

# 基于MODIS数据反演江浙皖地区气溶胶光学厚度

任佳<sup>1,2</sup>, 王振会<sup>1,2</sup>, 孙林<sup>3</sup>, 胡方超<sup>1,2</sup>, 高扬<sup>2</sup>

(1.南京信息工程大学,气象灾害省部共建教育部重点实验室;

2.南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044; 3.山东科技大学,山东 青岛 266510)

**摘要:**气溶胶是气候变化和大气污染的重要影响因素。人们发现卫星遥感为大面积获取气溶胶光学厚度提供了手段,同时卫星遥感的气溶胶光学厚度弥补了地面观测空间覆盖不足的缺陷。文章首先介绍了使用暗像元法反演气溶胶光学厚度的算法和计算流程,利用传统的暗像元法和改进的暗像元法(即V5.2算法)反演江浙皖地区(29~33°N;116~120°E)气溶胶光学厚度的空间分布,并对两种算法所得结果进行比较与分析。结果表明:暗像元法基本可以反映出该区域气溶胶光学厚度的空间分布特点,尤其是在浓密植被区卫星反演得到的结果与(AERONET)太阳光度计的观测值基本相近。但是在城市地区,该算法得到的结果与观测值存在一定的偏差,有待于进一步改善。

**关键词:**气溶胶光学厚度; MODIS; 暗像元法; 卫星遥感

**中图分类号:**X87 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1003-6504.2010.08.039 **文章编号:**1003-6504(2010)08-0167-05

## Retrieval of Aerosol Optical Depth over Jiangsu-Zhejiang-Anhui Areas using MODIS Data

REN Jia<sup>1,2</sup>, WANG Zhen-hui<sup>1,2</sup>, SUN Lin<sup>3</sup>, HU Fang-chao<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3.Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** Method and calculation process of dense dark vegetation method which is used to retrieve aerosol optical depth was introduced. MODIS data by traditional DDV algorithm and improved DDV algorithm was dealt with for retrieval of spatial distribution of AOD over Jiangsu-Zhejiang-Anhui areas. The inverse method was validated with AERONET solar direct radiance measurement. Results showed that the AOD obtained by both methods in the dense vegetation region were basically in consistent with the results from AERONET. However there was a certain bias between the results obtained by both methods and observations from AERONET in urban areas, which need to be further improved.

**Key words:** aerosol optical depth; MODIS; dense dark vegetation method; satellite remote sensing

大量液体或固态微粒在大气中的悬浮胶性体系称为大气气溶胶,悬浮的微粒称为气溶胶质粒,简称气溶胶。气溶胶在地球大气辐射收支平衡和全球气候变化中扮演着十分重要的角色<sup>[1-3]</sup>。一方面,大气气溶胶可以通过吸收和散射太阳辐射直接扰动地气系统的辐射平衡,产生所谓的直接气候效应,另一方面,气溶胶粒子又可作为云的凝结核和冻结核,促使云雾的形成,使单位体积的云粒子数量增加、云滴半径减小,增加云的短波反射率,同时增加云的生命时间,这种变化不但影响地气系统的短波辐射,而且对长波辐射也会产生影响,产生所谓的间接效应。这些方面对于局地、区域乃至全球气候有重要影响。

随着环境污染问题的发展,人们已经认识到大气气溶胶的污染特性与其物理化学性质,以及在大气中的非均向化学反应造成的一系列环境问题;如臭氧层的破坏、酸雨的形成、烟雾事件的发生等。因此监测城市大气环境质量,减少污染源的影响,加强对大气质量和环境的监测分析愈来愈受到政府和人们的关注。目前研究对流层气溶胶的手段主要有:陆基观测、数值模拟、遥感反演等。卫星遥感弥补了一般地面观测在较大范围内反映污染物空间具体分布和变化趋向的不足,是监测区域气溶胶分布的有效手段。

本文首先简单介绍大气气溶胶光学厚度遥感反演算法和主要计算流程,利用传统的暗像元算法<sup>[4]</sup>(下

收稿日期:2009-10-16;修回 2010-01-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助(2006CB403705)

作者简介:任佳(1985-),女,在读硕士研究生,研究方向为大气气溶胶遥感,(手机)15950595165(电子信箱)renjia1914@126.com。

文简称为暗像元法)和改进的暗像元法<sup>[5]</sup>(称为 V5.2 算法)反演江浙皖地区(29~33°N;116~120°E)气溶胶光学厚度分布,并对两种算法所得结果进行比较与分析,验证该算法在江浙皖地区反演气溶胶光学厚度的可用性。

### 1 气溶胶光学厚度遥感反演算法

卫星遥感反演气溶胶光学厚度基本原理见式(1):

$$\rho^*(\mu, \phi, \mu_0, \phi_0) = \rho_a(\mu, \phi, \mu_0, \phi_0) + \frac{T(\mu_0)T(\mu)\rho}{1 - \rho_s} \quad (1)$$

其中  $\rho^*$  是表观反射率(即卫星观测到的反射率),  $\rho_a$  为整层大气反射率(路径辐射),  $\mu_0, \phi_0, \mu, \phi$  分别为太阳天顶角的余弦、方位角和观测天顶角的余弦、方位角,  $T(\mu_0)$  和  $T(\mu)$  分别表示从太阳到地面、从地面到卫星大气层总的透过率(直射+漫射),  $S$  为大气的球面反照率, 系数  $1/(1-\rho_s)$  代表地面和大气层多次散射的作用, 因此卫星观测到的反射率  $\rho^*$  既是气溶胶光学厚度的函数, 又是下垫面反射率的函数。如果知道了下垫面的反射率  $\rho$ , 并假定一定大气气溶胶模型, 根据公式(1)即可反演得到气溶胶光学厚度。

### 2 暗像元法地表反射率估算

传统的暗像元法最先是由 Kaufman 等<sup>[9]</sup>提出的, 并使用长波长通道算法来处理中分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星图像。Kaufman 等通过大量飞机试验研究发现, 在非常清洁的大气条件下, 绿色植被表面的反射率在红、蓝和 2.1 $\mu\text{m}$  通道有相似的图像, 表明它们之间存在着一定的关系。由于可见光通道的图像仅受气溶胶散射的影响, 而 2.1 $\mu\text{m}$  通道的图像不受气溶胶的影响, 反映的是地面的特征。气溶胶层下方的植被覆盖区的地表的红(0.66 $\mu\text{m}$ )、蓝(0.47 $\mu\text{m}$ )通道的反射率可以从 2.1 $\mu\text{m}$  通道的反射率估算出来, 即:

$$\rho_{0.47} = \rho_{2.1}^* / 4, \rho_{0.66} = \rho_{2.1}^* / 2 \quad (2)$$

Robertc.Levy 等<sup>[6]</sup>改良了 MODIS 气溶胶反演算法中确定地表反射率的方法, 该算法(称为 V5.2 算法)考虑了植被指数和散射角对地表反射率的影响。利用卫星观测的可见光和近红外通道的反射率比值(VIS/SWIR)对表面反射率进行参数化, 使其成为植被指数和散射角的函数。所定义的新的比值关系是  $NDVI_{SWIR}$  和散射角  $\Theta$  的函数, 与 Kaufman 等提出的关系式存在一定差异, 具体的表达式见下式:

$$\rho_{0.66}^s = f(\rho_{2.12}^s) = \rho_{2.12}^s \times slope_{0.66/2.12} + yint_{0.66/2.12} \quad (3)$$

$$\rho_{0.47}^s = g(\rho_{0.66}^s) = \rho_{0.66}^s \times slope_{0.47/0.66} + yint_{0.47/0.66} \quad (4)$$

$$slope_{0.66/2.12} = slope_{0.66/2.12}^{NDVI_{SWIR}} + 0.002\Theta - 0.27 \quad (5)$$

$$yint_{0.66/2.12} = 0.00025\Theta + 0.033 \quad (6)$$

其中:  $slope_{0.47/0.66} = 0.49, yint_{0.47/0.66} = 0.005,$

$$\Theta = \cos^{-1}(-\cos\theta_0\cos\theta + \sin\theta_0\sin\theta\cos\phi)$$

$$NDVI_{SWIR} = (\rho_{1.24}^m - \rho_{2.12}^m) / (\rho_{1.24}^m + \rho_{2.12}^m)$$

$$slope_{0.66/2.12}^{NDVI_{SWIR}} =$$

$$\begin{cases} 0.48 & NDVI_{SWIR} < 0.25 \\ 0.58 & NDVI_{SWIR} > 0.75 \end{cases}$$

$$0.48 + 0.2 \times (NDVI_{SWIR} - 0.25) \quad 0.25 \leq NDVI_{SWIR} \leq 0.75$$

上述的公式中  $\theta_0, \theta$  和  $\phi$  分别是太阳天顶角、卫星天顶角和相对方位角。

### 3 反演主要流程

气溶胶的反演主要包括卫星影像资料的获取、查找表的建立和反演得到气溶胶光学厚度三部分组成。实际反演过程中, 是由辐射传输模式来求解大气中的辐射过程。通常首先确定大气参数, 然后根据不同的太阳入射角和卫星观测角, 取不同的大气气溶胶光学厚度, 由辐射传输模式, 如 6S、MODTRAN 等计算得到不同条件下卫星接收到的辐射或卫星反射率, 制作一个查算表(Look Up Table)。在反演过程中, 假定特定的大气条件, 根据辐射的入射和接收角度以及卫星测得的辐射或反射率, 由查算表查出对应的气溶胶光学厚度。下面对整个反演过程做几点说明:

(1)资料的提取: 首先, 对 MODIS L1B 数据进行几何纠正和云检测(这里就不做详细说明了), 然后从经过纠正后的 L1B 图像中提取用于反演气溶胶光学厚度的 1 波段(0.66 $\mu\text{m}$ )、5 波段(1.24 $\mu\text{m}$ )和 7 波段(2.1 $\mu\text{m}$ )的表观反射率和相应区域的几何路径参数信息。

(2)查找表建立: 本试验查找表的建立采用 6S 模式完成辐射传输计算。针对 MODIS 红光波段建立适用于暗像元和 V5.2 算法的卫星表观反射率查找表; 查找表分别假定气溶胶的模型为大陆型气溶胶和海洋型气溶胶, 用于反演不同类型气溶胶的光学厚度; 由于试验所选时间为 2008 年 4~5 月, 区域为(29~33°N;116~120°E), 故选择 6S 模式提供的中纬度夏季大气廓线(给定大气温、压、湿廓线, 臭氧、水汽含量), 用于描述大气气体吸收和分子散射作用。气溶胶光学厚度取 0.1~2.0 之间的值, 以 0.1 为步长; 地表反射率取 0.01~0.1, 以 0.01 为步长; 卫星、太阳的天顶角分别取 0°~75°, 以 5°为步长; 卫星和太阳之间的方位角差取 0°~180°, 以 10°为步长。根据各个参数的具体设置, 通过大气辐射传输模型, 建立起所需要的查找表。其它值则在它们之间进行线性内插。

(3)确定“暗像元”的方法: 本文采用基于 2.1 $\mu\text{m}$  通道辐射值的方法来确定浓密植被。2.1 $\mu\text{m}$  通道是一

个大气窗口,这个通道的波长足够短以至于不会受到 300K 的地表发射辐射的影响。同是  $2.1\mu\text{m}$  通道对于除尘土以外的其它气溶胶粒子透明。而且只要知道水汽柱的含量就能对水汽进行比较精确的校正。所以,这一通道可以用于浓密植被等黑物体的探测。

(4)地表反照率估算:利用传统的暗像元法进行反演时,根据公式(2)估算出红( $0.66\mu\text{m}$ )、蓝( $0.47\mu\text{m}$ )通道的地表反射率;利用改进的暗像元法(即 V5.2 算法)进行反演时,根据公式(3)~(6)估算出红( $0.66\mu\text{m}$ )、蓝( $0.47\mu\text{m}$ )通道的地表反射率。

#### 4 反演试验个例分析

本试验中选用 EOS-TERRA/MODIS 资料 L1B 产品用于气溶胶光学厚度的反演。选取了 2008 年 4~5 月期间的 7 天作为试验日,区域范围为 ( $29^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}; 116^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )。在选取研究区域与时次时主要以晴空的图像为主,从而可以减少云检测误差对反演结果的影响。

该区域包括安徽省、江苏省、浙江省以及江西省的部分区域在内,如图 1。实验区域主要属于安徽省(I 区),从安徽省地理位置来看,地形地貌复杂多样,平原、丘陵、山地相间排列,其中以山地、丘陵为主。全省地势西南高,东北低。北绵淮北平原,东迤江淮丘陵,西卧大别山脉,南迭皖南群峰。试验区域中 II 区主要属于浙江省的杭嘉湖平原,是浙江最大的堆积平原。该地区的经济发展迅速,尤其像杭州、嘉兴等地区城市发展迅速,人口密度高,但是靠近安徽省的部分又有优美的自然风光,如千岛湖景区、安吉等地区。

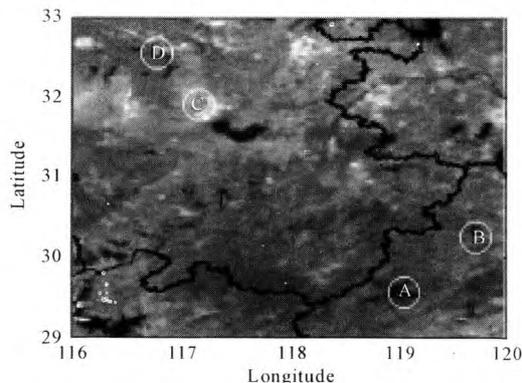


图1 MODIS第7波段反射率图(经几何纠正)  
Fig.1 Surface reflectance image from MODIS band 7 data (After geometric correction)

图 1 中白色圆圈所选区域的中心点为太阳光度计的站点,该站点资料可以从 AERONET 网站获取。其中 A 点为千岛湖站 ( $29.556^{\circ}\text{N}, 119.053^{\circ}\text{E}$ )、B 点为杭州站 ( $30.257^{\circ}\text{N}, 119.727^{\circ}\text{E}$ ),这两个站点就属于浙江省的杭嘉湖平原地区;C 点为合肥站 ( $31.905^{\circ}\text{N}, 117.162^{\circ}\text{E}$ )、D 点为寿县站 ( $32.558^{\circ}\text{N}, 116.782^{\circ}\text{E}$ ),这

两个站点处于安徽省内。

#### 4.1 反演结果分析

根据本文中提到的反演流程,通过卫星资料的提取,查找表的建立,以及通过查找表获得气溶胶光学厚度,最后将获得的气溶胶光学厚度进行插值得到试验区域( $29^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )的气溶胶光学厚度空间分布图。

图 2(a)是由传统的暗像元法反演得到的气溶胶空间分布图,图 2(b)是由改进的暗像元法(即 V5.2 算法)反演得到的气溶胶空间分布图。从(a)、(b)两图中,可以发现有两个气溶胶小值区,一个区域位于皖西大别山区,其气溶胶光学厚度的值小于 0.3;另一区域位于安徽、浙江和江西三省交界处,主要位于皖南山区,给山区主要以黄山、九华山为主,其气溶胶光学厚度分别为 0.4(暗像元法)和 0.3(V5.2 算法)左右。这两个小值区都位于山区,人类活动很少,而且四周分布着浓密的常绿植物,如常绿植物、落叶林、混合灌木及农田等,这些地区的空气比较清洁,污染物相对较少,因而气溶胶的光学厚度普遍较低。在江西省的鄱阳湖地区出现了气溶胶的较大值,这一结果与刘桂青<sup>[6]</sup>、段婧<sup>[7]</sup>等分析的结果相似;另一气溶胶光学厚度(约为 1.2 左右)较大值区位于 ( $31.8^{\circ}\sim 32.2^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\sim 116.4^{\circ}\text{E}$ ),处于安徽省霍丘县境内。这是因为霍丘县境内有近 20 种具有理想开采价值的地下矿藏,其中磁铁矿储量居全国第 6 位,被列为国家大型矿石基地。但是,随着采矿活动和大量选矿尾矿的产生,大气中的粉尘含量大量增加<sup>[8]</sup>。根据前文中描述的试验区域地理环境特点,分析图 2 中气溶胶光学厚度空间分布的特点,我们可以发现:气溶胶光学厚度的分布受到地理环境、人口密度以及工业分布的影响。

#### 4.2 光学厚度的频率分布比较

为了更清楚地了解两种方法反演的不同效果,下面给出了 2008 年 4 月 18 日部分地区利用传统的暗像元方法及 V5.2 算法反演出的光学厚度频率分布图。其中所选区域为:图 1 中白色方框标注的 AERONET 网站提供太阳光度计资料的站点,以该站点位置为中心,选取  $0.6^{\circ}\times 0.6^{\circ}$  的区域范围。

从图 3 可以看到,在千岛湖、杭州地区传统的暗像元法反演结果出现最高频率所对应的光学厚度都为 0.7;而 V5.2 算法的反演结果则为 0.6。合肥地区传统的暗像元法反演结果出现最高频率所对应的光学厚度为 0.9;而 V5.2 算法的反演结果则为 0.8。在寿县地区传统的暗像元法反演结果出现最高频率所对应的光学厚度为 0.9;而 V5.2 算法的反演结果则为 0.7。

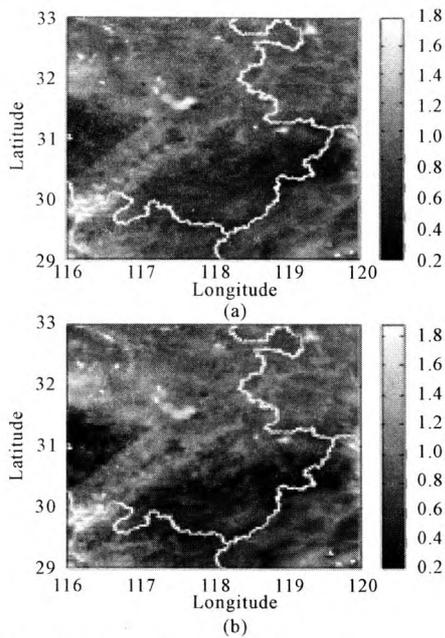


图2 2008年4月18日气溶胶光学厚度空间分布图  
Fig.2 The spatial distribution of AOD over experiment areas in April 18, 2008

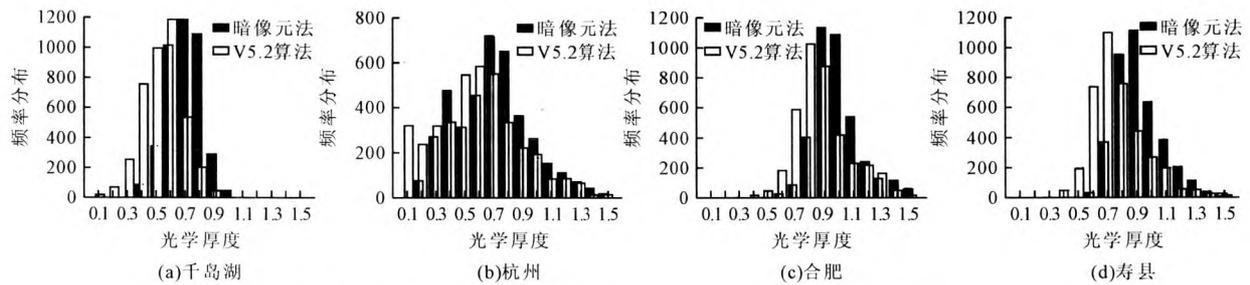


图3 2008年4月18日两种方法反演光学厚度的频率分布比较  
Fig.3 Comparison of frequency distribution of AOD obtained by both methods in April 18, 2008

表 1 两种 MODIS 的反演算法的反演结果与太阳光度计观测值的比较

Table 1 Comparison between inversion value obtained by both methods from MODIS and the observation from AERONET

地区	日期	观测值 (AOT)	反演值(V5.2 算法 AOT')	绝对误差 AOT-AOT'	相对误差 $\frac{AOT-AOT'}{AOT} \times 100\%$	反演值(暗像元法 AOT'')	绝对误差 AOT-AOT''	相对误差 $\frac{AOT-AOT''}{AOT} \times 100\%$
千岛湖	2008/04/18	0.50054	0.4871	0.013439	2.685(%)	0.646	-0.14546	-29.061(%)
	2008/04/24	0.31866	0.2095	0.10916	34.257(%)	0.3367	-0.018037	-5.6602(%)
	2008/04/26	0.37135	0.3445	0.026848	7.2298(%)	0.5437	-0.17235	-46.413(%)
	2008/05/07	0.2379	0.1784	0.059501	25.011(%)	0.3639	-0.126	-52.963(%)
	2008/05/10	0.45708	0.5562	-0.099117	-21.685(%)	0.7398	-0.28272	-61.853(%)
	2008/05/17	0.52758	0.5883	-0.06072	-11.509(%)	0.8528	-0.32522	-61.644(%)
	2008/05/19	0.41647	0.5735	-0.15703	-37.704(%)	0.7715	-0.35503	-85.246(%)
杭州	2008/04/18	0.5874	0.54	0.047397	8.069(%)	0.659	-0.071603	-12.19(%)
	2008/05/07	0.43857	0.4002	0.038373	8.7494(%)	0.5369	-0.098327	-22.42(%)
	2008/05/10	0.55889	0.8271	-0.26821	-47.989(%)	0.9903	-0.43141	-77.19(%)
	2008/05/15	0.80524	1.1377	-0.33246	-41.287(%)	1.2757	-0.47046	-58.425(%)
	2008/05/17	0.70654	1.1666	-0.46006	-65.114(%)	1.3285	-0.62196	-88.029(%)
	2008/05/19	0.46303	0.5403	-0.077273	-16.689(%)	0.6194	-0.15637	-33.772(%)
合肥	2008/04/18	0.75409	0.8403	-0.086214	-11.433(%)	0.9471	-0.19301	-25.596(%)
	2008/04/24	0.35347	0.8395	-0.48603	-137.5(%)	0.9503	-0.59683	-168.83(%)
	2008/04/26	0.47992	0.9609	-0.48098	-100.22(%)	1.01	-0.53008	-110.45(%)
寿县	2008/05/10	0.62844	0.4529	0.17554	27.932(%)	0.6995	-0.071063	-11.308(%)
	2008/05/15	0.49061	1.0884	-0.59779	-121.84(%)	1.2684	-0.77779	-158.53(%)
	2008/05/17	0.60883	1.3139	-0.70507	-115.81(%)	1.4432	-0.83437	-137.04(%)

Robert C. Levy<sup>[6]</sup>等提到,与以前的反演方法相比,利用 V5.2 算法后得到的全球气溶胶光学厚度从 0.28 下降到 0.21。通过对两种方法反演得到的气溶胶光学厚度频率分布比较,发现在我们的实验区域 V5.2 算法得到气溶胶光学厚度要比暗像元法得到的气溶胶光学厚度小。

### 4.3 利用 MODIS 资料反演的结果与地面光度计观测结果的对比及误差分析

为了验证反演结果,在实验研究区域选取了四个大阳光度计的站点提供的地面观测资料。这四个大阳光度计的站点位置如图 1 中所示,分别为千岛湖、杭州、合肥和寿县四个站点。通过对两种反演算法与太阳光度计资料的比较,并结合实际情况进行误差分析,由于在我们所选的卫星反演日中不一定有各地面站点的观测资料,所以,根据卫星反演选取的时间筛选出地面四个站点的观测资料,具体数据见表 1。表 1 中列出了光度计的观测值和两种算法的反演值,以及观测值与反演值之间的绝对误差和相对误差。

从表 1 看出,两种反演方法得到的结果与观测存在一定偏差。将 V5.2 算法与地面观测值比较时,在千岛湖、杭州和合肥地区反演与观测比较接近的是 2008 年 4 月 18 日,其相对误差都小于 20%,如图 4 所示。从图 4、图 5 中我们可以看到,在千岛湖地区 7 天内有 5 天的绝对误差小于 0.1,而且 7 天的相对误差都较小,其中有 3 天的相对误差小于 20%;在杭州地区 6 天内有 3 天的绝对误差小于 0.1;然而在合肥和寿县地区,绝对误差和相对误差都较大。将传统的暗像元法与地面观测值比较时,发现这些天四个地区的相对误差和绝对误差都有变大(除个别天例外)。根据 Kaufman 等<sup>[4]</sup>的理论计算,当光学厚度比较小的情况,反演的绝对误差预计为: $\Delta\tau = \pm 0.05 \sim \pm 0.1$ 。从表 1 中也可以发现千岛湖这些植被浓密地区,其两种反演算法得到的反演值都比较接近于观测值,尤其是 V5.2 算法得到的结果更接近于观测值;而像合肥等工业城市地区,利用这两种方法反演的结果与观测值相差较大。由于千岛湖地处山区,人类活动很少,测站上空气溶胶类型单一少变,而且测站周围的广大区域分布着浓密的常绿植物,满足 NASA 的暗像元 AOD 反演的条件。

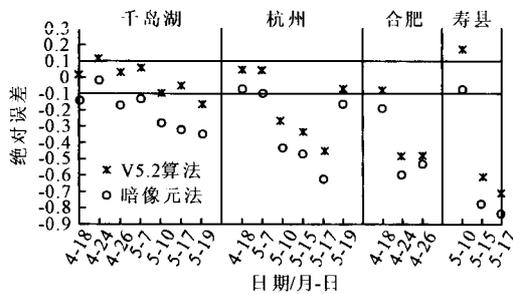


图4 观测值与两种反演结果之间的绝对误差  
Fig.4 The absolute error between the inversion and observation

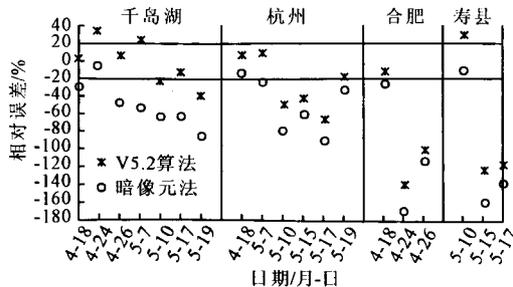


图5 观测值与两种反演结果之间的相对误差  
Fig.5 The relative error between the inversion and observation

### 5 结论

通过利用暗像元和 V5.2 算法反演得到的实验区域(29~33°N;116~120°E)的大气气溶胶光学厚度,可以发现两者反演得到 2008 年 4 月 18 日光学厚度空间分布的大致趋势存在一致性。并且根据气溶胶光学厚度空间分布的特点可以发现:在反演区域气溶胶光

学厚度的分布受到地理环境、人口密度以及工业分布的影响。在反演区域内存在两个小值区,分别是皖西大别山区和皖赣浙三省交界处,这两个地区处于山地,有浓密的植被,因而气溶胶的光学厚度比较低;另有两个大值区,分别为江西省内的鄱阳湖平原地区和安徽省霍丘县地区,霍邱县的磁铁矿贮量居全国第 6 位,被列为国家大型矿石基地。由于矿石的开采,导致了空气中粉尘的增多。

利用暗像元方法和 V5.2 算法,借助 6S 模式,反演研究区域内地面太阳光度计站点所在区域的气溶胶光学厚度,并与相应的地面光度计观测计算结果对比发现:在浓密植被地区,利用 V5.2 算法得到的结果更接近于观测值;但是在城市地区,这两种算法得到的结果与观测值存在一定的偏差,有待于进一步的改善。下面将分析讨论四个测点所反演的结果与地面光度计观测资料的计算结果出现偏差的原因,并分析误差来源。

(1) 卫星遥感观测要求有相关地面仪器的观测进行订正,但是由于二者的观测原理,计算方法等存在差异,使结果必然伴随一定的误差。

(2) 地面多波段太阳光度计观测分析过程中产生的误差。

(3) 利用 6S 辐射传输模式进行模拟计算时,参数的选择,尤其是气溶胶类型的不确定,会给结果带来很大的误差。

(4) 在确定地表反射率时也存在着偏差,由于地表的多样性复杂性,使得在确定地表反射率时存在了很大的困难。暗像元法中使用了 2.1 $\mu\text{m}$  波段反射率与可见光红(0.66 $\mu\text{m}$ )、蓝(0.47 $\mu\text{m}$ )通道地表反射率之间的线性关系来确定。但这种经验关系在某些地区不成立时,反演的光学厚度就会引起一定的误差。新的 V5.2 算法中,这个统计关系中考虑了植被指数和散射角,但是这个关系是否适用于江浙皖地区,还需进一步的验证。

### 【参考文献】

[1] 尹宏,韩志刚.气溶胶大气对太阳辐射的吸收[J]. 气象学报, 1989,47(1):118-123.  
Yin Hong, Han Zhi-gang. Absorption of solar radiation by aerosol atmosphere[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1989,47 (1):118-123.(in Chinese)  
[2] Schwarta S E, Coauthors. Group report:Connection between Aerosol and Properties and Forcing of Climate[A]. Charlson R J, J Heintzenberg. Aerosol Forcing of Climate[C]. 1995: 251-280.

(下转第 195 页)

- metals in West Harbour, Xiamen[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(1):124–130. (in Chinese)
- [5] 庄树宏, 陈礼学, 王尊清. 长山列岛南部三岛岩相潮间带群落多样性格局[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5):747–752. Zhuang Shu-hong, Chen Li-xue, Wang Zun-qing. Diversity patterns in intertidal communities of three southern islands of Changshan archipelago[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5):747–752. (in Chinese)
- [6] 王国立. 长岛地区海水中溶解氧(DO)分布与温度等因素的关系[J]. *山东食品发酵*, 2001, 3:22–24. Wang Guo-li. Relations between temperature and distribution of dissolved oxygen in seawater of Changdao area[J]. *Shandong Food Ferment*, 2001, (3):22–24. (in Chinese)
- [7] GB 17378.5–2007, 海洋监测规范[S]. GB 17378.5–2007, The Specification for Marine Monitoring[S]. (in Chinese)
- [8] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975–1001.
- [9] 夏鹏, 孟宪伟, 印萍, 等. 广西北海潮间带沉积物中重金属的污染状况及其潜在生态危害[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(4):471–477. Xia Peng, Meng Xian-wei, Yin Ping, et al. Heavy metal pollution and its potential ecological risk in the sediments from the Beihai intertidal zone of Guangxi Province[J]. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(4):471–477. (in Chinese)
- [10] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2):9–15. Qi Jun, Li Feng-ye, Song Jin-ming, et al. Sedimentation rate and flux of the north Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2):9–15. (in Chinese)
- [11] 刘宪斌, 姜中鹏, 张光玉, 等. 天津塘沽潮间带沉积物中重金属的潜在生态危害评价[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2):731–735. Liu Xian-bin, Jiang Zhong-peng, Zhang Guang-yu, et al. Potential ecological risk evaluation of heavy metals in the intertidal zone sediments of Tanggu, Tianjin[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(2):731–735. (in Chinese)
- [12] 秦延文, 苏一兵, 郑丙辉, 等. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价[J]. *海洋科学*, 2007, 31(12):28–33. Qin Yan-wen, Su Yi-bing, Zheng Bing-hui, et al. Heavy metals and pollution assessment in surface sediments of Bohai Bay[J]. *Marine Science*, 2007, 31(12):28–33. (in Chinese)
- [13] 海热提, 谢涛, 齐凤霞. 天津海域底质重金属分布与矿物质特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29(6):6–8. Hai Re-ti, Xie Tao, Qi Feng-xia. Characteristics of distribution of heavy metals and mineral matter in sediments of Bohai Bay in Tianjin's sea[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(6):6–8, 42. (in Chinese)
- [14] 黄家祥, 殷勇, 徐军, 等. 苏北灌河口潮间带表层沉积物重金属空间分布特征及其环境效应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(5):23–32. Huang Jia-xiang, Yin Yong, Xu Jun, et al. Spatial accumulation features and environment efficiency of heavy metals in intertidal surface sediments of Guanhe estuary, Northern Jiangsu[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(5):23–32. (in Chinese)
- [15] GB 18668–2002, 海洋沉积物质量[S]. GB 18668–2002, Marine Sediment Quality[S]. (in Chinese)

(上接第 171 页)

- [3] Hansen J, M Sato, R Ruedy. Radiative forcing and climate response[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D6):6831.
- [4] Kaufman Y J, Andrew E Wald, Lorraine A Remer, et al. The MODIS 2.1 $\mu$ m channel—correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. *IEEE Trans Geos Remote Sensing*, 1997, 35(5):1286–1298.
- [5] Levy Robert C, Lorraine A Remer. A new algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance[J]. submitted by publication, *J Geophys Res*, 2006, 7.
- [6] 刘桂青, 毛节泰, 李成才. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究[J]. *上海环境科学*, 2003, (S2):58–63. Liu Gui-qing, Mao Jie-tai, Li Cheng-cai. Optical depth study on atmospheric aerosol in Yangtze River Delta region, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2003, (S2):58–63. (in Chinese)
- [7] 段婧, 毛节泰. 长江三角洲大气气溶胶光学厚度分布和变化趋势研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(4):537–543. Duan Jing, Mao Jie-tai. Study on the distribution and variation trends of atmospheric aerosol optical depth over Yangtze River delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4):537–543. (in Chinese)
- [8] 李良军, 常丹燕, 杜建国. 安徽霍邱铁矿资源合理开发与环境保护[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2005, 46(2):85–89. Li Liang-jun, Chang Dan-yan, Du Jian-guo. Reasonable development and environment protection of Huoqiu Iron Ore in Anhui Province[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science)*, 2005, 46(2):85–89. (in Chinese)