

基于MODIS数据的杭州地区气溶胶光学厚度反演

范 娇 郭宝峰 何宏昌

杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310018

摘要 气溶胶类型在反演光学厚度时非常重要,采用待反演地区最合理的气溶胶类型可以极大地提高反演精度。结合中分辨率成像光谱仪(MODIS)的数据,提出一种确定气溶胶各组分体积百分比的数学模型,利用这种数学模型得到自定义的杭州地区气溶胶类型,结合改进的暗像元法并基于6S大气辐射传输模式可以反演得到气溶胶光学厚度。将反演结果与AERONET太阳光度计的气溶胶观测值进行对比,结果显示反演的相对误差绝对值在20%以内。采用6S大气辐射传输模式给出的标准气溶胶类型对杭州地区大气进行光学厚度反演,将反演结果和采用自定义气溶胶类型时的反演结果分别与太阳光度计的观测值进行对比,结果表明采用自定义的气溶胶类型时反演值的相对误差绝对值比采用标准气溶胶类型时反演值的相对误差绝对值要低3%以上。

关键词 大气光学;气溶胶;光学厚度;暗像元法;太阳光度计

中图分类号 P421 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0101001

Retrieval of Aerosol Optical Thickness with MODIS Data over Hangzhou

Fan Jiao Guo Baofeng He Hongchang

College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract Because the aerosol type is very important in the inversion of optical thickness, it can greatly improve the inversion precision by using the most accurate aerosol type of the inversion area. Combined with the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data, a mathematic model for solving the aerosol concentration ratio in Hangzhou area is proposed. By using the aerosol types of this mathematical model, the aerosol optical thickness can be obtained based on the 6S atmospheric model combined with the improved dense dark vegetation. The aerosol observation results are compared with aerosol values detected by AERONET sun photometer, which show that the inversion error absolute value is within 20%. The Hangzhou area atmospheric aerosol optical standard type 6S atmospheric model is given and the thicknesses of the inversion are compared with the inversion values using custom aerosol. The results show that the absolute value of retrieval relative errors of optical thicknesses by using aerosol types of custom value is 3% lower than that by using standard aerosol type value.

Key words atmospheric optics; aerosol; optical thickness; dense dark vegetation algorithm; sun photometer

OCIS codes 010.1100; 010.1110; 010.1290; 010.0280

1 引 言

近年来,杭州地区由于城市交通污染、市政建设、周边地区工业气体排放和自然界生态环境的严重破坏等人为因素影响,城市空气质量受到很大影响,空气污染严重。为减少污染源的影响,对城市大气环境质量的监测变得尤为重要,气溶胶粒子因为其在大气监测中的重要作用受到广泛的关注和研究^[1]。

悬浮在气体团中的固体颗粒和液体微粒与气体载体共同组成的多相体系被称为气溶胶,气溶胶的动力

收稿日期: 2014-07-11; 收到修改稿日期: 2014-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61375011)、浙江省自然科学基金(LY13F030015)

作者简介: 范 娇(1988—),女,硕士研究生,主要从事大气雾霾监测、大气遥感等方面的研究。

E-mail: fanjiao0621@163.com

导师简介: 郭宝峰(1973—),男,博士,研究员,主要从事模式识别、图像处理与信息融合等方面的研究。

E-mail: gbf@hdu.edu.cn

学直径为 $0.001\sim 10\ \mu\text{m}$ 。因为空气本身也含有各种悬浮的固液体微粒,并且其同样具有独特的物理化学性质,因此在进行研究时完全可以把空气也看成是一种气溶胶。大气气溶胶的组成物质形态各不相同,每种物质的含量虽然很少,但是通过吸收和散射太阳辐射后能破坏地-气系统的辐射收支平衡,影响着大气中发生的许多物理化学过程,是模拟气候变化和遥感环境状态的重要因子^[2-4]。

对于气溶胶而言,光学厚度是其最重要的参数之一,作为表征大气混浊度的重要物理量,它是确定气溶胶气候效应的一个关键因子。依据目前的学术研究,有两种获取气溶胶光学厚度的方法,分别是地基探测方法和卫星遥感方法^[5]。前者主要使用太阳光度计进行探测,国内外各相关机构在全球布设了大量的地基观测站以了解气溶胶的分布及变化规律。

虽然地基探测可以比较准确地测量气溶胶信息,但这种方法下获取的只是空间点上的数据,对于大区域气溶胶时空分布并不能够正确反映。与此相对应的另一技术即为遥感技术,它具有覆盖面积广、快捷、获取信息方便等特点,相对于第一种方法可以更高效地获取大气气溶胶信息^[6]。当前利用Terra/Aqua卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)传感器观测的高分辨率卫星遥感资料反演气溶胶光学厚度可以克服地基探测的不足,为人们实时了解大区域范围内的气溶胶变化提供了可能。Terra和Aqua卫星是美国宇航局(NASA)实施的的对地观测系统计划中的两颗重要卫星,都属于太阳同步极轨卫星,两者分别在地方时上午和下午过境,每1~2天覆盖全球一次。MODIS影像有可见光、近红外和远红外的36个波段的数据,在大气监测方面具有监测云和气溶胶的能力^[7-9]。

MODIS通道1($0.620\sim 0.670\ \mu\text{m}$,红通道)和通道3($0.459\sim 0.479\ \mu\text{m}$,蓝通道)主要用于气溶胶遥感,它们通道宽窄,大气气体吸收不确定性对气溶胶遥感的影响能够得到很好的修正。利用大多数陆面在红蓝波段反射率低的特性,以植被指数(NDVI)或近红外通道($2.1\ \mu\text{m}$)反射率将森林判识为暗像元,通过相关公式计算可得到这些研究区域在红蓝通道下的地表反射率,这种用于确定地表反射率的暗像元方法已成为陆地上空气溶胶遥感应用最为广泛的算法^[10-12]。

本文使用MODIS标准数据产品,选取杭州地区2013年9月的MODIS L1B数据,基于6S大气辐射传输模式对杭州地区的气溶胶光学厚度进行反演。

2 气溶胶光学厚度反演基本原理

对于气溶胶相关特性的遥感分析是建立在大气顶辐亮度和表面反射率特性之间的关系理论上反演的,首先需要假定卫星观测的表面是均匀朗伯表面,在不考虑气体吸收的情况下卫星观测的表观反射率可以表达为

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

式中 ρ^* 是卫星观测到的表观反射率, ρ_a 为整层大气反射率, μ_0, μ, ϕ_0, ϕ 分别为太阳天顶角、卫星(观测)天顶角、太阳方位角、卫星方位角, $T(\mu_0), T(\mu)$ 分别表示从太阳到地面、从地面到卫星大气层总的透射率, s 为大气的球面反照率, ρ 为地表反射率。

事实上, ρ^* 也是气溶胶光学厚度的函数。对于均匀朗伯表面,大气垂直方向均匀变化,表观反射率可以表示为^[12]

$$\rho^*(\mu, \phi, \mu_0, \phi_0) = \frac{\pi L(\tau, \mu, \phi, \mu_0, \phi_0)}{\mu_0 E_s}, \quad (2)$$

式中 L 表示卫星传感器的测量辐亮度, τ 为光学厚度, E_s 为大气顶的太阳辐射通量。

结合(1)式和(2)式可知,卫星观测到的表观反射率 ρ^* 不仅仅是气溶胶光学厚度的函数,同时它又是地表反射率的函数,因此如果已知地表反射率,并根据不同地区的气溶胶特性确定了大气气溶胶的类型,就可以通过公式得到气溶胶光学厚度;反之,如果已知了气溶胶光学厚度以及相应的大气参数,也可以利用公式反演地表反射率。

3 反演的参数选择与建模

根据第一节的气溶胶光学厚度反演原理,反演需要确定地表反射率和气溶胶模型,选取合适的大气辐射传输模式,建立光学厚度及相关参数的查找表,依据查找表对特定的卫星反射率下的光学厚度进行查找即可。本文选择6S大气辐射模式。

3.1 地表反射率的确定

对于地表反射率的估算最常用方法是 Kaufman 等提出的暗像元法。由 Kaufman 等在通过大量的飞机试验后进行研究发现,绿色植被表面的反射率在非常清洁的大气条件下,其可见光红、蓝和 2.1 μm 有着相似的图像,图像的相似处说明它们之间存在着某种联系。暗像元方法表明,气溶胶下方的植被覆盖区在可见光红、蓝通道下,其地表反射率可以从 2.1 μm 通道的反射率估算出来。文献[13]表明,根据 Kaufman 等的实验验证,红蓝通道的地表反射率与 2.1 μm 下的地表反射率的关系可表示为

$$\begin{cases} \rho_r = \rho_{2.1}/2 \\ \rho_b = \rho_{2.1}/4 \end{cases} \quad (3)$$

式中 ρ_r 表示红通道(0.66 μm)下的地表反射率, ρ_b 表示蓝通道(0.47 μm)下的地表反射率。2007年 Levy 等^[14]对暗像元关系进行了改进,在考虑植被指数和散射角对地表反射率的影响的情况下给出了新的比值关系:

$$\begin{cases} \rho_r = \rho_{2.1} \times (\xi + 0.002\delta - 0.27) + 0.00025\delta + 0.033 \\ \rho_b = \rho_r \times 0.49 + 0.005 \end{cases}, \quad (4)$$

式中参数 ξ 可以由 MODIS 的 1.24 μm 通道和 2.1 μm 通道计算得到, δ 代表散射角,可表示为太阳天顶角、卫星天顶角和相对方位角的函数,具体表示方法可表示为

$$\delta = \arccos(-\cos\mu_0 \cos\mu + \sin\mu_0 \sin\mu \cos\phi). \quad (5)$$

3.2 气溶胶类型的确定

气溶胶有 4 种基本组成部分,分别是:1)煤烟性气溶胶(Soot),2)海洋性气溶胶(Oceanic),3)水溶性气溶胶(Water),4)沙尘性气溶胶(Dust)。6S 大气传输模式提供了 3 种既定的气溶胶类型,分别是大陆型气溶胶(Land type)、城市型气溶胶(City type)、海洋型气溶胶(Oceanic type),根据张军华等^[15]的研究,这 3 种气溶胶类型中各组成部分的浓度比(即体积百分比,下同)如表 1 所示。

表 1 6S 模型中既定的三种气溶胶类型各组分浓度比
Table 1 Concentration ratio of the three aerosol types in 6S model

Aerosol type	Component			
	Dust /%	Water /%	Oceanic /%	Soot /%
Land type	70	29	0	1
City type	17	61	0	22
Oceanic type	0	5	95	0

气溶胶类型在气溶胶反演计算中非常重要,但是将全球的大气环境中气溶胶仅仅分为这 4 种类型是不准确的,例如我国北方地区大气环境较为复杂,春季受到西北部沙尘的影响,冬季受到煤烟排放的影响,同时当地交通运输和工业排放也会产生各类气溶胶污染,而南方地区主要是以交通运输和工业污染为主。

图 1 是利用 AERONET 在中国地区的 5 个地基观测站观测的城市气溶胶类型分布特性。AERONET 是 NASA 为了监测全球大气气溶胶特性而设立的地基观测网络,目前在全球共有 800 多个观测站^[16]。所选取的 AERONET 在中国地区的 5 个地基观测站的基本信息如表 2 所示,所选取的 5 座城市代表着我国华北、华南、中部以及西北地区的不同生态环境和气候状况。

根据表 1,采用陈好等^[17]的方法选取指定时间段内 AERONET 产品 675 nm 波段的数据值进行分析,研究气溶胶单次散射反照率、细粒子数百分比等特征,基于徐博等^[18-20]的方法得到 4 种类型气溶胶的浓度比。图 1 是所选取的 5 个地区在指定观测时间段内的气溶胶各种组分浓度比的平均值。

表 2 AERONET 在中国的 5 个地基观测站的基本信息

Table 2 Basic informations of the 5 ground stations of the AERONET in China

Station ID	City	Longitude/Latitude	Observation time
A	Beijing	116.381/39.977	2003-3~2013-3
B	Hangzhou	119.927/30.257	2006-7~2012-10
C	Taihu	120.215/31.421	2005-9~2013-8
D	Lanzhou	104.137/35.946	2006-7~2012-10
E	Taiwan	121.500/25.030	2006-7~2012-10

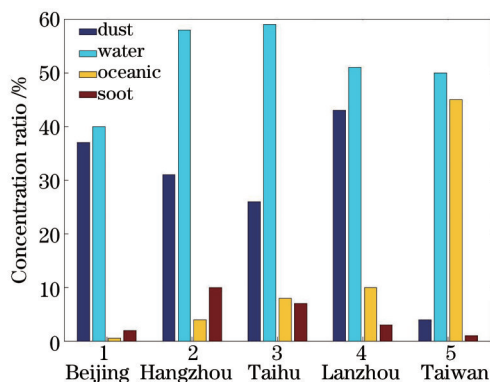


图 1 5 个地区气溶胶各种组分浓度比

Fig 1 Concentration ratios of various aerosol components in the 5 areas

由图 1 知,每个地区大气气溶胶各类型中水溶性所占占比最高,均在 40% 以上,海洋性和煤烟性最少,一般低于 10%。为此,建立数学模型对待反演地区的气溶胶各组分比例进行确定,其中依据图 1 的结果,对杭州地区的气溶胶组分的体积百分比进行取值区间限定。模型建立的算法流程图见图 2,具体如下:

1) 令大气气溶胶各类型中沙尘性气溶胶体积百分比为 v_1 , 水溶性气溶胶体积百分比 v_2 , 海洋性气溶胶体

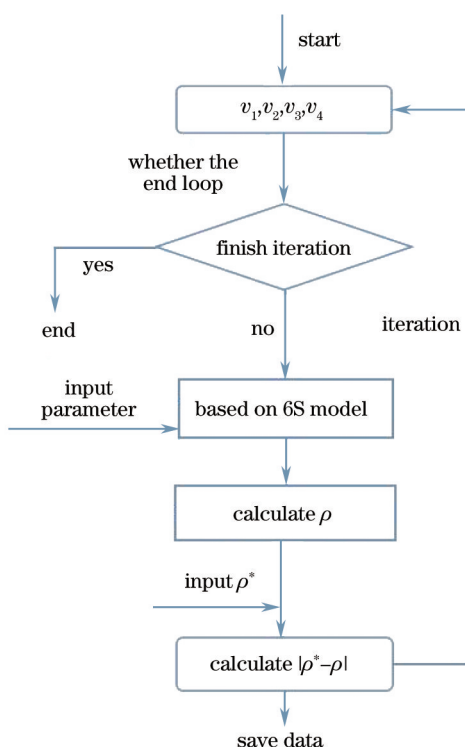


图 2 求解气溶胶类型的数学模型建模示意图

Fig.2 Diagram of building the mathematical model to get the aerosol types

积百分比 v_3 , 煤烟性气溶胶体积百分比为 v_4 , 其中 $v_1 + v_2 + v_3 + v_4 = 1$ 。根据待反演地区的环境特性与气候状况指定各组分取值的区间, 结合图 1, 以杭州地区为例, 限定 $0 \leq v_1 \leq 0.400$, 限定 $0.400 \leq v_2 \leq 1$, 限定 $0 \leq v_3 \leq 0.100$ 。假设 MODIS 数据中卫星观测的表观反射率在红通道(660 nm)下为 ρ_r , 在蓝通道(470 nm)下为 ρ_b 。将 v_1 从 0~0.400 之间递增迭代, v_2 从 0.400~1 之间递增迭代, v_3 从 0~0.100 之间递增迭代, v_4 由 $v_4 = 1 - (v_1 + v_2 + v_3)$ 计算得到, v_1, v_2, v_3 的迭代步长均为 0.001。

2) 对于每一次迭代, 将 v_1, v_2, v_3, v_4 的值代入 6S 大气传输模拟软件, 卫星反射率作为未知变量, 分别计算出 MODIS 红通道(660 nm)下卫星反射率 ρ_r^* 和蓝通道(470 nm)下卫星反射率 ρ_b^* 。其中软件输入参数中气溶胶光学厚度值采用 CE-318 太阳光度计的观测值。CE-318 是高精度野外太阳和天空辐射测量仪器, 拥有自动化的瞄准系统, 数据传输方便, 但是在进行天空辐射相关测量中, 只有 500, 440, 670, 870, 1640, 1020 nm 共 6 个波段, 本文使用其 670 nm 波段的光学厚度观测值作为 6S 大气传输模拟软件的输入参数计算 MODIS 红通道(660 nm)下卫星反射率 ρ_r^* , 使用其 440 nm 波段的光学厚度观测值作为 6S 大气传输模拟软件的输入参数计算 MODIS 蓝通道(470 nm)下卫星反射率 ρ_b^* , 计算出 ρ_r^*, ρ_b^* 分别与 ρ_r, ρ_b 的差值的绝对值, 即 $e_r = |\rho_r^* - \rho_r|$, $e_b = |\rho_b^* - \rho_b|$ 。将每一次迭代时的数据 v_1, v_2, v_3, v_4 与对应的 e_r, e_b 值作为一组记录下来。

3) 迭代完成后, 从所有记录中选取 e_r 最小的 m 组数据和 e_b 最小的 n 组数据, 其中 m, n 的值视 e_r, e_b 的值的分布特征而定。本文的反演中根据实例数据选定满足 e_r (或 e_b) 的标准差不大于 9 的最大数据组数作为 m (或 n)。

4) 取上一步骤中得到的 $m + n$ 组数据中所有 v_1 数据的平均值作为沙尘性气溶胶的浓度比, 所有 v_2 数据的平均值作为水溶性气溶胶的浓度比, 所有 v_3 数据的平均值作为海洋性气溶胶的浓度比, 所有 v_4 数据的平均值作为煤烟性气溶胶的浓度比, 如此便完成确定气溶胶各组分浓度比例的数学建模。表 3 为杭州地区的气溶胶各组分的浓度比的建模结果。

表 3 杭州地区的气溶胶各组分的浓度比

Table 3 Concentration ratios of aerosol components in Hangzhou

Aerosol component	Dust	Water	Oceanic	Soot
Concentration ratio /%	30	56	2	12

表 3 显示的结果与图 1 中杭州观测站的观测数据基本是一致的, 表明杭州地区是以细粒子水溶性成分为主, 强吸收性成分所占比例较低, 属于典型的非工业性城市。

3.3 建立查找表

得到地表反射率以及气溶胶类型后, 根据 6S 大气传输模拟软件, 适当改动软件的源码可以分别建立 MODIS 红光波段和蓝光波段的 550 nm 气溶胶光学厚度查找表。根据实验数据选取的日期以及待反演地区的地理位置选择合适的大气模式用于描述大气气体吸收和分子散射的作用。由于反演实例选择杭州地区 (N29.96°~30.50°, E119.78°~120.25°) 2013 年 9 月的 MODIS 数据, 因此大气模式选择中纬度夏季大气轮廓线。所建的查找表中气溶胶光学厚度以 0.05 为步长从 0~2.50 之间递增, 地表反射率以 0.01 为步长从 0~0.10 之间递增, 卫星天顶角和太阳天顶角以 10° 为步长从 0°~80° 递增, 卫星观测方位角与太阳方位角的角度之差以 5° 为步长从 0°~180° 递增。

对查找表中的数据进行 3 次样条插值得到参数在区间内的所有连续数据。

4 杭州地区气溶胶反演实例

本文进行气溶胶反演的数据选用的是 MODIS L1B 产品在杭州地区 (N29.96°~30.50°, E119.78°~120.25°) 2013 年 9 月 1 日到 9 月 30 日之间的 12 天的数据。首先利用 ENVI4.8 软件对所提取的 L1B 数据进行几何纠正等预处理, 并在纠正后的图像中提取用于反演的红蓝波段以及 2.1 μm 波段的几何路径参数、卫星表观反射率等信息, 图 3 是纠正后的遥感影像示意图。所提取的太阳天顶角为 55.40°, 观测方位角为 240.10°。



图3 几何纠正后的杭州地区 MODIS L1B 遥感图

Fig3 Remote sensing image after geometric correction of MODIS L1B data in Hangzhou

4.1 反演结果

由第2节和3节所述的反演方法和流程,对 MODIS 资料进行数据的提取与遥感图像预处理,建立数学模型获取气溶胶各组分的浓度比以确定自定义的气溶胶类型,结合卫星资料数据基于 6S 大气传输模拟软件建立光学厚度查找表,最后针对查找表中的数据进行插值得到杭州地区的气溶胶光学厚度的空间分布图如图 4 所示(以 9 月 16 日为例)。此空间分布图以经纬度为坐标,采集区域内的 40 个点,对采集的坐标点进行光学厚度反演计算得到光学厚度值,最后根据 Matlab 函数 griddata 对数据线性内插得到。

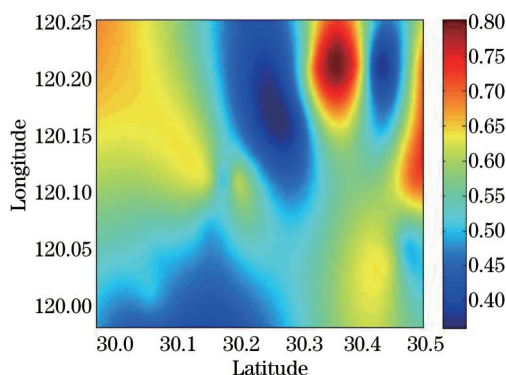


图4 本文反演方法得到的气溶胶光学厚度空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of aerosol optical thickness over experiment areas by this inversion method

4.2 气溶胶光学厚度反演精度检验

本文选用 AERONET 的太阳光度计 CE-318 在杭州地区的观测站点的观测数据来校验本文光学厚度反演的精确度,该站点经纬度为 N30.257°, E119.927°, 位于浙江省杭嘉湖平原地区。为了对数据进行时空匹配,地面站点观测的气溶胶光学厚度选取卫星过境前后 30 min 的平均值,依据 Ångström 波长指数公式^[21],将太阳光度计的观测波段数据转换到 550nm 的气溶胶光学厚度数据。表 4 是本文的反演算法反演的结果与太阳光度计观测值的比较,其中观测值指的是杭州站点太阳光度计的光学厚度观测值,反演值是使用本文的反演方法得到的值,绝对误差是观测值与反演值的差,相对误差是绝对误差与观测值的百分比的绝对值。

由表 4 可以看出,本文的反演结果与观测值相比,大部分相对误差小于 20%,极少数天(如 19 号、22 号)相对误差达到 30%~60%。根据 Kaufman 等的理论计算^[21],普遍情况下反演光学厚度的绝对误差在 0.1 以内的反演算法即为较好的算法,结合表 4 中的数据知,本文的反演精度高,算法可行。

此外,本文针对 6S 模型中的标准气溶胶类型也做了反演,选取与杭州地区工业、城市环境最匹配的城市型气溶胶作为 6S 中输入的气溶胶类型(其中城市型气溶胶的各组分浓度比见表 1),采用本文的反演步骤得到的气溶胶光学厚度的反演值,仍然用太阳光度计的观测值作为比较值得出反演的相对误差,将此误差值与本文自定义的气溶胶类型反演值的相对误差进行对比,如图 5 所示。

表4 本文反演方法得到的反演值与太阳光度计观测值比较

Table 4 Comparison of the values between inversion method from MODIS and the observation from AERONET

Date	Observation value	Inversion value	Absolute error	Relative error /%
9.1	0.76	0.7	0.06	7.89
9.4	0.61	0.58	0.03	4.92
9.5	0.43	0.5	-0.07	16.28
9.7	0.55	0.61	-0.06	10.91
9.13	0.82	0.76	0.06	7.32
9.14	0.76	0.8	-0.04	5.26
9.16	0.56	0.62	-0.06	10.71
9.19	0.39	0.63	-0.24	61.54
9.22	0.54	0.36	0.18	33.33
9.26	0.43	0.46	-0.03	6.98
9.28	0.4	0.43	-0.03	7.50
9.30	0.55	0.6	-0.05	9.09

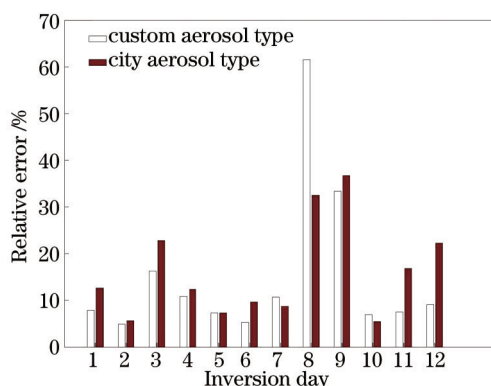


图5 本文自定义气溶胶与城市型气溶胶反演精度对比

Fig.5 Comparison of the inversion values using the custom aerosol and the city aerosol

根据图5显而得到杭州地区的气溶胶最接近城市型,具有强吸收性,但本文的自定义气溶胶总体的相对误差更小,除了个别天(如19日)以外,其他相对误差值比城市型气溶胶反演的相对误差低至少3%,反演精度高,数学模型很可靠。

5 结 论

本文通过建立数学模型得出待反演地区气溶胶各组分浓度比,进而利用MODIS遥感数据在6S大气传输模型的基础上对城市气溶胶光学厚度进行反演,同时使用6S模型中既定的城市型气溶胶类型进行了反演,最后利用太阳光度计对反演的精度进行了验证。通过本文的反演试验,得出如下结论:

1)本文通过自定义的气溶胶类型反演光学厚度比采用6S中既定的气溶胶类型反演的精度更高,说明建立的确定大气气溶胶各组分浓度比的数学模型是可靠的。

2)对杭州地区2013年9月的大气气溶胶光学厚度进行反演结果显示,杭州地区该月气溶胶光学厚度值整体略偏大,考虑到气溶胶吸湿性增大的特点,该地区气候湿润,与浙江气象站提供的杭州天气状况较为吻合。

分析反演结果与太阳光度计观测值之间的误差来源,可以得到如下结论:

1)太阳光度计的观测波段选取有限,采用指定波段的观测结果来近似替代另一波段的光学厚度会产生误差。

2)由于地表的复杂多样性,地表反射率很难准确获得。本文采用改进的暗像元法,通过红、蓝通道地表反射率与其他MODIS通道的地表反射率关系来确定存在一定的不确定因素,尤其是此方法在暗地表区域的

效果更好,杭州地区的地表环境是否适用于此方法还需要实验验证。

参 考 文 献

- 1 Xiao Zhongyong, Jiang Hong, Yu Shuquan, *et al.*. Monitoring the atmosphere aerosol optical characteristics using hyper spectral remote sensing in Hangzhou region [J]. *Acta Scientia Circumstantiae*, 2008, 28(9): 1894-1903.
肖钟湧, 江 洪, 余树全, 等. 杭州地区大气气溶胶光学特性高光谱研究[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(9): 1894-1903.
- 2 Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan, *et al.*. Remote sensing of high spatial resolution aerosol optical depth with MODIS data over Hongkong [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(3): 335-342.
李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用MODIS资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度[J]. *大气科学*, 2005, 29(3): 335-342.
- 3 Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Xiaoyang, *et al.*. Research on the air pollution in Beijing and it's surroundings with MODIS AOD products [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(5): 869-880
李成才, 毛节泰, 刘晓阳, 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.
- 4 Li Xiaojing, Liu Yujie, Qiu Hong. Retrieval method for optical thickness of aerosols over Beijing and its vicinity by using the MODIS data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 28(9): 1894-1903.
李晓静, 刘玉洁, 邱 红, 等. 利用MODIS资料反演北京及其周边地区气溶胶光学厚度的方法研究[J]. *气象学报*, 2008, 28(9): 1894-1903.
- 5 Wang Jing, Yang Fumo, Wang Dingyi, *et al.*. Characteristics and relationship of aerosol optical thickness and PM_{2.5} concentration over Beijing [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(1): 10-16.
王 静, 杨复沫, 王鼎益, 等. 北京市MODIS气溶胶光学厚度和PM_{2.5}质量浓度的特征及其相关性[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, 27(1): 10-16.
- 6 Tang Jiakui, Xue Yong, Yu Tong, *et al.*. Remote sensing retrieval of aerosol of MODIS [J]. *Science China Earth Sciences*, 2005, 35(1): 471-481.
唐家奎, 薛 勇, 虞 统, 等. MODIS陆地气溶胶遥感反演[J]. *中国科学: 地球科学*, 2005, 35(1): 471-481.
- 7 Ma Jinji, Qiao Yanli, Yang Shizhi, *et al.*. Using MODIS image to retrieve aerosol optical characteristic over coast of China [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 25(8): 2039-2045.
麻金继, 乔延利, 杨世植, 等. 利用MODIS图像反演中国近海海域的气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2039-2045.
- 8 Li Dong, Chen Wenzhong. Comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data with *in-situ* sky radiometer observations over east China sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2827-2836.
李 栋, 陈文忠. MODIS遥感中国东部海域气溶胶光学厚度与现场测量数据的对比分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2827-2836.
- 9 Yang Honglong, Lu Chao, Liu Aiming, *et al.*. Analysis of aerosol optical properties and sources at Shenzhen [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201003.
杨红龙, 卢 超, 刘爱明, 等. 深圳地区气溶胶的光学特征及来源分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201003.
- 10 Liu Guiqing, Mao Jietai, Li Chengcai. Optical depth study on atmospheric aerosol in Yangtze River Delta region [J]. *Environmental Protection*, 2003, (8): 50-54.
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]. *环境保护*, 2003, (8): 50-54.
- 11 Wang Xinqiang, Yang Shizhi, Zhu Yonghao. Aerosol optical thickness retrieval over land from MODIS data based on the inversion of 6S model [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2003, 20(5): 629-634.
王新强, 杨世植, 朱永豪, 等. 基于6S模型利用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.
- 12 Peng Nina, Yi Weining, Fang Yonghua. Retrieval of aerosol optical depth based on 400~1000 nm dense dark vegetation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 878-883.
彭妮娜, 易维宁, 方勇华, 等. 400~1000 nm波段反演气溶胶光学厚度的暗相元法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 878-883.
- 13 Y J Kaufman, Andrew E Wald, Lorraine A Remer, *et al.*. The MODIS 2.1 μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1286-1298.
- 14 C Robert Levy, A Remer Lorraine. A new algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance [J]. *J Geophys Res*, 2006.

- 15 Zhang Junhua, Si Zhaojun, Mao Jietai, *et al.*. Remote sensing aerosol optical depth over China with GMS-5 satellite [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(1): 23-35.
张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 23-35.
- 16 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513002.
- 17 Chen Hao, Gu Xingfa, Cheng Tianhai, *et al.*. Characteristics of aerosol types over China [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(6): 1559-1571.
陈 好, 顾行发, 程天海, 等. 中国地区气溶胶类型特性分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(6): 1559-1571.
- 18 Xu Bo, Huang Yinbo, Fan Chengyu, *et al.*. Calculation of equivalent absorption coefficient of uniformly mixed hygroscopic aerosol particles [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0101001.
徐 博, 黄印博, 范承玉, 等. 吸湿性均匀混合气溶胶粒子等效吸收系数计算分析[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0101001.
- 19 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, *et al.*. New method of aerosol extinction coefficient measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- 20 J Lee, J Kim, C H Song, *et al.*. Characteristics of aerosol types from AERONET sun photometer measurements [J]. Atmos Environ, 44 (26): 3110-3117.
- 21 Y J Kaufman, C Sandra. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(8): 1357-1381.

栏目编辑: 王晓琰