

文章编号: 0455-2059(2012)02-0062-07

基于BRDF订正的兰州地区春季气溶胶 光学厚度反演实验

冯晶晶, 陈艳, 张武, 张兴华, 史晋森, 张北斗, 黄建平

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, 兰州 730000

摘要: 利用6S模式反演并分析兰州地区春季气溶胶光学厚度(AOD)分布情况, 探讨了双向反射分布(BRDF)对气溶胶光学厚度反演结果的影响. 结果表明: 兰州地区2010年春季气溶胶光学厚度高值中心位于西固工业区和城关区, 最大值分别为0.46和0.31. 不考虑BRDF时水面上空气溶胶光学厚度反演结果存在明显误差, 经Walthall BRDF订正后, 水面上空误差明显减小, 说明经过Walthall BRDF订正后的6S模式适用于水面上空的气溶胶光学厚度反演. 兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)站点(35.57°N, 104.08°E)反演值和实测值比较表明, 在无云晴天条件下, 选用Walthall BRDF模式可以提高AOD反演精度.

关键词: 6S模式; 气溶胶; 光学厚度; 双面反射分布; 兰州

中图分类号: P421

文献标识码: A

Retrieval of aerosol optical depth in spring over Lanzhou based on the BRDF correction

FENG Jing-jing, CHEN Yan, ZHANG Wu, ZHANG Xing-hua, SHI Jin-sen,
ZHANG Bei-dou, HUANG Jian-ping

Key Laboratory of Semi-arid Climate Changes with the Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The aerosol optical depth over Lanzhou area in spring was retrieved by 6S model, with or without considering the Walthall BRDF impact on the retrieved AOD. The results showed that there were two high value centers of AOD, 0.46 in the Xigu industrial district and 0.31 in the Chengguan district, Lanzhou. The retrieved AOD over the Liujiaxia reservoir manifested significant errors, which were reduced when the Walthall BRDF model was selected in 6S, suggesting that the 6S model with the Walthall BRDF model could be applied to the retrieval of AOD over water area. Comparing the inversion value with in-situ measurements over SACOL (35.57°N, 104.08°E) showed that in the sunny and cloudless conditions the Walthall BRDF model could improve the inversion accuracy of AOD.

Key words: 6S model; aerosol; AOD; BRDF; Lanzhou

随着气候全球变化问题日益受到关注, 气溶胶在全球气候变化中的作用也越来越受重视. 大气气溶胶粒子在大气中分布广泛, 在许多大气过程中扮演重要的作用, 影响全球气候变化和大气质量. 气溶胶辐射效应主要有三种: 直接辐射效应、间接辐射效应和半直接效应. 直接效应指气溶胶粒子散射和吸收太阳辐射和地面长波辐射从而

改变辐射收支; 间接效应是指大气气溶胶粒子作为云凝结核, 通过改变云的微物理特征进而改变云的辐射特征, 影响地—气系统的辐射收支; 半直接效应是指烟尘等对太阳辐射具有较强吸收作用的气溶胶粒子, 会将其吸收的太阳辐射能作为热辐射重新向外释放, 从而加热气团, 增加相对于地表的静力稳定度, 也可能导致云滴的蒸发, 造成云

收稿日期: 2011-06-21; 修回日期: 2011-12-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项项目(LZUJBKY-2009-k03)

作者简介: 张武(1960—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 教授, 博士, e-mail: wzhang@lzu.edu.cn, 研究方向为大气辐射与遥感, 通信联系人.

量减少和反照率减小^[1-2]. IPCC AR4中指出,气溶胶的人为贡献(主要是硫酸盐、有机碳、黑碳、硝酸盐和沙尘)共同产生变冷效应,其直接辐射强迫总量为 $-0.5[-0.9\sim-0.1]$ W/m²,其间接云反照率强迫为 $-0.7[-1.8\sim-0.3]$ W/m²,气溶胶也对降水产生影响^[3].

卫星遥感气溶胶的研究始于20世纪70年代.1976年,文献[4]利用Landsat-I卫星遥感资料获得了非洲西北部撒哈拉沙漠垂直空气柱中沙尘粒子浓度并讨论了测量精度.1977年,Howard^[5]首次指出气溶胶在海洋水色遥感中的影响,并提出了剔除气溶胶影响的方法.20世纪80年代以来,我国学者也对卫星遥感气溶胶进行了大量的研究工作.近年来,气溶胶光学特性的遥感反演方法已成为大气遥感领域的一个热门课题.李成才等^[6]利用GMS卫星资料反演巢湖湖面上空气溶胶光学厚度并与地面观测做了对比.邱金桓等^[7]从偏振信息独有的优势和潜力出发,以新一代多光谱、多角度偏振探测卫星PARASOL资料为基础,结合地面AERONET观测资料,研究了北京地区对流层气溶胶的光学特性.赵秀娟等^[8]利用6S模式对MODIS的红(0.66 μm)、蓝(0.46 μm)、中红外通道(2.1 μm)进行了行星反照率对地表反射率和气溶胶光学厚度的敏感性试验,并反演了兰州市气溶胶光学厚度.王钊等^[9]利用6S反演气溶胶光学厚度并应用于陕西关中一次区域大气污染分析.Christina等^[10]提出一种新的算法(Deep Blue)反演一些高反射率地表(例如干旱、半干旱和城市地区)上方的气溶胶特性.

多数反演工作通常是将地表作为均一朗伯体,不考虑地表BRDF的影响,这在地表性质相对均一的地区是可行的.而实际地表是复杂的,从而使地表反射率具有很强的方向性特征,地表反射率的微小误差将导致反演结果较大的误差^[10].本文通过扩展的暗像元法和6S模型,利用NASA提供的MOD00F(Terra MODIS Level 0 Raw)3,7通道资料进行了考虑地表二向性反射特征(BRDF)的订正试验研究后反演兰州地区高空间分辨率的气溶胶光学厚度分布情况,对提高利用MODIS卫星资料反演复杂下垫面地区气溶胶光学厚度的精度进行了尝试.

1 反演原理

卫星遥感大气气溶胶是基于卫星传感器探测到的大气上界的表观反射率 ρ^* ^[11]:

$$\rho^* = \frac{\pi L}{\mu_s E_s}. \quad (1)$$

其中: L 为卫星传感器测量到的大气上界辐射亮度; E_s 是大气上界太阳辐射通量; μ_s 是太阳天顶角余弦.

ρ^* 与地表二向反射率 $\rho(\theta_v, \theta_s, \phi)$ 之间的关系^[11]:

$$\rho^*(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v) = \rho_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v) + \frac{\rho(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)T(\theta_v)F_d(\theta_s)}{1 - S\rho_t}. \quad (2)$$

其中: θ_v, ϕ_v 分别是传感器天顶角和方位角; θ_s, ϕ_s 分别是太阳天顶角和方位角; $\rho_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)$ 是路径辐射(其与地表状况无关,是由大气分子和气溶胶的散射造成的); S 是大气后向散射比; ρ_t 观测角和入射角上平均的地表反射率; $T(\theta_v)$ 是向上进入卫星传感器视场方向的总透过率; $F_d(\theta_s)$ 是在地表反射率归一化为零时总的向下辐射通量,等价于总的向下透过率,由于气溶胶和分子对太阳光的吸收和后向散射作用,它的值小于1.0.

在单次散射近似中,路径辐射 $\rho_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)$ 与气溶胶光学厚度 τ_a ,气溶胶散射相函数 $P_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)$ 和单次散射反照率 ω_0 有关,可以表示为^[11]

$$\rho_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v) = \rho_m(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v) + \frac{\omega_0 \tau_a P_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)}{4\mu_v \mu_s}. \quad (3)$$

其中: $\rho_m(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)$ 是由于分子散射造成的路径辐射(取决于大气模式); μ_v 是传感器天顶角余弦; μ_s 是太阳天顶角余弦.(2)式中 $F_d(\theta_s)$, $T(\theta_v)$ 和 S 也取决于 ω_0 , τ_a 和 $P_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)$.

假设地表为朗伯体,将(3)式代入(2)式,整理得^[11]

$$\rho^*(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v) = \rho_m(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v) + \frac{\omega_0 \tau_a P_a(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)}{4\mu_s \mu_v} + \frac{\rho(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)F_d(\theta_s, \omega_0, \tau_a, P_a)T(\theta_v, \omega_0, \tau_a, P_a)}{1 - S(\omega_0, \tau_a, P_a)\rho_t}. \quad (4)$$

其中: $\rho(\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v)$ 为朗伯特性地表反射率.根据传输方程(4)卫星传感器探测的表观反射率 ρ^* 既是气溶胶光学厚度 τ_a 的函数,又是地表反射率 ρ 的函数.因为表观反射率 ρ^* ,太阳和传感器几何参数 $\theta_v, \theta_s, \phi_s - \phi_v$ 都可以通过卫星资料得到,因此,只要知道地表反射率 ρ ,对于固定的像元和气溶胶模式(固定 P_a 和 ω_0),理论上就可以得到单次散射气溶胶光学厚度 τ_a .反过来,若已知地面上空气溶胶光学厚度 τ_a ,气溶胶类型(气溶胶模式)和大气模式,也可以反演出地面的地表反射率.

2 反演流程

步骤 1 将 NASA 提供的 0 级数据用华云 EOS 软件解压、定标、校正得到地理定位场数据, 然后通过 ENVI 软件提取 3 通道 ($0.46 \mu\text{m}$)、7 通道 ($2.1 \mu\text{m}$) 表现反射率和相应太阳、卫星几何参数. 这些数据经过重采样处理, 空间分辨率为 250 m .

步骤 2 利用扩展暗像元法估算 3 通道地表反射率, 和步骤 1 中几何参数进行地理信息配准, 得到反射率对应的几何路径参数.

步骤 3 将以上步骤得到的表现反射率、地表反射率和几何路径参数代入 6S 模式; 同时确定 6S 其他参数, 如大气模式参数、气溶胶模式参数等, 再通过 6S 模式计算出每个像素点上 550 nm 光学厚度. 反演流程见图 1.

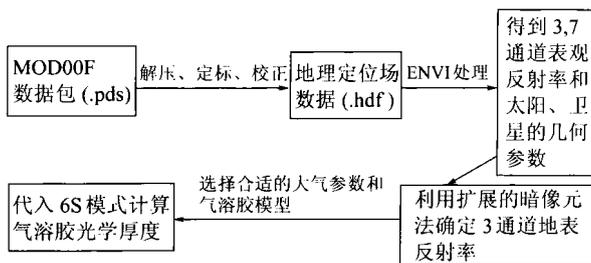


图 1 气溶胶光学厚度反演流程

Figure 1 Retrieval process of aerosol optical depth

3 反演结果分析

3.1 不考虑 BRDF 订正的 AOD 反演

利用 2010 年 3–5 月中的 MODIS 资料, 选取其中无云晴天的资料, 对兰州地区 ($103.2^{\circ}\sim 104.2^{\circ}\text{E}$, $35.3^{\circ}\sim 36.3^{\circ}\text{N}$) 进行反演, 然后进行区域平均, 可得到春季 AOD 区域分布图 (图 2). 6S 模式中相应参数大气模式: 中纬度大气模式; 气溶胶模式: 大陆性气溶胶; 地面反射类型: 均一朗伯地表^[8, 12].

由图 2 可见: 1) 兰州市区 ($103.55^{\circ}\sim 103.95^{\circ}\text{E}$, $36.0^{\circ}\sim 36.2^{\circ}\text{N}$) AOD 比其余地方明显要高, 并且有两个明显的高值中心, 一个位于西固区, AOD 反演值为 0.46, 另一高值中心位于城关区, AOD 反演值为 0.31; 2) 兴隆山地区处于 AOD 低值区; 3) 刘家峡水库上空 AOD 比周围偏高.

春季反演结果与实际情况吻合得较好. 西固区是我国石化生产基地, 生产过程中排放的污染物中含有大量气溶胶粒子; 城关区是兰州市主城区, 人口密度大, 交通运输繁忙, 加上春季取暖尚未完全结束, 导致气溶胶粒子排放量较大.

兴隆山地区位于兰州市东南, 拥有原始森林, 地表植被茂盛, 人口稀少, 空气清新, 因此 AOD 较

低, 反演结果也很好地验证了这一点.

刘家峡水库地区空气一般很清洁, AOD 较小, 而反演结果表明刘家峡水库上空 AOD 比周围高, 这与实际情况明显不符. 说明利用 6S 模式反演水面上空气溶胶光学厚度存在明显误差, 这也和赵秀娟等^[8, 12]反演的结果一致.

从图 2 中还可以看出气溶胶扩散方向是西北—东南走向, 这和兰州市地形走向是一致的.

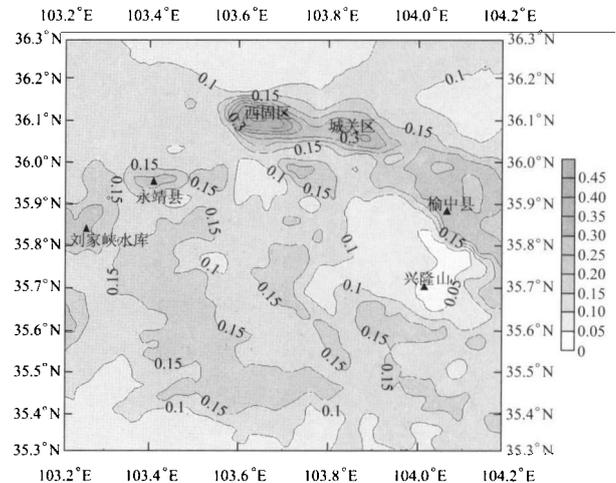


图 2 兰州市及周边地区春季气溶胶光学厚度分布图

Figure 2 Distribution of AOD in Lanzhou city and surrounding areas, spring of 2010

3.2 BRDF 订正

3.2.1 BRDF 简述

BRDF (bidirectional reflectance distribution function), 即双向反射率分布函数. 它是太阳—目标物—传感器几何关系的函数, 表示因三者位置的相对变化对卫星传感器获得的地表反射信息的影响. 1977 年 Nicodemus^[13] 首次提出了“双向反射率分布函数” (BRDF) 的概念, 描述在不同太阳天顶角下, 整个观测方向半球范围内地表反射率随角度分布 (即入射与出射辐射的比值的) 的无量纲函数.

3.2.2 BRDF 模型的分类

常用的 BRDF 模型一般由一些核函数和权重系数组成, 分为三大类: 物理模式、纯经验模式和半经验模式^[14]. 其中物理模式研究最为深入, 理论基础完善, 但这种模式以辐射传输理论为基础, 结构复杂、求解困难; 纯经验模式简单、实用性强, 适用于物理机制已经清楚的情况; 半经验模式综合了经验模式与物理模式, 目的在于降低物理模式的复杂程度. 在 6S 模式中, 一共提供了九种 BRDF 模式和一种直接输入双向反射率离散测量资料的

选择方式。

本文采用了Walthall模式来进行BRDF订正试验,Walthall模式广泛应用于植被指数(NDVI)的合成算法中,并取得了不错的效果^[15-16]。David等^[17]指出,Walthall模式参数可以直接通过矩阵求逆得出,从而避免数值反演问题,同时可以忽略临界效应,适用于混合像元。

3.2.3 Walthall 模式

Walthall模式是一种纯经验模式,于1985年由Walthall等^[18]提出:

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v) = a\theta_v^2 + b\theta_v \cos(\phi_s - \phi_v) + c. \quad (5)$$

其中: $\rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v)$ 为地表二向反射率; θ_v, ϕ_v 分别是传感器天顶角和方位角; θ_s, ϕ_s 分别是太阳天顶角和方位角; a, b, c 为待定参数,可以通过最小二乘法获得。

在6S模式中,考虑太阳方位角的变化^[11],将(5)式修改为

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v) = a\theta_s^2\theta_v^2 + a'(\theta_s^2 + \theta_v^2) + b\theta_s\theta_v \cos(\phi_s - \phi_v) + c. \quad (6)$$

其中 a, a', b, c 为待定参数。

3.2.4 MODIS 资料反演气溶胶光学厚度的BRDF 订正试验

选取2010年3月30日(沙尘),4月2日和4月4日(无云晴天)MODIS资料进行AOD反演,反演结果如图3-5。

根据反演得到的AOD,对相应天的蓝光波段(3通道)进行均一朗伯体假设的大气订正。利用6S

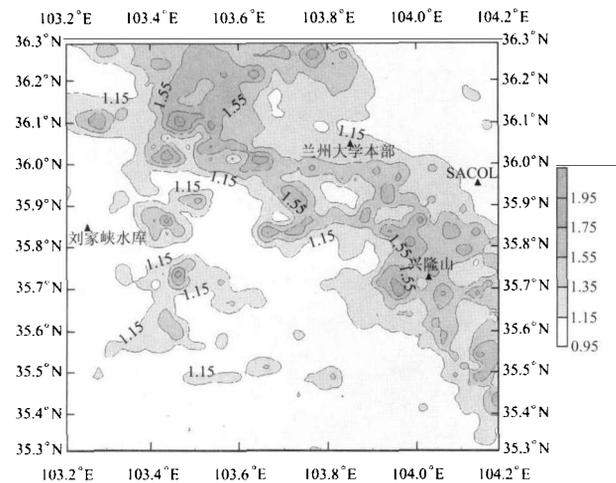


图3 2010年3月30日兰州市及周边地区气溶胶光学厚度分布图

Figure 3 Distribution of AOD in Lanzhou city and surrounding areas on March 30, 2010

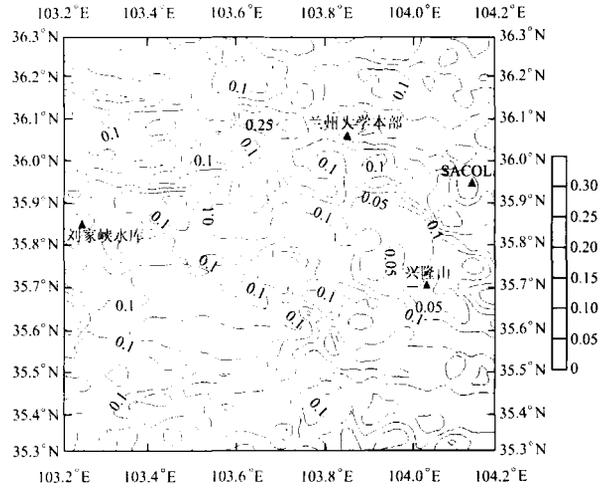


图4 2010年4月2日兰州市及周边地区气溶胶光学厚度分布图

Figure 4 Distribution of AOD in Lanzhou city and surrounding areas on April 2, 2010

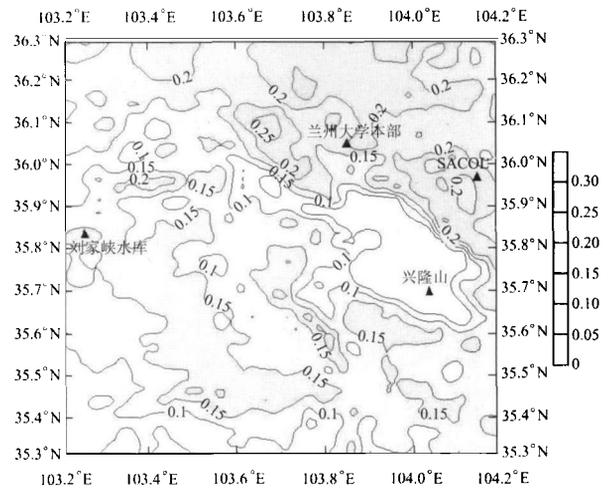


图5 2010年4月4日兰州市及周边地区气溶胶光学厚度分布图

Figure 5 Distribution of AOD in Lanzhou city and surrounding areas on April 4, 2010

模式反算出蓝光波段地表反射率后,再利用最小二乘法,通过(6)式对Walthall BRDF模式参数进行拟合,得到参数拟合结果(表1)。

表1 Walthall BRDF 模式参数拟合结果
Table 1 Fitting results of the parameter in Walthall BRDF

日期	模式参数			
	a	a'	b	c
2010-3-30	-1.012E-06	0.0023	0.0068	0.0312
2010-4-2	1.613E-06	0.0071	-0.0041	-0.0922
2010-4-4	1.626E-06	0.0069	-0.0038	-0.0847

将Walthall BRDF模式参数代入6S模式,大气模式选取为中纬度大气模式;气溶胶模式设定为大陆性气溶胶;地面反射类型:Walthall BRDF。反演结果如图6-8。

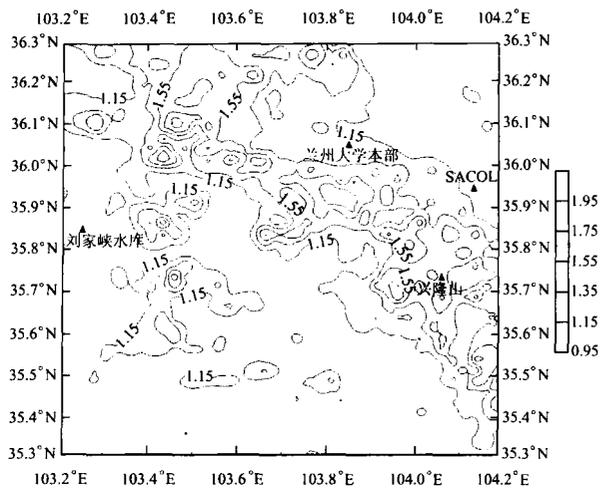


图 6 2010 年 3 月 30 日兰州市及周边地区气溶胶光学厚度 (BRDF 订正) 分布图

Figure 6 Distribution of AOD revised by BRDF in Lanzhou city and surrounding areas on March 30, 2010

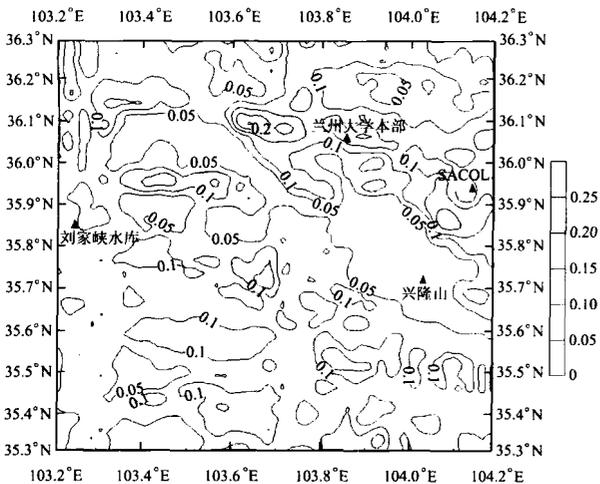


图 7 2010 年 4 月 2 日兰州市及周边地区气溶胶光学厚度 (BRDF 订正) 分布图

Figure 7 Distribution of AOD revised by BRDF in Lanzhou city and surrounding areas on April 2, 2010

对比图 3 和图 6 后发现: 1) Walthall BRDF 模式订正前后, 反演得到的 AOD 分布趋势总体不变. 2) 图 6 中有一东南—西北走向的 AOD 高值区, 从西固区延伸至兴隆山地区. 出现该情况可能的原因: 该日是浮尘天气, 兴隆山处在沙尘的扩散方向, 导致兴隆山地区 AOD 比平常要高; 在浮尘情况下, 天气状况不明, 6S 反演气溶胶光学厚度存在明显误差; SACOL^[19] 站太阳光度计 CE-318 同日实测 AOD (550 nm) 值为 1.73, 订正前 SACOL 站点反演值为 1.25, 相对误差为 28%, 订正后的反演值为 1.13, 相对误差为 35%, 订正效果不好.

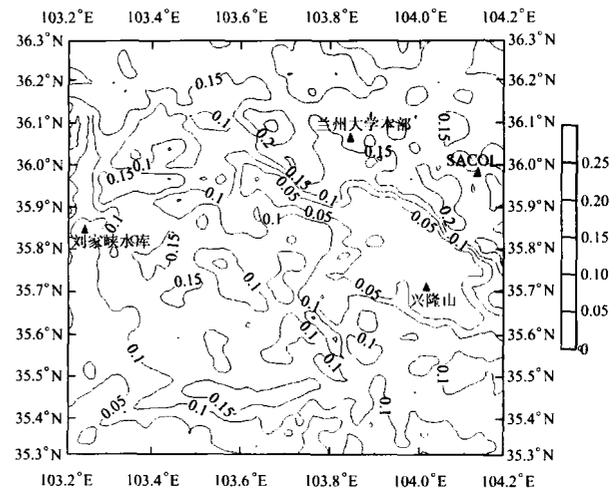


图 8 2010 年 4 月 4 日兰州市及周边地区气溶胶光学厚度 (BRDF 订正) 分布图

Figure 8 Distribution of AOD revised by BRDF in Lanzhou city and surrounding areas on April 4, 2010

对比图 4 和图 7, 图 5 和图 8, 可以看出: 1) 经过 Walthall BRDF 模式订正后, 反演到的兰州地区 AOD 分布趋势与订正前大致相同, 但 AOD 值总体偏小, 兰州市区 (103.55°~103.95°E, 36.0°~36.2°N) 光学厚度仍然比周围地区高, 兴隆山地区 AOD 仍然是低值中心区, 说明反演结果合理. 2) 刘家峡水库上空 AOD 不再是高值区, 说明 Walthall BRDF 订正模式对反演水面上空的气溶胶光学厚度能起到较好的效果. 3) SACOL 站点太阳光度计 CE-318 2010 年 4 月 2 日实测 AOD (550 nm) 值为 0.12, 订正前 SACOL 站点反演值为 0.15, 相对误差为 25%, 订正后反演值为 0.10, 相对误差为 17%; 4 月 4 日实测值为 0.17, 订正前 SACOL 站点反演值为 0.20, 相对误差为 18%, 订正后反演值为 0.18, 相对误差为 6% (表 2).

表 2 SACOL 站 550 nm 气溶胶光学厚度反演值与地面观测值 (CE-318) 比较

Table 2 Comparison of retrievals with ground observations by CE-318 of SACOL (550 nm)

日期	反演值	反演值 (BRDF)	实测值	相对误差/%	相对误差 (BRDF)/%
2010-3-27	0.058	0.053	0.049	18	8
2010-3-29	0.170	0.140	0.150	13	6
2010-3-30	1.250	1.130	1.730	28	35
2010-4-1	0.100	0.120	0.140	29	14
2010-4-2	0.150	0.100	0.120	25	17
2010-4-4	0.200	0.180	0.170	18	6
2010-4-13	0.310	0.240	0.210	48	14
2010-4-16	0.220	0.100	0.150	47	33

从表2可以看出,3月30日沙尘天气除外,其余天数经过Walthall BRDF模式订正后反演精度有所提高。

4 结论与讨论

春季兰州市区AOD比周边地区明显偏高,且有两个高值区,最大值位于西固区,次大值位于城关区。

通过SACOL站点的比较知,无云晴天下经过Walthall BRDF模型订正后反演得到的AOD值更接近真实值。说明Walthall BRDF模式在无云晴天下可以提高6S模式AOD反演精度。

在浮尘情况下,6S模式反演和Walthall BRDF订正效果均不理想。在气溶胶光学厚度很大的情况下,通过暗像元法确定7通道地表反射率存在较大误差^[8,10],即暗像元法可能不适用于沙尘天气。另外与6S模式要求能见度必须大于5 km也可能有一定的关系。

经Walthall BRDF模式订正后,反演得到的水面上空AOD值有明显改善。说明Walthall BRDF对反演水面上空AOD可以起到较好的效果。

地表反射率对于反演气溶胶光学厚度精度有着决定性的影响。如果可以更准确地确定地表反射率,就可以提高6S反演气溶胶光学厚度的精度。本文虽然利用Walthall BRDF模式初步确定比较精确地表反射率的个例,但仍缺少大量的对比试验,今后的研究工作可以进一步完善。

参考文献

- [1] FORSTER P, RAMASWAMY V, ARTAXO P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[C]//Solmon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 石广玉,王标,张华,等.大气气溶胶的辐射与气候效应[J].大气科学,2008,2(4):826-840.
- [3] IPCC. Climate change 2007: the AR4 synthesis report[M]. New York: Cambridge University Press, 2007: 10-50.
- [4] FRASER R S. Satellite measurement of mass of Sahara dust in the atmosphere[J]. Applied Optics, 1976, 15(10): 2471-2479.
- [5] HOWARD R G. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans[J]. Applied Optics, 1978, 17(10): 1631-1636.
- [6] 李成才,毛节泰,刘启汉,等.利用MODIS光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染[J].大气科学,2003,27(5):869-880.
- [7] 邱金桓,王普才,夏祥鳌,等.近年来大气遥感研究进展[J].大气科学,2008,32(4):841-853.
- [8] 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.
- [9] 王钊,彭艳,张树誉. MODIS资料反演AOD及其在区域大气污染监测中的应用[J].高原气象,2008,27(4):911-917.
- [10] HSU N Christina, TSAY Si-Chee, KING Michael D, et al. Aerosol properties over bright-reflecting source regions[J]. IEEE Trans Geos Remote Sensing, 2004, 42(3): 557-569.
- [11] VERMOTE E, TANRÉ D, DEUZÉ J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. IEEE Trans Geos Remote Sensing, 1997, 35(3): 675-686.
- [12] 黄艇,陈长和,陈勇航,等.利用MODIS卫星资料对比反演兰州地区气溶胶光学厚度[J].高原气象,2006,25(5):886-892.
- [13] NICODEMUS F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Applied Optics, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [14] WANNER W, LI X, STRAHLER A H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance[J]. J Geo-physical Research, 1995, D100(D10): 21077-21089.
- [15] VAN LEEUWEN W J D, HUETE A R, JIA S, et al. Comparison of vegetation index compositing scenarios: BRDF versus maximum VI approaches[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. Remote Sensing for a Sustainable Future. Lincoln: IGARSS, 1996: 1423-1425.
- [16] ZHANG Zeng-yan, KALLURI S N V, JAJÁ J, et al. Models and high-performance algorithms for global BRDF retrieval[J]. Computational Science & Engineering, IEEE, 1998, 5(4): 16-29.
- [17] DAVID L B, ALAN Strahler. Image brightness & BRDF workshop issues[C/OL]. CSIRO Earth Observation Centre BRDF Workshop ARSC8 [1996-03-28]. http://capita.wustl.edu/CAPITA/capitareports/CoRetriaval/brdf_disStrahler.pdf.

(下转第74页)

- iments with the national centers for environmental prediction global model[J]. *Tellus*, 2005, 57A: 528–545.
- [14] NEILL E, BOWLE R. Comparison of error breeding, singular vectors, random perturbations and ensemble Kalman filter perturbation strategies on a simple model[J]. *Tellus*, 2006, 58A: 538–548.
- [15] BAEK S J, BRIAN R, HUNT E K. Local ensemble Kalman filtering in the presence of model bias[J]. *Tellus*, 2006, 58A: 293–306.
- [16] KESTON W S. Cluster ensemble Kalman filter[J]. *Tellus*, 2007, 59A: 749–757.
- [17] ELANA J, HARLIM J, HUNT B R. A comparative study of 4D-VAR and a 4D ensemble Kalman filter: perfect model simulations with Lorenz-96[J]. *Tellus*, 2007, 59A: 96–100.
- [18] 徐海斌, 张韧, 刘科峰, 等. 小波分解与SOFM-BP网络结合的西太平洋副高数值预报产品优化技术[J]. *热带气象学报*, 2007, 233(3): 265–270.
- [19] 刘科峰, 张韧, 徐海斌, 等. 支持向量机与卡尔曼滤波集合的西太平洋副热带高压数值预报误差修正[J]. *气象学报*, 2007, 65(6): 450–457.
- [20] 钟元, 金一鸣. 台风预报路径的改进[J]. *热带气象学报*, 1997, 13(2): 126–130.
- [21] 王辉赞, 张韧, 王彦磊等. 基于Kalman滤波的副热带高压数值预报误差修正[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 661–666.
- [22] QIU Chong-jian, CHOU Ji-fan. A new approach to improve the numerical weather prediction[J]. *Sci China Ser B*, 1987, 17(8): 903–908.
- [23] 丑纪范. 数值天气预报的创新之路——从初值问题到反问题[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 673–682.
- [24] QIU Chong-jian, CHOU Ji-fan. Four-dimensional data assimilation method based on SVD: theoretical aspect[J]. *Theor Appl Climatol*, 2006, 83(7): 51–57.
- [25] 邵爱梅, 希爽, 邱崇践. 修正数值天气预报的非系统性误差的变分方法[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39(2): 235–244.
- [26] 顾震潮. 作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变作预报的等值性[J]. *气象学报*, 1958, 29(2): 93–98.
- [27] 顾震潮. 天气数值预报中过去资料的使用问题[J]. *气象学报*, 1958, 29(3): 176–184.
- [28] 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题[J]. *中国科学*, 1974, 17(6): 814–825.
- [29] 丑纪范. 为什么要动力—统计相结合?——兼论如何结合[J]. *高原气象*, 1986, 5(4): 367–372.
- [30] 郑庆林, 杜行远. 使用多时刻观测资料的数值天气预报新模式[J]. *中国科学*, 1973, 16(2): 289–297.
- [31] 郜吉东, 丑纪范. 数值天气预报中的两类反问题及一种数值解法——理想试验[J]. *气象学报*, 1994, 52(2): 129–137.
- [32] 范新岗, 丑纪范. 提为反问题的数值预报方法与试验——三类反问题及数值解法[J]. *大气科学*, 1999, 23(5): 543–550.
- [33] 邱崇践, 丑纪范. 改进数值天气预报的一个新途径[J]. *中国科学B辑: 化学, 生物学, 农学, 医学, 地学*, 1987, 17(8): 903–910.
- [34] 邱崇践, 丑纪范. 预报模式识别的扰动方法[J]. *大气科学*, 1988, 12(3): 225–232.
- [35] 邱崇践, 丑纪范. 预报模式的参数优化方法[J]. *中国科学B辑: 化学, 生物学, 农学, 医学, 地学*, 1990, 20(2): 218–224.
- [36] 丑纪范, 任宏利. 数值天气预报——另类途径的必要性和可行性[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(2): 240–244.

(责任编辑: 张 勇)

(上接第67页)

- [18] WALTHALL C L, NORMAN J M, WELLES J M, et al. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(3): 383–387.
- [19] HUANG Jian-ping, ZHANG Wu, ZUO Jin-qing, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau[J]. *Adv Atmos Sci*, 2008, 25(6), 906–921.

(责任编辑: 张 勇)