

张兴华, 张武, 陈艳, 等. 自定义气溶胶模式下兰州及周边地区气溶胶光学厚度的反演[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 402-410, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00039.

自定义气溶胶模式下兰州及周边地区气溶胶光学厚度的反演

张兴华, 张武, 陈艳, 冯晶晶, 闭建荣,
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, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过自定义气溶胶模式, 选取类大陆型气溶胶, 结合兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)气溶胶实测资料建立的气溶胶数谱模式, 反演兰州市及周边地区 100 km×100 km 范围内的气溶胶光学厚度(AOD)。结果表明, 在不同气溶胶模式下, AOD 分布表现出一些共同特征: 在兰州市西固区(工业区域)存在一个 AOD 高值区, 兴隆山、刘家峡水库地区 AOD 值较低, 而在榆中县城、临夏市等城镇区也表现出 AOD 值高于周边地区。对比反演结果与地面实测资料, 发现采用自定义气溶胶模型反演的精度有很大提高。

关键词: 气溶胶; 气溶胶光学厚度; 6S 辐射传输模型; 气溶胶模式

文章编号: 1000-0534(2013)02-0402-09 中图分类号: P421 文献标志码: A

doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00039

1 引言

虽然大气气溶胶在地球大气成分中所占的比例很小, 但由于它可以通过散射和吸收太阳辐射、作为云凝结核改变云的微物理特征来影响地气系统的辐射收支平衡, 进而对区域和全球气候产生影响^[1-5]; 还可参与云雾降水及各种大气光、电、化学过程, 对人体和其他生物的生理健康带来危害及产生一系列的环境问题, 如臭氧层的破坏和光化学烟雾的形成^[6-7], 因此大气气溶胶的研究日益受到关注并逐渐成为国际学术界的研究热点之一。

利用地基遥感能够获得较为准确的气溶胶信息, 但是这种方法只能在有限的区域内进行, 不能获得大范围的气溶胶光学特性。而卫星遥感因覆盖面积大可以弥补地基遥感的不足, 特别是在环境恶劣的沙漠、边远地区和广阔的海洋地区^[8], 因此利用卫星遥感大气气溶胶已成为近年来大气遥感领域的一个前沿。

卫星遥感大气气溶胶的主要原理是基于太阳辐

射通过大气被大气层散射或者到达地面并经过地表反射后返回太空被星载传感器探测到的过程中(即所谓的两个“大气传输过程”), 会因为受大气层中气体分子和大气气溶胶粒子的散射与吸收而最终引起辐射特征的变化。在地表反射率和主要大气气体分子的吸收与散射作用已知的情况下, 可根据所监测到的辐射特征变化(光谱特征)反演得到气溶胶的光学特征。

气溶胶光学厚度(AOD)是指沿辐射传输路径, 单位截面上所有吸收和散射物质对辐射产生的总削弱^[9]。它是气溶胶最主要的光学特征之一, 可通过它对太阳辐射的消光作用来反映大气中气溶胶的总含量和大气的浑浊程度。利用卫星遥感资料反演大气气溶胶光学厚度的研究始于 20 世纪 70 年代中期, 1977 年 NOAA 开始利用 AVHRR 可见光第 1 通道(0.63 μm)进行海洋上空气溶胶光学厚度的遥感^[10]; Carlson et al^[11]研究了地面观测的热带大西洋上空的撒哈拉沙尘粒子光学厚度与 NOAA-3 AVHRR 的辐射值之间的关系; Remer et al^[12]提出

收稿日期: 2011-09-07; 定稿日期: 2012-03-14

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955302); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2010-156)共同资助

作者简介: 张兴华(1988-), 男, 甘肃平凉人, 硕士研究生, 主要从事大气辐射和遥感研究。E-mail: zhangxhua06.ok@163.com

通讯作者: 张武。E-mail: wzhang@lzu.edu.cn

了利用 MODIS 资料进行海洋和陆地上空气溶胶光学厚度的反演方法; Tanré et al^[13] 的研究使人们认识到在陆地遥感中去除大气, 特别是气溶胶的浑浊效应的重要意义和可行性, 并由此开始了陆地气溶胶的遥感研究。80 年代中期, 国内科学家也开始利用卫星遥感资料反演大气气溶胶光学厚度的研究, 张军华等^[14] 利用 GMS-5 卫星的可见光通道资料遥感湖面上空大气气溶胶光学厚度, 并指出了 GMS-5 卫星可见光通道资料的优缺点; 毛节泰等^[15] 利用 MODIS 资料结合地面多波段太阳光度计的观测, 反演了北京地区气溶胶光学厚度分布, 并证实了 MODIS 气溶胶产品具有一定的精度, 可用于反演气溶胶的区域分布; 李晓静等^[16] 基于 6S 辐射传输模式(下称 6S 模式), 同时采用暗像元法和结构函数法建立了利用 EOS-Terra/MODIS 0.66 μm 和 0.47 μm 通道数据反演陆地气溶胶光学厚度的遥感模型, 用于获取北京及周边地区的气溶胶光学厚度。近年来对兰州地区的气溶胶光学厚度的反演研究也很多, 赵秀娟等^[17] 借助 6S 模式对 MODIS 的红、蓝、中红外通道进行了行星反射率对地表反射率和气溶胶光学厚度的敏感性试验, 验证了兰州地区蓝光通道与中红外通道地表反射率之间的关系与 Kaufman et al^[18] 给出的关系比较符合, 并反演了兰州地区的气溶胶光学厚度; 黄艇等^[19] 采用对比方法, 利用 MODIS 红、蓝和近红外通道行星反射率资料, 反演了水面上空的气溶胶光学厚度和几何平均质量粒径。

本文利用 EOS-Terra/MODIS 资料, 借助于 6S 模式, 使用 Kaufman et al^[25] 扩展的暗像元方法, 采用实测气溶胶数谱自定义气溶胶类型, 进行 MODIS 蓝、中红外通道的敏感性试验, 在 3 种不同气溶胶模式下(“类大陆型气溶胶模型”、“类大陆型+多峰对数正态粒子谱分布气溶胶模型”和“类大陆型+自定义气溶胶数谱模式的气溶胶模型”)反演兰州市及周边地区 100 km \times 100 km 范围内的 AOD, 并采用兰州大学半干旱气候与环境观测站 SACOL^[20] 地面实测结果进行检验。

2 资料选取

观测资料来源于兰州大学半干旱气候与环境观测站 SACOL(104.14°E, 35.95°N), 该站是按国际标准建设的气候观测平台, 目前已加入 AERONET 等多个国际大气观测网。其中气溶胶光学厚度观测采用法国 CIMEL 公司生产的新型全自动多波段太

阳光度计 CE-318^[23], 该仪器拥有从可见光至近红外共 8 个观测通道, 分别为 1 020 nm, 870 p1, 670 nm, 440 nm, 870 p2, 870 nm, 936 nm, 870 p3, 其中: p1、p2 和 p3 为 3 个极化通道, 通道带宽为 10 nm, 观测数据是经过 AERONET 网统一处理后的 level 1.5 数据。

选取 2010 年 4 月 2 日和 4 日的 MODIS 资料反演兰州市及其周边地区 100 km \times 100 km 范围内的气溶胶光学厚度, 反演范围为 35.3°-36.3°N、103.2°-104.2°E, 空间分辨率为 250 m。地表反射率的确定采用 Kaufman et al^[25] 扩展的暗像元方法, 6S 模式参数选为几何参数用户自定义(输入太阳、卫星的天顶角和方位角)、中纬度夏季大气模式和朗伯体地表, 对“类大陆型气溶胶模型”、“类大陆型+多峰对数正态粒子谱分布气溶胶模型”和“类大陆型+自定义气溶胶数谱模式的气溶胶模型”3 种不同气溶胶类型进行反演。选取 2010 年 4 月 2 日和 4 日 SACOL 站 CE-318 太阳光度计的实测 AOD 值与不同气溶胶类型下 AOD 反演值进行检验。

3 遥感原理和模式简介

3.1 遥感原理和方法介绍

卫星遥感大气气溶胶光学厚度发展于大气上界的行星反射率 ρ^* 的观测。假设陆地地表为均匀朗伯反射率地表, 且大气为水平和垂直均匀变化的, 卫星传感器测量得到的等效反射率(行星反射率) ρ^* ^[21-22]:

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

其中: L 为卫星传感器测量到的辐亮度; E_s 是大气上界太阳辐射通量密度; $\mu_s = \cos(\theta_s)$ 是太阳天顶角余弦。

此时若不考虑气体的吸收并假设陆地表面为均一朗伯体表面, 卫星观测到的行星反射率可表示为

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

其中: 传感器天顶角 θ_v 和方位角 ϕ_v 表示观测方向; 太阳天顶角 θ_s 和方位角 ϕ_s 表示太阳方位; ρ_s 为朗伯体假设的地表反射率; $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 为大气路径辐射, 由大气分子和气溶胶的散射造成的, 与地表状况无关; S 为大气球面反射率(后向散射

比); $T(\theta_v)$ 为向上总透过率; $T(\theta_s)$ 为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。

而 $T(\theta_v)$ 、 $T(\theta_s)$ 、 S 和 $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 都取决于单次散射比 ω_0 、气溶胶散射相函数 $P_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 和气溶胶光学厚度 τ_a 。因此, 当 P_a 和 ω_0 确定后卫星传感器观测到的行星反射率 ρ^* 既是气溶胶光学厚度 τ_a 的函数, 又是地表反射率 ρ_t 的函数。若地表反射率 ρ_t 已知, 并假定适当的大气气溶胶模式, 那么单次散射比 ω_0 、气溶胶散射相函数 $P_a(\theta_s, \theta_v, \phi_s - \phi_v)$ 都可以确定, 就可以利用特定的辐射传输模式反演得到气溶胶光学厚度 τ_a 。反之, 若已知气溶胶光学厚度 τ_a 并给定合适的大气参数, 也可以反演出地表反射率。

由式(2)可以看出, 当地表反射率很小时 ($\rho_t < 0.06$), 卫星观测到的行星反射率主要取决于大气贡献项即路径辐射(第 1 项); 当地表反射率很大时, 地表的贡献(第 2 项)将成为主要贡献项。

3.2 6S 模式简介

6S(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)是第二代太阳短波辐射的卫星信号模拟, 由美国马里兰大学地理系的 Vermote et al^[21]和法国大气光学实验室在 5S 辐射传输模式的基础上发展起来的, 主要用来模拟无云天气条件下星载或机载遥测仪器在 $0.25 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 光谱波段上卫星传感器理论上应该收到的辐射值。

该模式光谱分辨率提高到了 2.5 nm , 不但能较合理地处理空气分子和气溶胶的散射和吸收, 而且还能产生连续光谱, 避免了在光谱反演中产生较大的定量误差。此外, 还可以利用模式中的模拟参量, 确定试验区高度、传感器高度以及其他的一些变化。由于模式充分利用了分析表达式和预选大气模式, 从而使计算时间很短。然而该模式要求能见度必须 $> 5 \text{ km}$, 如果能见度 $< 5 \text{ km}$ 可能会导致反演的结果无效, 再加上云和积雪的影响以及各种客观原因导致可供使用的 MODIS 资料不连续。

4 反演参数的确定

利用卫星资料反演陆地气溶胶光学厚度的难点和前提条件是确定地表反射率和气溶胶模式。Hsu et al^[24]研究发现, 对于沙漠平均地表反射率, 当 $\tau = 1.0$, $\rho = 0.08$ 时, 0.01 的地表反射率(ρ)误差将会导致气溶胶光学厚度 τ 出现 20% 的误差。气溶胶模型选取的不合理造成的反演误差有时会很

大, 甚至超过地表反射率确定误差导致的反演误差, 因此, 气溶胶模型的选取在气溶胶反演过程中也很重要。

4.1 地表反射率的确定

文中地表反射率的确定采用 Kaufman et al^[25]扩展的暗像元方法, 即用 MODIS 的 $1(0.66 \mu\text{m})$ 、 $3(0.47 \mu\text{m})$ 和 $7(2.12 \mu\text{m})$ 通道的行星反射率资料, 得到研究区高分辨率的红、蓝通道地表反射率值。此方法需要选择气溶胶散射强, 地表反射率低的光谱通道(暗地表), 且卫星观测通道设计上要求波段宽度窄(短波长)。 $2.1 \mu\text{m}$ 波段在地表反射率较低的情况下 ($\rho_{2.1} \leq 0.15$) 受大气气溶胶的影响很小, 所以在暗地表可以将卫星传感器探测的 $2.1 \mu\text{m}$ 波段的行星反射率值近似代替此波段的地表反射率值。同时当 $2.1 \mu\text{m}$ 波长处的地表反射率 $\rho_{2.1} \leq 0.1$ 时, 根据 Kaufman et al^[18] 总结出的 $2.1 \mu\text{m}$ 波段地表反射率与 $0.66 \mu\text{m}$ 和 $0.47 \mu\text{m}$ 波段地表反射率之间的关系: $\rho_{0.66} = \rho_{2.1}/2$, $\rho_{0.47} = \rho_{2.1}/4$, 可以得到 $0.66 \mu\text{m}$ 和 $0.47 \mu\text{m}$ 波段的地表反射率, 进一步反演暗地表的气溶胶光学厚度。

Kaufman et al^[25] 又将暗像元方法进行了扩展, 将选取暗点的条件进行了放大, 使其不仅仅局限于潮湿、植被茂密的森林, 还可以用于一些地表反射率较大的地区。即在星下点, 暗像元方法可以用于中红外波段地表反射率 $\rho_{2.1} \leq 0.4$ 的情况; 在非星下点, 则可以扩展到中红外波段地表反射率 $\rho_{2.1} \leq 0.25 \times [0.5 \times (1/\mu_v + 1/\sqrt{\mu_s})]$ 的地表 (μ_v 为卫星天顶角的余弦, μ_s 为太阳天顶角的余弦), 而可见光 $0.66 \mu\text{m}$ 和 $0.47 \mu\text{m}$ 波段的地表反射率仍可利用 $\rho_{0.66} = \rho_{2.1}/2$, $\rho_{0.47} = \rho_{2.1}/4$ 得到。

4.2 气溶胶类型的选择

6S 模式中提供了 13 种气溶胶类型供用户选择, 其中 7 种为标准模式气溶胶类型, 即无气溶胶、大陆型模式、海洋型模式、城市型模式、沙漠型气溶胶背景的 Shettle 模式、生物模式和平流层模式。另外 6 种为自定义的气溶胶类型, 又可分为 4 种定义方式: 一是通过给定气溶胶的 4 种成分(沙尘性粒子、水溶性粒子、海洋性粒子和煤烟性粒子)的体积百分比自定义气溶胶模式; 二是用气溶胶的尺度谱分布函数自定义模式, 模式中的尺度谱分布函数共有 3 种: 多峰对数正态谱分布、修正的 Γ 谱分布和 Junge Power-Law 谱分布, 使用时需给出相应的谱分布系数和复折射指数; 三是利用太阳光度计的测量结果自定义一个模式; 四是利用米散射计

算结果(散射系数、消光系数、相函数、不对称因子等)来定义气溶胶类型。

根据国际气象与大气物理协会(IAMAP)定义的标准辐射大气(SRA)中的气溶胶类型,在对流层,气溶胶是由沙尘性、水溶性、海洋性和煤烟性4种基本气溶胶组分组成,根据4种组分百分比含量的不同,定义了大陆型、城市型及海洋型3种基本气溶胶类型^[12]。张军华^[27]在2000年反演北京地区地表反射率的研究中定义了一种类大陆型气溶胶模型。表1给出了各种气溶胶类型中4种气溶胶组分的百分比含量。

表1 4种气溶胶组分在各气溶胶模型中的百分比含量

Table 1 Percents of 4 types of aerosol in different aerosol models

模型	沙尘性	水溶性	海洋性	煤烟性
大陆型	70%	29%	0%	1%
城市型	17%	61%	0%	22%
海洋型	0%	5%	95%	5%
类大陆型	36%	59%	0%	5%

常倬林^[28]采用大陆型和类大陆型气溶胶模型反演了2006年8月—2007年7月间13天的气溶胶光学厚度,并与同期的CE-318反演结果进行了比较,发现在黄土高原半干旱地区最适合采用类大陆型气溶胶模型反演气溶胶光学厚度。因此本文采取类大陆型气溶胶模型,并结合了以下2种气溶胶尺度谱分布模式:

(1) 多峰对数正态谱分布^[29],谱分布函数可表示为

$$\frac{dN}{d\log r} = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\log\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log r - \log r_M}{\log\sigma}\right)^2\right], \quad (3)$$

其中: r_M 和 σ 分别为颗粒物的平均直径和标准差,均是对数正态谱分布参数,即文中使用WMO-WCP112的定义值(表2)。

表2 WMO-WCP112定义的气溶胶类型的微物理特征

Table 2 Microphysical characteristics of different types of aerosol defined by WMO-WCP112

参数	沙尘性	水溶性	海洋性	煤烟性
$r_M/\mu\text{m}$	0.500	0.0050	0.30	0.0118
σ	2.990	2.990	2.51	2.00

(2) 自定义的谱分布:王振海^[30]利用SACOL站2008年春季的气溶胶实测资料,建立了

适合该地区的气溶胶数谱模式,并假定气溶胶的谱型不随高度变化,对实测的气溶胶观测谱用洛伦兹函数进行拟合,得到的对数数谱函数可表示为

$$\frac{dN}{d\log r} = \frac{2N_s}{\pi} \frac{\omega}{4(r-r_m)^2 + \omega^2}, \quad (4)$$

其中: N_s 为2008年春季的平均气溶胶数浓度值; ω 是半宽高,为 $0.3146\mu\text{m}$; r_m 是峰值直径,为 $0.6857\mu\text{m}$,拟合时粒径范围采用APS-3321粒径谱仪的测量范围在 $0.5\sim 20\mu\text{m}$ 之间。研究表明,用该函数拟合的相对误差平均值在 $1\mu\text{m}$ 以内 $<5\%$, $>1\mu\text{m}$ 则 $<20\%$ ^[30]。

5 敏感性试验

卫星所观测到的蓝光通道($0.47\mu\text{m}$)行星反射率对地表反射率和气溶胶光学厚度的变化都较敏感,中红外通道($2.12\mu\text{m}$)行星反射率只对地表反射率的变化敏感而对气溶胶光学厚度不敏感,是运用暗像元方法反演气溶胶光学厚度的前提条件。因此在反演之前,必须进行敏感性试验,以验证模式反演的可行性。

选取2010年4月2日和4日两天进行敏感性试验,两天中SACOL站所对应的Terra过境时刻的几何路径条件分别选取2日的太阳天顶角为 34.53° 、太阳方位角为 150.32° 、卫星天顶角为 8.65° 、卫星方位角为 280.85° ;4日的太阳天顶角为 35.11° 、太阳方位角为 145.15° 、卫星天顶角为 15.59° 、卫星方位角 98.69° 。两天的大气模式选取中纬度夏季大气模式,气溶胶模型自定义为类大陆型并结合前文提到的气溶胶数谱模式,地表为均匀朗伯体地表,气溶胶光学厚度从0.1到0.7(间隔0.1),地表反射率从0.04到0.4(间隔0.04)。

图1为2010年4月2日和4日行星反射率对地表反射率和气溶胶光学厚度的敏感性试验。从图1中可看出,2日和4日两天的3(蓝光)和7(中红外)通道行星反射率对地表反射率都很敏感,行星反射率随地表反射率的增加而增加,呈线性关系。当地表反射率较低时,随着气溶胶光学厚度的增大,蓝光通道的行星反射率是增大的;当地表反射率进一步逐渐增大时,蓝光通道的行星反射率对光学厚度的敏感性逐渐减小,并当地表反射率增大到图中折线的交点处(2日约为0.14,4日约为0.16)时,蓝光通道的行星反射率已不随光学厚度的增加而变化,此处称为蓝光通道行星反射率对光学厚度的不敏感点。当地表反射率再进一步逐渐增大时,

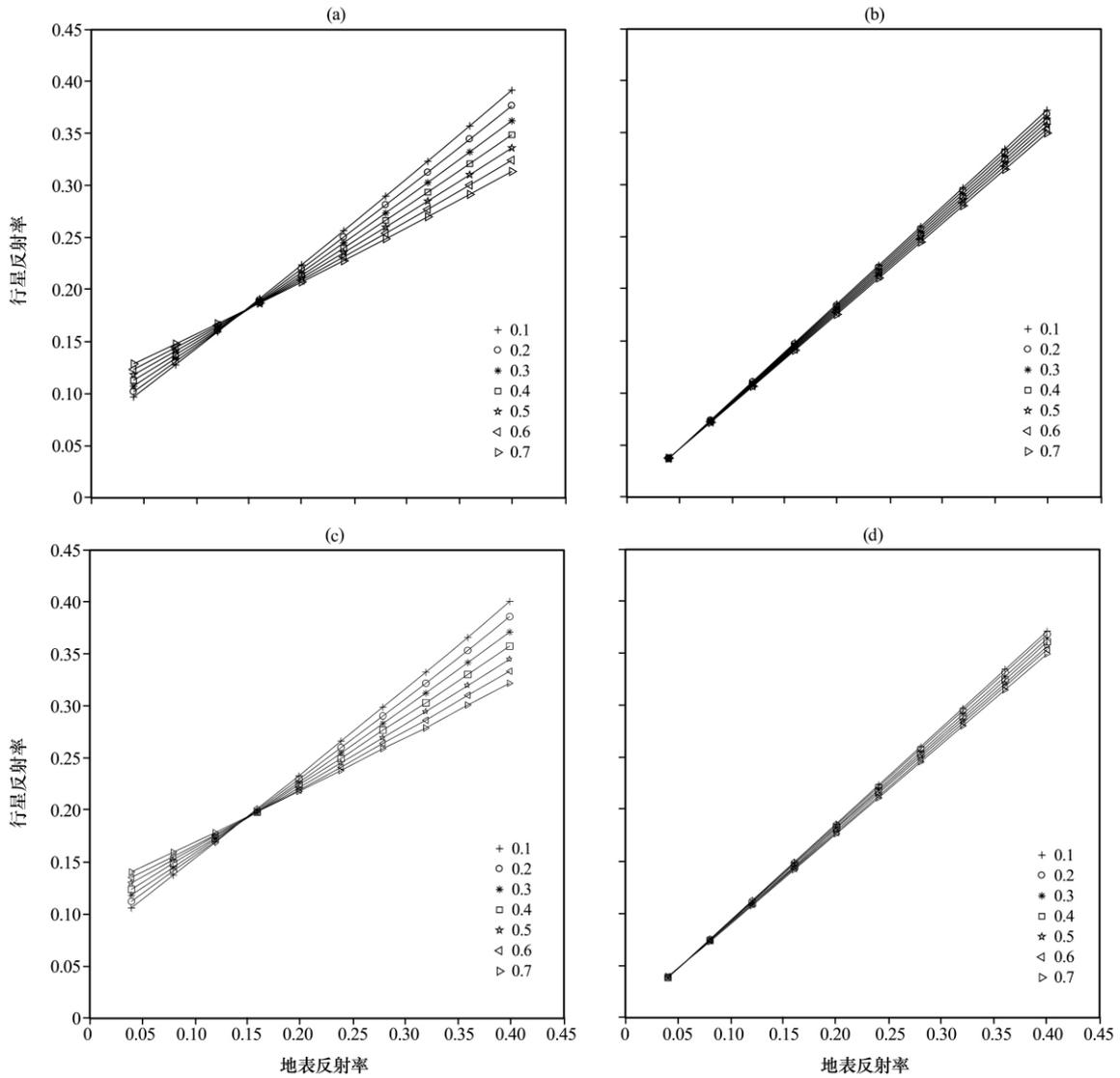


图 1 2010 年 4 月 2 日(上)和 4 日(下)行星反射率对地表反射率和气溶胶光学厚度的敏感性试验
(a)、(c) 3 通道, (b)、(d) 7 通道

Fig. 1 Sensitivity test of planetary albedo to surface reflectance and aerosol optical depth on 2 (top) and 4 (bottom) April 2010. (a), (c) Channel 3, (b), (d) Channel 7

蓝光通道的行星反射率随光学厚度的增大而减小。在反演气溶胶光学厚度时,地表反射率小于不敏感点的位置时才可认为是暗像元,即行星反射率对光学厚度是敏感的。而当地表反射率比较小时,中红外通道的行星反射率几乎不随光学厚度的变化而变化,其行星反射率对光学厚度不敏感。可见以上气溶胶模型的参数选取方案可用于本地区气溶胶光学厚度的反演研究。

6 反演结果

6.1 不同气溶胶类型条件下的反演

图 2~4 为 2010 年 4 月 2 日和 4 日三种不同气

溶胶类型分别对兰州及其周边地区反演 AOD 分布图。对比这两天 3 种不同气溶胶类型的反演结果(图 2~4)可以看出,虽然反演数值存在差异,但气溶胶光学厚度的空间分布表现出一些共同特征:

(1) 兰州市区(103.45°—104.05°E, 35.95°—36.25°N)的气溶胶光学厚度相对周边地区明显较大,并在西固区存在一个较大的高值中心。这主要是西固区是兰州的工业区,环境污染严重,工业废气中含有大量的气溶胶粒子所致。

(2) 兴隆山地区(103.9°—104.1°E, 35.7°—35.9°N)由于植被覆盖度高,周围人口密度也小,空气比较清洁,反演的 AOD 明显较低。

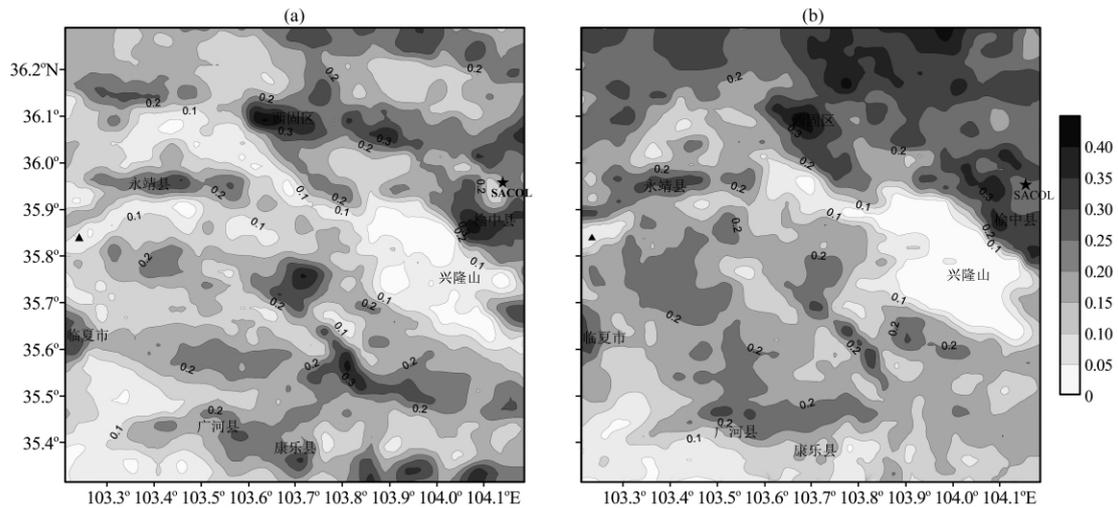


图 2 2010 年 4 月 2 日(a)和 4 日(b)类大陆型气溶胶模型反演的兰州市及其周边地区 AOD 分布
黑三角形为刘家峡水库

Fig. 2 Distributions of AOD in Lanzhou and its surroundings retrieved similar-continental aerosol model on 2 (a) and 4 (b) April 2010. Black triangle is Liujiaxia Reservoir

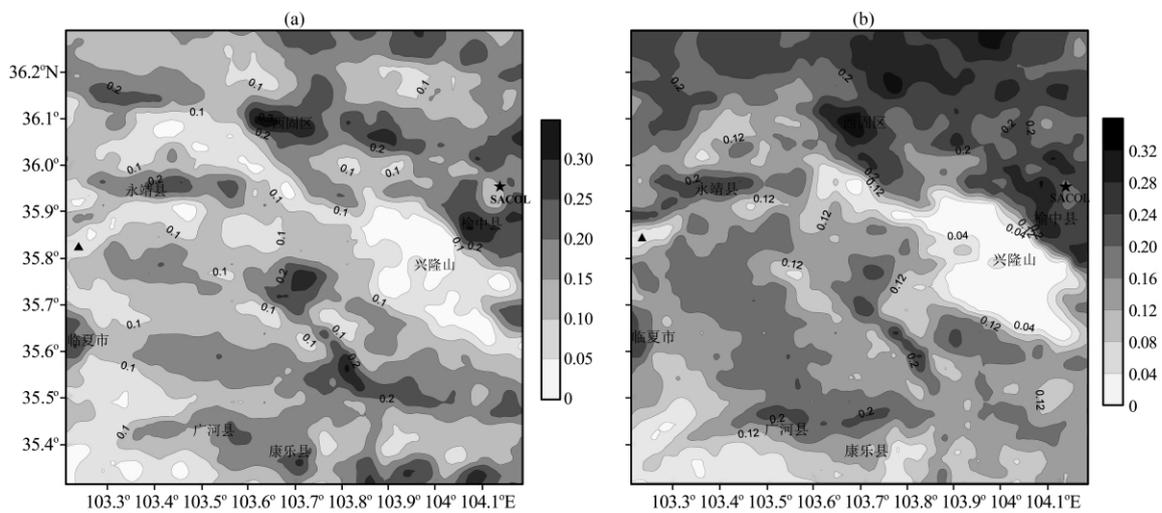


图 3 2010 年 4 月 2 日(a)和 4 日(b)“类大陆+对数正态谱分布”气溶胶模型反演的
兰州市及其周边地区 AOD 分布

其余说明同图 2

Fig. 3 Distributions of AOD in Lanzhou and its surroundings retrieved ‘similar-continental + lognormal’ aerosol model on 2 (a) and 4 (b) April 2010. Others are the same as Fig. 2

(3) 约在 104.1°E , 35.9°N 处有一个气溶胶光学厚度的大值区, 此处属于兰州市榆中县地区, 除县城之外周围还分布一些化肥厂、水泥厂以及榆中县三角城、兰州大学榆中校区等, 人口密度大、污染源多, 导致光学厚度较周围地区大。

(4) 刘家峡水库地区 ($103.2^{\circ}\text{E} - 103.3^{\circ}\text{E}$, $35.8^{\circ}\text{N} - 35.9^{\circ}\text{N}$), 由于其环境状况良好, 空气一般很清洁, 气溶胶含量也很少, 故出现一个低值区。

(5) 在 103.2°E , 35.6°N 和 103.35°E , 35.95°N 处各有一气溶胶光学厚度的大值区, 从地理位置看, 前者是临夏市, 后者是永靖县。另外, 在 $103.5^{\circ}\text{E} - 103.7^{\circ}\text{E}$, $35.4^{\circ}\text{N} - 35.5^{\circ}\text{N}$ 处有 2 个气溶胶光学厚度的大值区, 从地理位置看, 对应的是广河县和康乐县城。这些地方人口密度都相对较大, 污染物排放也相对较大, 比周围地区气溶胶光学厚度大是符合实际情况的。

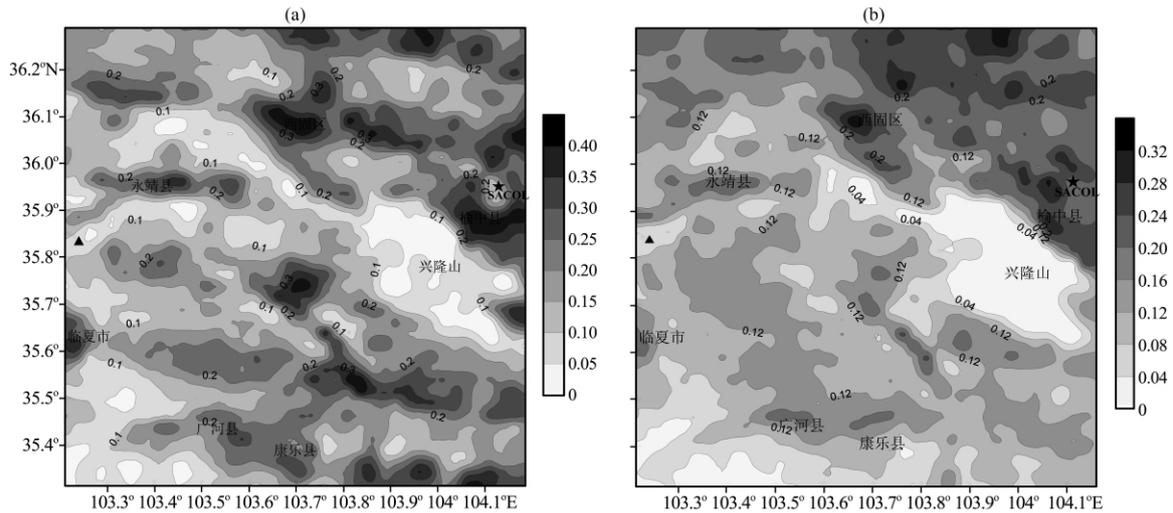


图 4 2010 年 4 月 2 日(a)和 4 日(b)“类大陆+自定义气溶胶数谱模式”的气溶胶模型反演的兰州市及其周边地区 AOD 分布

其余说明同图 2

Fig. 4 Distributions of AOD in Lanzhou and its surroundings retrieved ‘similar-continental+ custom defined number spectrum’ aerosol model on 2 (a) and 4 (b) April 2010. Others are the same as Fig. 2

表 3 2010 年 4 月 2 日和 4 日 SACOL 站 550 nm AOD 反演值(不同气溶胶类型)与观测值(CE-318)比较

Table 3 Comparison of AOD retrieved values at 550 nm in different aerosol types and observation (CE-318) at SACOL site on 2 and 4 April 2010

日期/日	观测值	气溶胶类型	反演值	相对误差/%
2	0.1235	类大陆型	0.1563	26.56
		类大陆+对数正态谱分布	0.1367	10.69
		类大陆+自定义气溶胶数谱模式	0.1313	6.28
4	0.1698	类大陆型	0.2266	33.42
		类大陆+对数正态谱分布	0.1953	15.02
		类大陆+自定义气溶胶数谱模式	0.1875	10.95

6.2 与地面观测结果的比较

选取 2010 年 4 月 2 日和 4 日 SACOL 站 CE-318 太阳光度计的实测 AOD 值与不同气溶胶类型下 AOD 反演值进行对比分析(表 3)。由于地面观测和卫星观测方法的差异,文中地面观测值采用的是卫星过境前后 30 min 的平均值,而卫星反演值选取卫星过境时刻 SACOL 站周围 4 个像元的平均值。从表 3 中可以看出,单独采用类大陆型气溶胶模式,反演精度并不是很高,2 日和 4 日的相对误差分别为 26.56%和 33.42%,但是,在类大陆型气溶胶模型的基础上结合粒子谱分布,反演的精度都有所提升,特别是“类大陆型+自定义气溶胶数谱”模式。

7 结论与讨论

通过上述分析,得到以下结论:

(1) 借助于 6S 模式对通过改变气溶胶数谱来自定义的气溶胶模型进行敏感性试验,结果表明,蓝光、中红外通道的卫星行星反射率对地表反射率都敏感,在地表反射率比较小的情况下蓝光通道的行星反射率对气溶胶光学厚度敏感,而中红外通道则不敏感,证实了自定义的气溶胶模型可用于该地区的光学厚度反演。

(2) 在 3 种不同气溶胶模型下反演 AOD 分布具有共同的特征,即兰州市区的 AOD 与周围地区相比较,并在西固区存在一高值区;刘家峡水库和兴隆山地区由于其特殊的地理环境,空气清

洁, AOD 值较小; 榆中县、永靖县、临夏市、广河县和康乐县等地由于地处县城, 人口密度大, 工业和生活污染源较多, 相对于周围都出现了一个较高值中心。

(3) 对比分析反演结果和观测结果, 发现采用“类大陆型+自定义气溶胶数谱”气溶胶模型比其他模型反演的精度高。

气溶胶类型的选取对反演结果会产生很大的影响, 自定义的气溶胶模型虽然具有很高的反演精度, 但由于在模型的定义和反演时次上具有时间不匹配性, 对反演结果会产生一定影响。同时气溶胶模型是根据 SACOL 站的实测数谱定义的, 缺乏其他一些观测站的数据, 使得结果的代表性有待提高, 亟需在以后的研究中进一步完善。

致谢: 本文的研究利用了兰州大学 SACOL 站和 NASA 提供的数据, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 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, 32(4): 826—840.
- [2] 田磊, 张武, 史晋森, 等. 河西春季沙尘气溶胶粒子散射特性的初步研究[J]. 高原气象, 2010, 29(4): 1050—1057.
- [3] 曹贤杰, 张镭, 李霞, 等. 张掖地区气溶胶吸收和散射特性分析[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1246—1253.
- [4] 宿兴涛, 王汉杰, 宋帅, 等. 近 10 年东亚沙尘气溶胶辐射强迫与温度响应[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1300—1307.
- [5] 岳治国, 刘晓东, 梁谷. 气溶胶对北京地区不同类型云降水影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1356—1367.
- [6] 汪安琪. 大气气溶胶研究新动向[J]. 环境化学, 1999, 18(1): 10—14.
- [7] 周碧, 张镭, 曹贤杰, 等. 利用激光雷达资料分析兰州远郊气溶胶光学特性[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1011—1017.
- [8] 张武. 利用卫星遥感资料反演城市地区大气气溶胶的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2004.
- [9] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 82.
- [10] Rao P K, Holmes S J, Anderson R K, 等编, 许健民译. 气象卫星—系统、资料及其在环境中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 409—411.
- [11] Carlson T N, Wending P. Reflected radiance measured by NO-AA-3 AVHRR as a function of optical depth for Saharan dust[J]. J Appl Meteor, 1977, 16: 1368—1371.
- [12] Remer L A, Tanré D, Kaufman Y J, et al. Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(12): 1—4.
- [13] Tanré D, Herman M, Deschamps P Y, et al. Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectance including bi-directional properties[J]. Appl Opt, 1979, 18(21): 3587—3594.
- [14] 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 23—25.
- [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与地面光度计遥感的对比[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 127—135.
- [16] 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 等. 利用 MODIS 资料反演北京及其周围地区气溶胶光学厚度的方法研究[J]. 气象学报, 2003, 61(5): 580—591.
- [17] 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.
- [18] Kaufman Y J, Tanre D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate-resolution imaging spectroradiometer[J]. J Geophys Res, 1997, 102(D14): 17051—17067.
- [19] 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.
- [20] Huang Jianping, Zhang Wu, Zuo Jinqing, 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.
- [21] Vermote E F, Tanré D, Deuzé J L, et al. Second simulation for the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35(3): 675—686.
- [22] 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.
- [23] 张玉洁, 张武, 陈艳, 等. 黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征的初步分析[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1416—1422.
- [24] Tsay S C, King M D, Herman J R. Aerosol properties over bright-reflecting source regions[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2004, 42(3): 557—569.
- [25] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1 μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35(5): 1286—1298.
- [26] 唐杰. 利用 MODIS 资料反演兰州地区不同季节 AOD 的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 1—90.
- [27] 张军华. 地面和卫星遥感中国地区气溶胶光学特性[D]. 北京: 北京大学, 2000: 1—176.
- [28] 常倬林. 黄土高原半干旱地区气溶胶地基与卫星遥感[D]. 兰州: 兰州大学, 2008: 1—76.
- [29] 冯建东, 黄艇, 陈长和, 等. 利用 MODIS 资料遥感水体上空气溶胶粒子尺度的数值试验[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 886—892.
- [30] 王振海. 半干旱地区气溶胶的观测研究及垂直分布的反演[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 1—53.

Retrieval of Aerosol Optical Depth with a Custom Aerosol Model over Lanzhou and Its Surroundings

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

*(Key Laboratory of Semi-Arid Climate Changes with the Ministry of Education/College of
Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: With a Custom Aerosol Model and class continental aerosol, a number spectral model of aerosol was obtained by the observation at the semi-arid climate and environment observatory of Lanzhou University(SACOL). Aerosol optical depth(AOD) over Lanzhou and its surroundings in a 100 km×100 km range was retrieved. The results show that the distribution of AOD retrieved by different aerosol models have some common features, there are a high value area in Xigu industrial district of Lanzhou and lower values in Xinglong Mountain and Liu Jiaxia Reservoir, while in Yuzhong and Linxia as well as other small towns, it also shows higher values of AOD than that in its surrounding areas. Comparising the retrieved results and ground-based observations show that the retrieval accuracies of AOD have improved significantly with the custom defined aerosol model.

Key words: Aerosol; Aerosol optical depth; 6S; Aerosol model