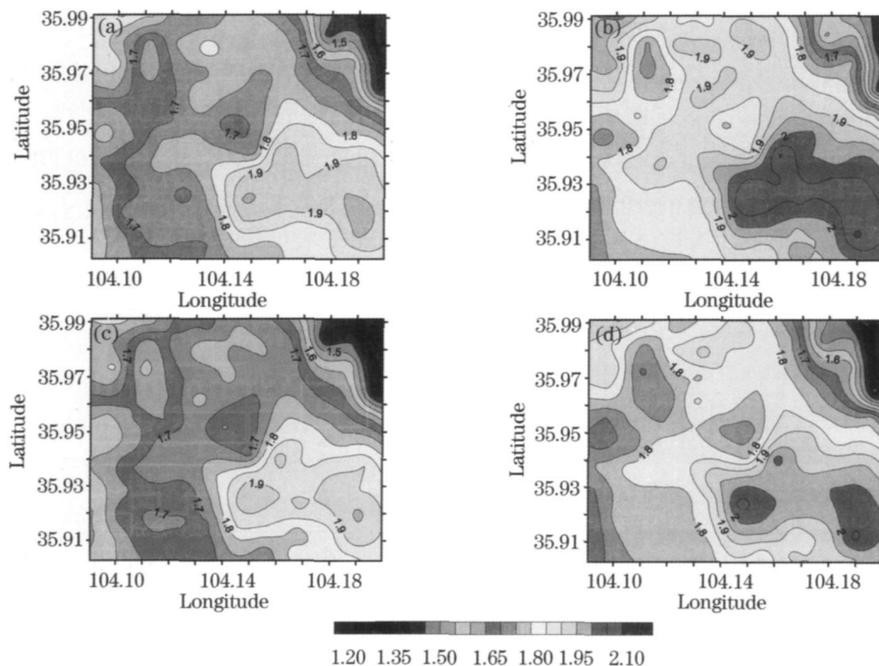


图 2 2007年3月28日550nm沙尘气溶胶光学厚度分布。(a)方案1;(b)方案2;(c)方案3;(d)方案4

Fig. 2 Dust aerosol optical thickness at 550 nm on Mar. 28, 2007. (a) scheme 1; (b) scheme 2;

(c) scheme 3; (d) scheme 4

心 SACOL 位于翠英山顶, 其两侧都是山谷, SACOL 所处的地区气溶胶光学厚度明显低于周围地区, 主要因为二者在边界层热力和动力结构上具有显著的不同^[8]; 2) 沙尘气溶胶光学厚度大值覆盖区域偏向 SACOL 东南部, 其中方案 2 和方案 4 中沙尘气溶胶光学厚度大于 2.0; 3) 东北角方向上存在显著的沙尘气溶胶光学厚度小于 1.5 的低值区。

由于半干旱地区下垫面较复杂, 使得气溶胶空间变化梯度也较大, 另外沙尘天气发生时, 常伴有大风, 空气移动速度加快, 因此沙尘气溶胶的时间变化也比较迅速, 所以地基和卫星的对比观测对时间和空间的匹配应有更严格的要求。除了地形因素以

外, 工业等人类活动也可能对沙尘的分布存在影响。

表 4 为 550 nm 沙尘气溶胶光学厚度反演实验的结果统计, 不同方案的反演结果不同, 中心像元反演值和区域反演平均值均小于 SACOL 实际观测值。SACOL 中心像元反演结果, 方案 2 的反演结果最接近实际测量值, 相对误差仅为 -7.3%; 方案 3 的反演结果相对误差最大, 为 -15.15%。就反演区域平均结果, 同样是方案 2 的反演结果最接近实际测量值, 相对误差为 -8.13%, 且整个区域反演结果的变化范围最小; 方案 3 的反演结果相对误差最大, 为 -15.76%; 区域反演平均结果中, 方案 4 变化范围最大, 相差 0.85。

表 4 550 nm 沙尘气溶胶光学厚度反演结果统计

Table 4 Statistics of retrieval of dust aerosol optical thickness at 550 nm

	Scheme 1	Scheme 2	Scheme 3	Scheme 4
Center pixel retrieval	1.75	1.89	1.73	1.81
Relative error / %	-14.17	-7.30	-15.15	-11.23
Area mean retrieval	1.75±0.13	1.87±0.14	1.72±0.13	1.81±0.14
Relative error / %	-14.34	-8.13	-15.76	-11.16
Min	1.20	1.34	1.16	1.22
Max	1.98	2.11	1.96	2.07

总体上, 气溶胶光学厚度误差主要来源于地表反射率估算不准确。为了更好地综合评价 4 种反演方案得出的结果与实际观测值的接近程度, 给出了

反演的气溶胶光学厚度值以及与地面测量值的绝对误差的频率分布, 如图 3, 4 所示。

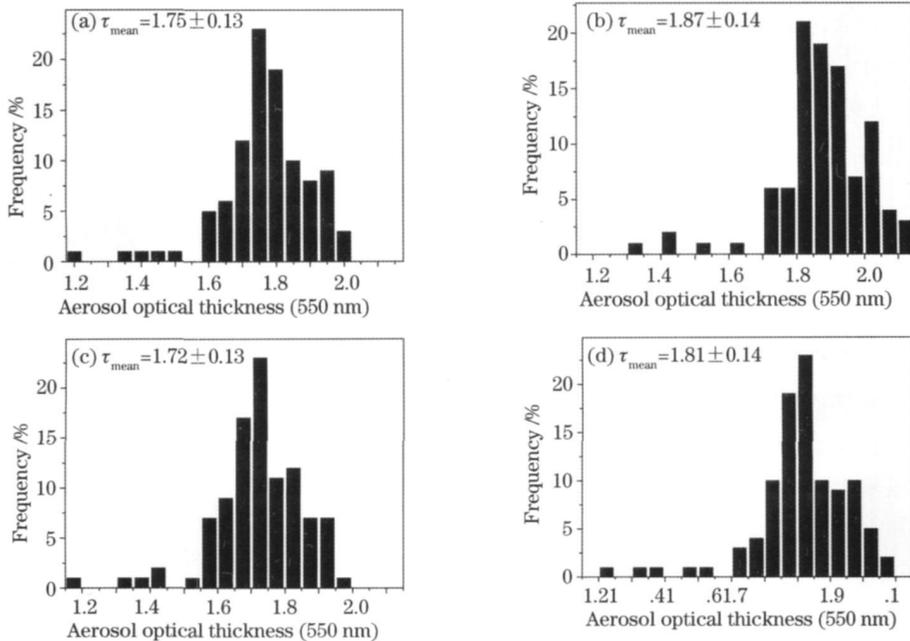


图 3 不同反演方案的沙尘气溶胶光学厚度频率分布。(a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3; (d) 方案 4

Fig. 3 Frequency distribution of the dust aerosol optical thickness retrieved using four schemes. (a) scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3; (d) scheme 4

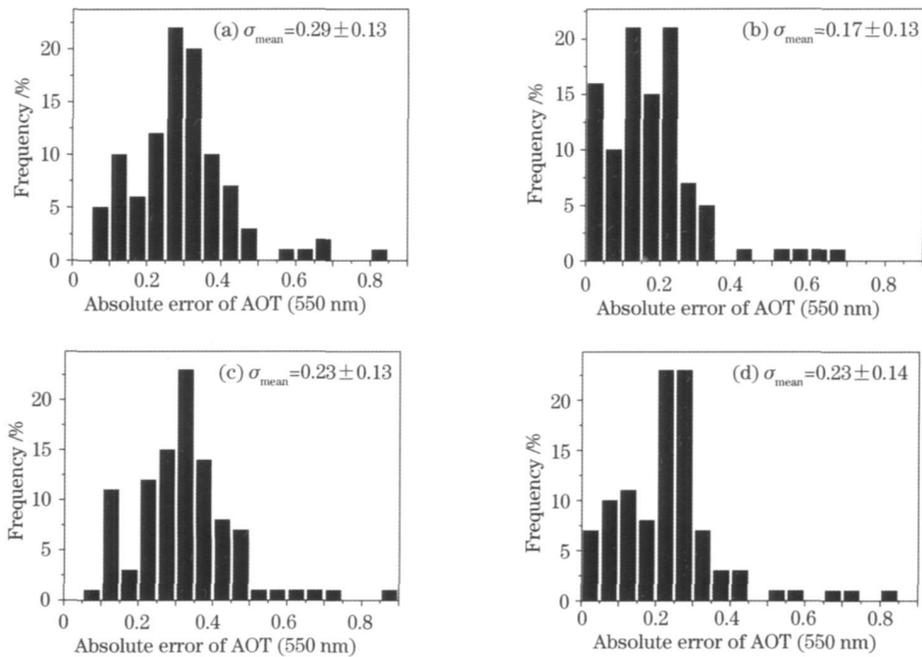


图4 不同方案反演的沙尘气溶胶光学厚度绝对误差的频率分布。(a) 方案1; (b) 方案2; (c) 方案3; (d) 方案4

Fig. 4 Frequency distribution of absolute error of the dust aerosol optical thickness retrieved using four schemes. (a) scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3; (d) scheme 4. AOT: aerosol optical thickness

通过分析得出, 4种反演方案中, 考虑了波长指数, 并用SACOL气溶胶模型进行大气订正的方案2的反演结果最接近实际测量值。从表2不同方案的地表反射率的统计值看出, 方案2的地表反射率区域平均值最小, 且变化范围也最小。因此, 地表反射率的准确确定对反演结果起关键的作用, 在选取大气订正的数据时, 除了考虑光学厚度外, 还应考虑波长指数 α 的影响, 剔除 $\alpha < 0.6$ 的数据, 减小大粒子散射对订正结果的影响。

5 反演过程中的误差分析

反演过程中的潜在误差包括由传感器校准, 对某一既定的地理位置假设了错误的气溶胶模型, 不精确的地形测量输入, 或者VISvs2.12地表反射率关系的错误估算等引起的随机误差、系统误差和光谱依赖性误差, 表现在测量的光谱反射率、几何条件或者其它输入的边界条件等随机或系统误差^[13, 14]。

5.1 数值试验设计方案

为验证反演方法的稳定性, 下面通过设计数值试验来对反演过程中的误差进行定量分析。数值试验设计如下:

1) 取与敏感性试验相同的几何路径条件, 大气模型和气溶胶模型作为真实值, 海拔高度取SACOL站点实际海拔高度(35.946N, 104.137E, 1965 m), 地表反射率取方案2中的区域平均值0.12, 通过6S辐射传输模式计算得到气溶胶光学厚度为1.8时的 $0.66 \mu\text{m}$ (红光)通道反射率值作为卫星的实际观测量。

2) 将反演过程中带有误差的输入条件, 通过6S辐射传输模式, 建立查算表, 根据上一步得出的卫星观测量反演得出光学厚度。将反演结果与设定的真实值进行比较分析。误差类型分别定为几何条件误差GeoError(所有角的随机误差达到 $\pm 5^\circ$), 地表反射率误差SfcError(红色通道地表反射率误差为 $-30\% \sim +30\%$), 海拔高度误差ElvError(用SACOL站点卫星提取的资料), 气溶胶模型误差ModError(6S模式中的沙尘气溶胶模型)。

5.2 不同影响因素的误差分析

表5~8分别为几何条件、地表反射率、海拔高度以及气溶胶模型误差的反演结果以及与设定的真实值的相对误差。

表 5 几何条件(太阳/卫星高度角、相对方位角)误差对反演结果的影响

Table 5 Effect of geometric errors (sun zenith angle, satellite angle and relative azimuth) on the retrieved results

Solar zenith		View zenith		Relative azimuth		τ	τ error / %
Value / ($^{\circ}$)	Error / %	Value / ($^{\circ}$)	Error / %	Value / ($^{\circ}$)	Error / %		
34.15	0	52.64	0	121.9	0	1.8	0
29.15	-14.64	52.64	0	121.9	0	2.004	11.33
39.15	14.64	52.64	0	121.9	0	1.559	-13.39
34.15	0	47.64	-9.5	121.9	0	1.995	10.83
34.15	0	57.64	9.5	121.9	0	1.539	-14.50
34.15	0	52.64	0	116.9	-4.1	1.851	2.83
34.15	0	52.64	0	126.9	4.1	1.729	-3.94

表 6 地表反射率误差对反演结果的影响

Table 6 Effect of the surface reflectance errors on the retrieved results

Surface reflectance	Surface reflectance error / %	τ	τ error / %
0.084	-30	2.07	15.00
0.096	-20	1.984	10.22
0.108	-10	1.895	5.28
0.12	0	0	0
0.132	10	1.701	-5.50
0.144	20	1.595	-11.39
0.156	30	1.484	-17.56

表 7 海拔高度误差对反演结果的影响

Table 7 Effect of the elevation errors on the retrieved results

Elevation / m	Elevation error / %	τ	τ error / %
1375.5	-30	1.788	-0.67
1572	-20	1.792	-0.44
1768.5	-10	1.796	-0.22
1965	0	1.8	0
2161.5	10	1.804	0.22
2358	20	1.808	0.44
2554.5	30	1.812	0.67

表 8 气溶胶模型误差对反演结果的影响

Table 8 Effect of the aerosol model errors on the retrieved results

Aerosol model	τ	τ error / %
SACOL_0328	1.8	0
Desert aerosol model	1.634	-9.22

对沙尘气溶胶光学厚度反演试验过程中误差的反演结果进行定量分析, 结果表明, 从几何条件和海拔高度误差对反演结果的影响来看, 校准或随机误差对反演结果存在影响, 当研究区域扩大, 其误差可能会更大; 假设的气溶胶模型不合理, 对反演的气溶胶光学厚度会产生较大误差。试验过程中主要考虑

的是地表反射率对反演结果的影响, 从分析来看, 反演试验中沙尘光学厚度值均低于地表测量值, 主要是由于对地表反射率的高估。所有的敏感性检验表明用于沙尘气溶胶光学厚度的反演方法比较稳定。

6 结 论

选用红光通道作为反演通道, 针对 2007 年 3 月 28 日个例进行了反演沙尘气溶胶光学厚度分布的试验研究。结果表明, 根据 $\tau_{550} < 0.3$ 且 $\alpha > 0.6$ 选取卫星数据, 用 SACOL 自定义气溶胶模型进行大气订正得出的地表反射率, 反演结果最接近实际测量值, 误差为 -7.3%。对最佳反演方案进行数值误差试验, 结果表明, 反演方法是可行的, 同时也说明 SACOL 资料的应用对于反演结果有一定改进。

由于地基观测在观测时间上与卫星过境时间上的匹配不够理想, 这对反演误差的产生有一定影响。另外, 利用大气订正得出的红光通道地表反射率来进行沙尘气溶胶光学厚度的反演, 对于 SACOL 地区的高地表反射率以及下垫面反射率变化大且复杂的情况会存在较大误差。研究将地面观测与卫星观测有机结合的方法, 可以应用于今后更大区域的沙尘气溶胶光学厚度的反演尝试。

致谢 本文所使用的 MODIS 卫星资料由美国航空航天局(NASA)戈达德太空飞行中心提供, 在此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 Wang Hong, Shi Guangyu, T. Aoki *et al.*. Radiative forcing due to dust aerosol over east Asia-north Pacific in spring of 2001 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(19): 1993~2000
王 宏, 石广玉, T. Aoki 等. 2001 年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫 [J]. *科学通报*, 2004, **49**(19): 1993~2000
- 2 Ma Jinghui, Zhang Hua, Zheng Youfei *et al.*. The optical depth global distribution of dust aerosol and its possible reason analysis [J]. *Climate and Environmental Research*, 2007, **12**(2):

- 156~164
马井会, 张 华, 郑有飞等. 沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(2): 156~164
- 3 Zhao Xiujuan, Chen Changhe, Zhang Wu *et al.*. Retrieval of aerosol optical depth over Lanzhou area using MODIS data [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(1): 97~103
赵秀娟, 陈长和, 张 武等. 利用 MODIS 资料反演兰州地区气溶胶光学厚度[J]. 高原气象, 2005, 24(1): 97~103
- 4 Huang Ting. The Three Experiments on Retrieval Aerosol Optical Depth over Lanzhou Area Using MODIS Data [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005
黄 艇. 利用 MODIS 资料反演兰州地区气溶胶光学厚度的三种方法试验[D]. 兰州: 兰州大学, 2005
- 5 Duan Lijie. Retrieval of Aerosol Optical Depth and Total Surface Radiative Forcing over Lanzhou Areas [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006
段丽洁. 兰州地区气溶胶光学厚度和地面总辐射强迫反演研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006
- 6 Song Wei. Retrieval of Aerosol Optical Depth by Extended Dark Target Method and V5.2 Algorithm over Lanzhou Area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007
宋 薇. 利用扩展暗像元法和 V5.2 算法反演兰州地区气溶胶光学厚度[D]. 兰州: 兰州大学, 2007
- 7 Feng Jiandong, Chen Changhe, Chen Yonghang *et al.*. The experimental study of retrieving dust aerosol size distribution using multichannel MODIS remote sensing data [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(2): 242~248
冯建东, 陈长和, 陈勇航等. 利用多通道 MODIS 遥感资料反演沙尘气溶胶尺度分布的个例试验[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 242~248
- 8 Mao Jietao, Li Chengcai, Zhang Junhua *et al.*. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations [J]. *J. Appl. Meteorology*, 2002, 13(suppl.): 127~135
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(suppl.): 127~135
- 9 Li Xiaojing. Retrieval Aerosols Optical Thickness over Beijing and Its Surrounding Area from MODIS Data [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2003
李晓静. 利用 MODIS 资料遥感北京及其周边地区气溶胶光学厚度研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003
- 10 Wang Xinqiang, Yang Shizhi, Zhu Yonghao *et al.*. Aerosol optical thickness retrieval over land from MODIS data based on the inversion of the 6S model [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2003, 20(5): 629~634
王新强, 杨世植, 朱永豪等. 基于 6S 模型从 MODIS 图像反演陆地上空大气气溶胶光学厚度[J]. 量子电子学报, 2003, 20(5): 629~634
- 11 Bai Hongtao, Chen Yonghang, Feng Jiandong *et al.*. Study of the surface reflectance relationships used in MODIS retrieval algorithm of aerosols over the semi-arid region of loess plateau [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 928~934
白鸿涛, 陈勇航, 冯建东等. 黄土高原半干旱地区 MODIS 反演气溶胶算法的地表反射率关系研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 928~934
- 12 Y. J. Kaufman, D. Tané, L. A. Kerner *et al.*. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *J. Geophys. Research*, 102(D14): 17051~17067
- 13 R. C. Levy, L. A. Remer, S. Mattoo *et al.*. Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance [J]. *J. Geophys. Research*, 112, D13211
- 15 R. C. Levy, L. A. Remer, O. Dubovic. Global aerosol optical models and application to moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol retrieval over land [J]. *J. Geophys. Research*, 112, D13210