

MODIS C061 气溶胶光学厚度产品在西安地区的适用性研究

刘晶晶¹, 刘芸¹, 王国英¹, 华灯鑫^{1*}, 王骏¹, 闫庆^{1,2}, 何廷尧¹, 高飞¹

¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

²西安理工大学数控机床及机械制造装备集成教育部重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要 利用西安地区太阳光度计(POM-02)的观测数据,根据比尔-朗伯-布格定律计算了西安地区的大气气溶胶光学厚度(AODs),将其作为真值与 NASA Terra 卫星的 MODIS C061 产品中气溶胶光学厚度的三种反演结果进行了对比,探讨了三种反演算法在西安地区的精确度及适用性,并结合 MODIS 气溶胶产品统计分析了西安及周边地区气溶胶光学厚度的空间分布和季节变化特征。结果表明: Terra 卫星 MODIS 三种反演算法中 DT&DB 产品与太阳光度计反演的气溶胶光学厚度相关系数最高(0.92),故 MODIS 中的 DT&DB 产品最适用于西安地区,可用于西安地区气候变化以及大气污染等研究。分析关中地区 AOD 的时空分布特征及其可能原因可知:关中地区气溶胶主要包括人类活动产生的气溶胶和沙尘气溶胶,关中地区气溶胶光学厚度整体呈东高西低的分布趋势,高值中心主要分布在西安、渭南和咸阳等地区;气溶胶光学厚度在西安、咸阳地区春季最大、秋季最小,而在关中其他地区整体呈现春夏高、秋冬低的季节变化趋势。

关键词 大气光学; 太阳光度计; MODIS; 气溶胶光学厚度; 西安地区

中图分类号 P413

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1001004

Applicability of MODIS C061 Aerosol Optical Depth Products in Xi'an Region

Liu Jingjing¹, Liu Yun¹, Wang Guoying¹, Hua Dengxin^{1*}, Wang Jun¹,
Yan Qing^{1,2}, He Tingyao¹, Gao Fei¹

¹ School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

² Key Laboratory of NC Machine Tools and Integrated Manufacturing Equipment, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Aerosol optical depths (AODs) are calculated for the Xi'an region based on the observation data of a sky radiometer (POM-02) and Beer-Lambert-Bouguer law. These AODs are used as true values to compare with three inversion algorithms' results of AODs in the MODIS C061 product of NASA Terra satellite, and the accuracies and applicability of those three inversion algorithms for the Xi'an region are discussed. Furthermore, we statistically analyze the spatial distributions and seasonal variation characteristics of AODs for the Xi'an region and its surrounding region using MODIS aerosol products. The results indicate the following: there is the best relationship between the AODs inverted from the MODIS DT&DB product and POM-02 data among those three MODIS inversion algorithms of Terra satellite, and its correlation coefficient is approximately 0.92. Thus, the MODIS DT&DB product is the most appropriate product for studying climate change and air pollution in the Xi'an region. Dust storms and human activities are the main sources of aerosols in the Guanzhong Plain. The AODs are greater in the eastern part and less in the western part of Guanzhong Plain, and the high-value centers are mainly distributed in the regions such as Xi'an, Xianyang, and Weinan. The AODs in the Xi'an and Xianyang regions reach their maximum and minimums in the spring and autumn, respectively. However, the AODs from other regions in the

收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61705180,61675166)、陕西省自然科学基金(2018JQ4046)、陕西省教育厅科学研究计划专项(16JK1555)

* E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

Guanzhong Plain show apparently seasonal variation characteristics with greater values in spring and summer and lower values in autumn and winter.

Key words atmosphere optics; sky radiometer; MODIS; aerosol optical depth; Xi'an region

OCIS codes 010.0280; 010.1110; 280.1100

1 引 言

气溶胶对大气能见度、人体健康以及人类生产生活等都具有重要的影响,同时也是极其重要的气候强迫因子。对气溶胶的环境和气候效应的研究已经成为当前大气科学研究的热点之一^[1-4]。改革开放以来,我国经历了快速发展,高强度的污染物排放使多个地区环境质量逐渐恶化,大气污染已成为最严重的环境问题之一。我国西北地区既是生态环境脆弱区,又是气候变化敏感区^[5],同时其具有的复杂地形地貌和大气污染排放源,使得该地区气溶胶的含量、种类等都存在较大的时空分布差异。因此,准确评估西北地区气溶胶的物理光学特性以及时空分布特性等对于气候变化研究和国计民生都具有重要的研究意义。

高分辨率的卫星遥感为大气污染监测提供了一种有效手段,弥补了一般地面观测难以反映污染物空间具体分布和变化趋势的不足。中分辨率成像光谱仪(MODIS)作为一种主要探测气溶胶光学特性的卫星遥感仪器,已得到广泛应用。其具有 36 个通道,覆盖了紫外、可见、近红外、红外等通道,为反演气溶胶和地表特征提供了丰富的信息。但卫星接收到的辐射受到地球大气的散射以及地表反射的复杂影响,且光学厚度反演过程中地表反照率和气溶胶模型带来的误差难以估计,使得 MODIS 本身反演结果存在不确定性,因此,卫星遥感需要地面太阳光度计的协同观测进行对比与验证研究。

现今,国内外已建立了 AERONET(美国 NASA 全球气溶胶监测网)、SKYNET(日本气溶胶/辐射观测网)、CARSNET(中国气溶胶地基遥感监测网)等著名的地面气溶胶综合观测站,积累了大量宝贵的观测数据^[6-8],为 MODIS 遥感气溶胶的精度和可靠性验证提供数据支持,取得了大量有意义的研究成果。如:利用太阳光度计的观测资料验证了 MODIS 产品在北京、香港、武汉以及珠江三角洲、西北干旱半干旱等地区的气溶胶光学厚度(AOD)精度^[9-14];周春艳等^[15]利用 AERONET 资料对比分析了 MODIS 气溶胶第四版(C4)和第五版(C5)产品,发现 C5 气溶胶产品更接近地表观测结果;Sayer 等^[16]利用 AERONET 观测网 111 个站

点评估 MODIS 三种气溶胶产品的反演精度;Che 等^[17]利用 CARSNET 的地基观测资料对比分析了 MODIS 第六版(C6)产品^[18]的 AOD 在中国东部地区的精度。Xie 等^[19]用 CARSNET 资料与 MOD04_L2 产品进行对比发现,暗目标法(DT)更适用于植被覆盖率高的地区,而深蓝法(DB)更适用于荒漠以及地表极其复杂的大城市。

然而,AERONET、SKYNET 等太阳光度计观测网在西安地区无观测站点,导致 MODIS 产品在西安地区精确性和适用性的地面验证工作难以开展。本文基于西安理工大学(位于西安城区)太阳光度计(POM-02)观测资料,对其进行定标处理并获得了 AOD,结合 Terra 卫星上 MODIS C061 数据中暗目标法、深蓝法、暗目标与深蓝算法结合(DT&DB)的三种气溶胶产品,利用统计方法,对 MODIS 三种气溶胶产品与地基观测资料进行对比分析,研究 MODIS 三种气溶胶产品在西安地区的适用性,并在此基础上分析关中地区 AOD 的时空分布特征及其可能原因。

2 数据介绍与处理

2.1 太阳光度计(POM-02)

POM-02 型太阳光度计由日本 PREDE 公司生产,是 SKYNET 的主要观测设备之一^[20]。该仪器作为气溶胶光学特性最主要最基本的地基探测手段,其光学特性的精度已得到广泛认可和使用。POM-02 型太阳光度计可以获得从紫外到近红外共 11 个波段的太阳直接辐射值,其中心波长分别为 315, 340, 380, 400, 500, 675, 870, 940, 1020, 1627, 2200 nm。其中,315 nm 和 940 nm 通道的数据可分别用于反演柱总臭氧含量^[21]和柱总水汽量^[22-23]。1627 nm 和 2200 nm 通道的辐射值可用于反演云光学特征参数;其他通道的直接辐射值可用于计算气溶胶光学厚度值。除了雨雪天气,仪器在白天实时跟踪太阳并观测,约 10 min 观测一次数据。本研究利用西安理工大学 2016 年 POM-02(2015 年购买并投入使用)的观测数据用于 AOD 的反演,验证 MODIS 产品的反演精度。

2.2 MODIS

Terra 卫星于 1999 年 12 月发射升空^[24-25],其

搭载的 MODIS 传感器能获得从可见光(0.405 μm)到热红外(14.385 μm)36 个波段的观测数据。目前,MODIS AOD 的产品现已发展到 C061 版本,主要包括暗目标法、深蓝法以及暗目标法与深蓝算法结合的三种算法。研究表明^[26]:传统 MODIS 暗目标法较适合于暗地表,而深蓝算法能够较好地反演亮地表的 AOD。因此不同的反演算法适合于不同区域和下垫面。本研究采用地基观测对 MODIS 卫星产品在西安地区的适用性进行验证与分析。主要利用了 2016 年 Terra MODIS AOD 产品数据集(MOD04_L2)中的 3 种反演产品(DT, DB, DT&DB),其空间分辨率为 10 km \times 10 km,版本号为 C6.1。同时,为了剔除云的影响,MODIS 云产品(MOD06_L2)也被使用。

2.3 MODIS 与太阳光度计的匹配原则

由于 MODIS 的观测时间、观测区域等与太阳光度计存在较大差异,而两者能够同时、同地地观测同一对象成为它们能够互相对比验证的前提。因此 MODIS 与太阳光度计观测的时空匹配至关重要,具体的匹配原则如图 1 所示。空间匹配原则:以西安理工大学地基观测仪器所处的经纬度(108.99 $^{\circ}$ E, 34.26 $^{\circ}$ N)为中心,选取 0.5 $^{\circ}$ \times 0.5 $^{\circ}$ 的经纬度范围内的卫星数据平均值与 POM-02 反演的气溶胶光学厚度结果进行匹配。时间匹配原则:根据 MODIS 过境时刻对太阳光度计观测结果进行半小时平均(过境前后 15 min)。波段匹配原则:为与 MODIS 产品的波段相对应,将太阳光度计 400 nm、670 nm 的结果进行插值获得 550 nm 的气溶胶光学厚度。除此之外,云的存在会大大降低气溶胶光学特性的反演精度,为了最大程度提高反演精度,利用 MODIS 的云产品来确定选取的时空区域内晴朗无云,否则数据无效。

经过上述相应的时间、空间、波段匹配以及剔云处理之后,挑选出符合条件的数据,将 MODIS 相关产品与太阳光度计的相关结果进行对比与统计分析,从而获得 MODIS 各种不同产品(DT, DB, DT&DB)在西安地区的适用性,为 MODIS 产品在西安地区的使用提供理论依据。

3 太阳光度计的定标及反演

某一波长处整层大气的光学厚度遵循比尔-朗伯-布格定律,其表达式为

$$V(\lambda) = V_0(\lambda) \cdot d^{-2} \cdot \exp[-m(\theta) \cdot \tau(\lambda)], \quad (1)$$

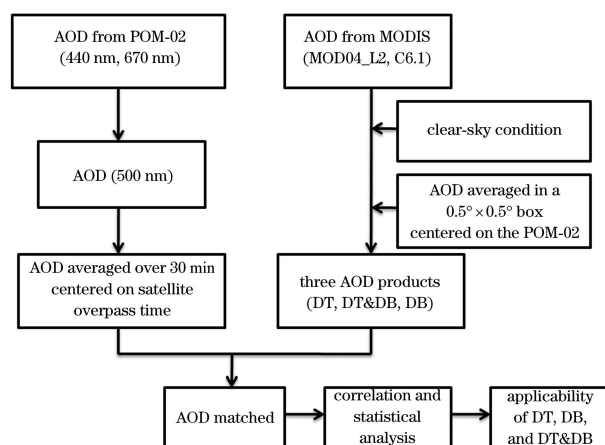


图 1 太阳光度计与 MODIS 气溶胶产品的匹配原则和对比分析路线

Fig. 1 Matching principle and comparative analysis route between sky radiometer and MODIS aerosol product

式中: $V(\lambda)$ 为太阳光度计接收到的波长为 λ 的太阳直接辐射通量; $V_0(\lambda)$ 为大气层处波长为 λ 的太阳直接辐射通量,即仪器的定标系数; d 为日地距离因子; $m(\theta)$ 为大气光学质量; $\tau(\lambda)$ 为在波长 λ 处整层大气的光学厚度。

$m(\theta)$ 在太阳天顶角 θ 小于 75 $^{\circ}$ 时可近似表示为

$$m(\theta) = 1/\cos(\theta). \quad (2)$$

对(1)式两边取自然对数,有

$$\ln[V(\lambda) \cdot d^2] = \ln[V_0(\lambda) - m(\theta) \cdot \tau(\lambda)]. \quad (3)$$

因此,由(3)式可知,在 $V(\lambda)$ 、 d 、 $m(\theta)$ 等参数已知的情况下,仅需知道仪器的标定系数 $V_0(\lambda)$ 即可获得整层大气的消光厚度。目前,一般采用 Langley 定标法来获得 $V_0(\lambda)$ 。定标时选取天气干燥洁净、大气状态稳定的理想天气,且光学质量数为 2~5 时,根据(3)式进行拟合获得太阳光度计定标系数(相关性要求在 0.99 以上)。由图 2 可知,虽然每天的相关系数都能满足定标要求,但每天获得的定标值依然具有较大差别,因此仅使用某天的定标值进行光学厚度的反演会带来较大的误差。研究表明,至少需要选择 8 天以上的理想天气进行 Langley 定标才有一定代表性,因此选择如下 8 天的观测数据进行拟合(图 2),用获得的平均定标系数来计算相应波长的光学厚度。

整层大气的消光光学厚度可表示为

$$\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda) + \tau_R(\lambda) + \tau_{\text{abs}}(\lambda), \quad (4)$$

式中: $\tau_a(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度; $\tau_R(\lambda)$ 为分子的瑞利散射光学厚度(可由经验公式获得); $\tau_{\text{abs}}(\lambda)$ 为吸收气体的光学厚度,主要包括臭氧和二氧化碳。臭氧

吸收光学厚度 $\tau_{o_3}(\lambda)$ 可表示为

$$\tau_{o_3}(\lambda) = K_{o_3}(\lambda) \cdot U_{o_3}, \quad (5)$$

式中: $K_{o_3}(\lambda)$ 为臭氧的吸收系数; U_{o_3} 为臭氧柱含量, 可由 OMI 卫星获得。图 3 给出了 2016 年 OMI 卫星获得的西安地区臭氧柱含量(国际上以 DU 为单位, 定义为标准大气压和温度下的厚度, 1 DU = 0.01 mm) 的日变化和季节变化图, 可以看出, 臭氧柱含量具有明显的日变化和季节变化特征, 整体呈春季最大、夏季最小的趋势。同理, 二氧化氮的光学厚度可由(5)式进行计算。

气溶胶光学厚度可以表示为

$$\tau_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}, \quad (6)$$

式中: β 为大气浑浊度系数, β 越大表示大气越混浊; α 为 Ångström 波长指数, α 的数值与大气气溶胶的平均半径有关, 反映了气溶胶粒子谱的分布特征, 一般情况下, α 越小表明气溶胶粒子尺度越大, 反之, 气溶胶粒子尺度越小。这两个参数可以通过拟合多个波段气溶胶光学厚度得到。将 α 和 β 代入(6)式即可获得太阳光度计在 550 nm 处的气溶胶光学厚度, 便于与 MODIS 进行对比。

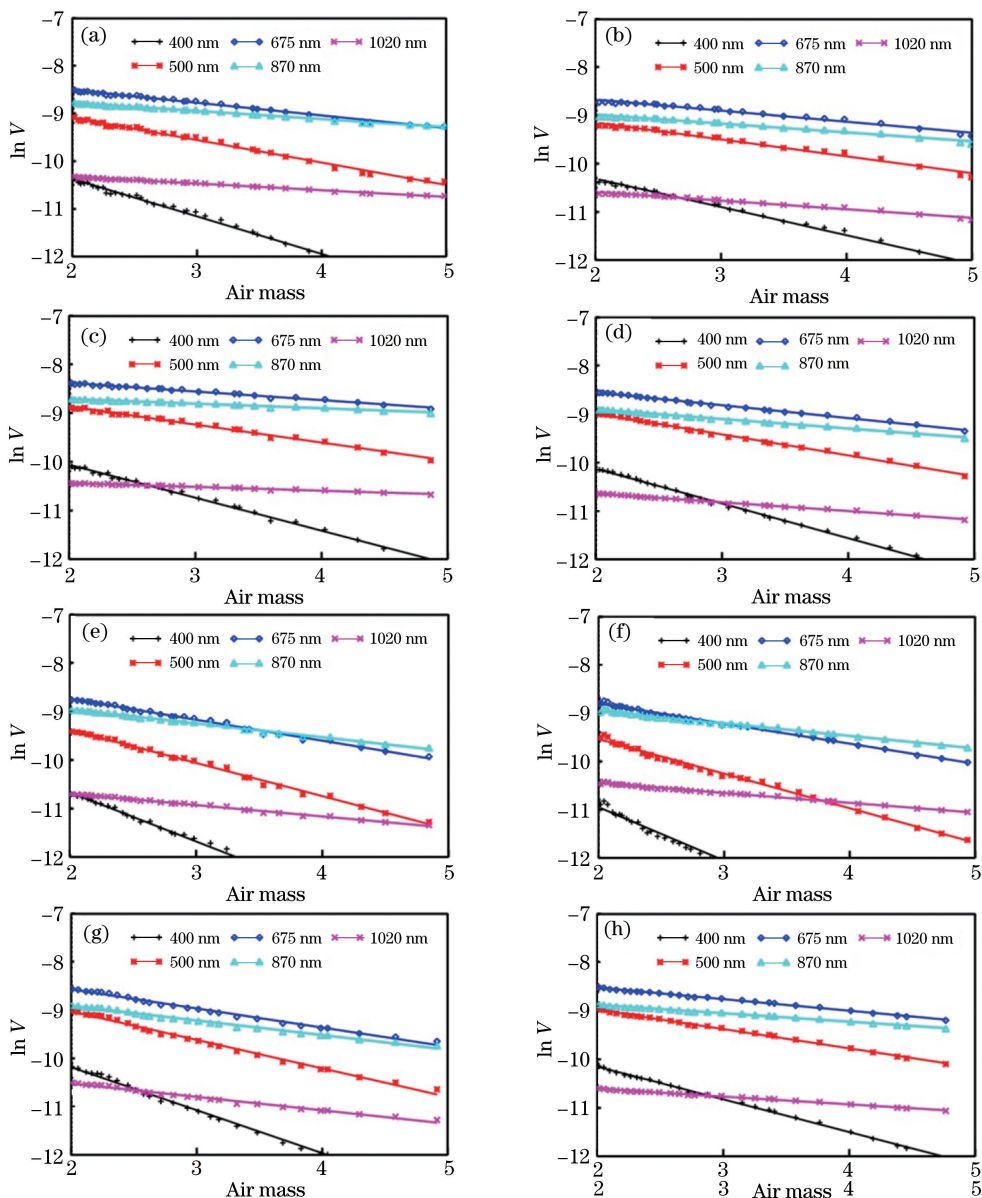


图 2 西安地区太阳光度计 2016 年 8 个时段 Langley 标定方法的结果。(a) 2016/02/08 上午; (b) 2016/05/10 上午; (c) 2016/09/10 上午; (d) 2016/09/11 上午; (e) 2016/10/18 上午; (f) 2016/02/02 下午; (g) 2016/05/10 下午; (h) 2016/09/11 下午
 Fig. 2 Results of Langley calibration method from 8-period measurements by sky radiometer for Xi'an region in 2016. (a) 2016/02/08 AM; (b) 2016/05/10 AM; (c) 2016/09/10 AM; (d) 2016/09/11 AM; (e) 2016/10/18 AM; (f) 2016/02/02 PM; (g) 2016/05/10 PM; (h) 2016/09/11 PM

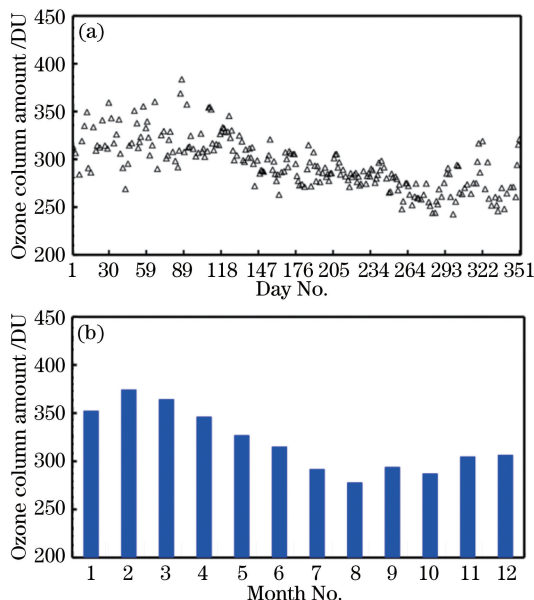


图 3 2016 年 OMI 的臭氧柱含量日变化及月平均分布图。

(a) 日均值; (b) 月均值

Fig. 3 Daily variation and monthly average distribution of Ozone column amount from OMI measurements in 2016. (a) Daily mean values; (b) monthly mean values

4 MODIS 气溶胶产品的适用性研究

图 4 为 MODIS 三种反演算法在西安地区 (POM-02 观测站点区域内) 的每月观测样本数和月平均值, 可以看出, MODIS 三种反演算法的观测样本数各有不同, DT 算法的有效样本数最多, DB 和 DT&DB 算法样本量相当。三种反演方法的 AOD 月均值具有较一致的变化趋势, 但在数值上存在明显的差异^[18], 整体而言: DT 算法的反演值最高, DB 算法的反演值最低, DT&DB 算法居中。上述哪种算法更适用于西安地区, 有待于进一步验证和分析。

本文结合 MODIS 与太阳光度计的时空匹配原则 (如图 1 所示), 利用 MODIS 云产品选取该时空区域内云量小于 5% 的天气, 最终获得 18 天晴空天气用来分析三种反演算法在西安地区的适用性。图 5 为 2016 年晴空条件下太阳光度计在不同波长下的观测结果, 随着波长的增加, 气溶胶光学厚度逐渐降低, 在 400 nm 处为 0.49 ± 0.17 , 在 1020 nm 处为 0.21 ± 0.068 。经过 MODIS 三种产品与太阳光度计的 AOD 对比分析 (如图 6、7 所示) 发现, DT&DB 产品与太阳光度计的相关系数最高, 为 0.92; DT 产品的相关系数略低, 为 0.91; DB 产品的相关系数最低, 为 0.70。这说明 DT&DB 产品更适合用于西安

地区气溶胶光学特性的分析。从日变化对比 (图 7) 中可知, DT、DB、DT&DB 三种算法与太阳光度计的最大差值分别为 0.15、0.23 和 0.15; 整体差异分别为 0.052 ± 0.042 、 0.080 ± 0.066 和 0.058 ± 0.039 (图 8)。上述结果均表明 DT&DB 算法与 DT 算法在西安地区整体表现相当, DT&DB 算法在相关性及稳定性上略优于 DT 算法。

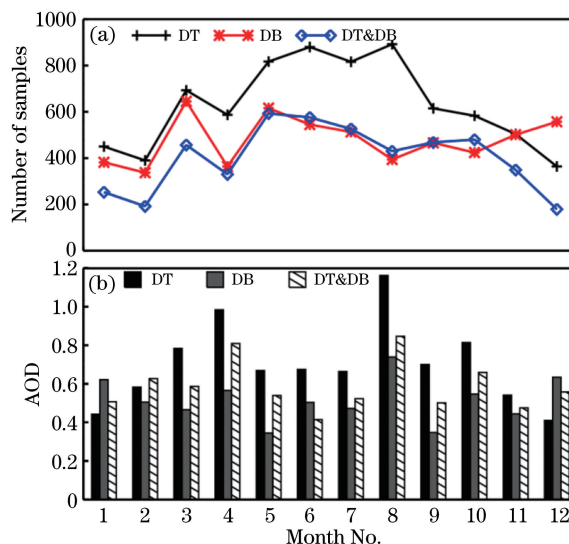


图 4 西安地区 MODIS 三种反演方法的结果。

(a) 每月有效观测样本数; (b) AOD 月均值

Fig. 4 Results of three MODIS inversion algorithms for Xi'an region. (a) Numbers of effective observation samples per month; (b) monthly mean values of AOD

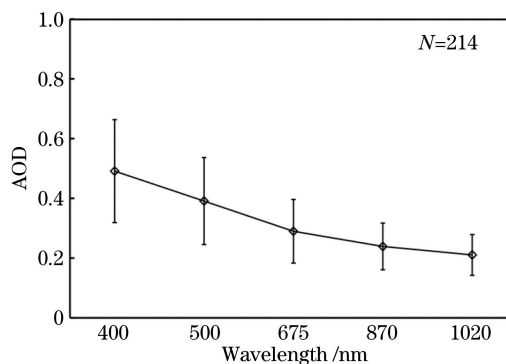


图 5 不同波长下气溶胶光学厚度变化特征 (N: 样本数)

Fig. 5 Variation characteristics of AOD under different wavelengths (N: number of samples)

5 西安及周边地区气溶胶光学厚度分布

图 9 给出了由 MODIS DT&DB 算法获得的 2016 年西安地区 AOD 的年均值分布。由图 9 可知, 关中地区气溶胶光学厚度呈现东高西低的趋势, 高

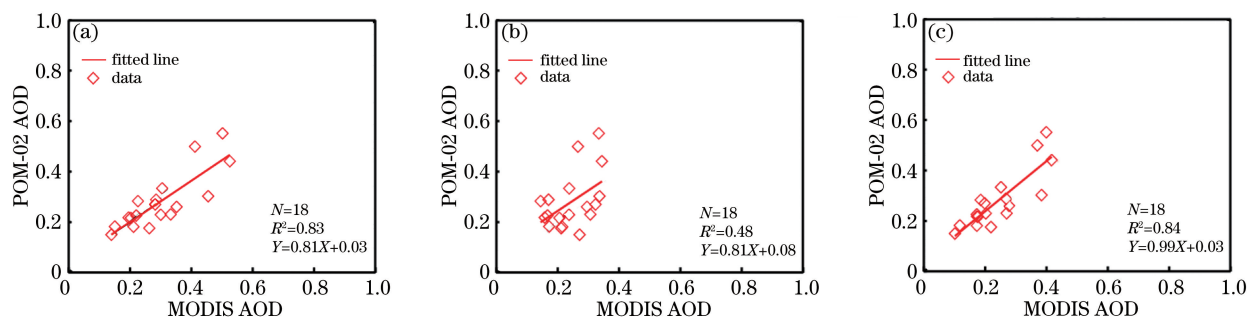


图 6 太阳光度计与 MODIS 三种反演算法获得的气溶胶光学厚度的相关性。(a) DT;(b) DB;(c) DT&DB

Fig. 6 Correlation between AODs calculated from sky radiometer and three MODIS inversion algorithms.

(a) DT; (b) DB; (c) DT&DB

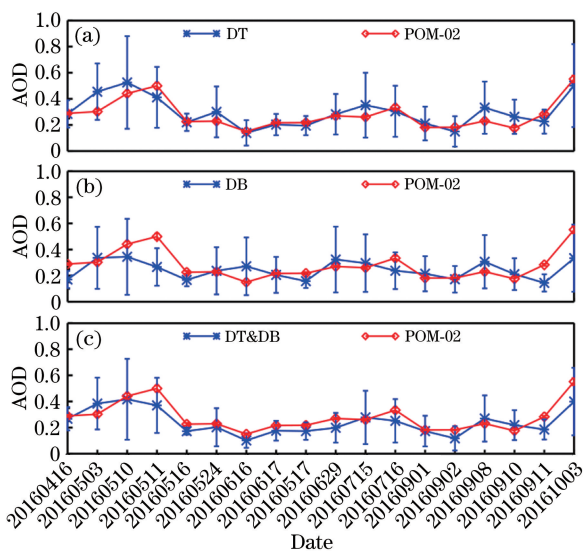


图 7 MODIS 算法与太阳光度计反演的气溶胶光学厚度逐日对比图。(a) DT 和 POM-02;(b) DB 和 POM-02;(c) DT&DB 和 POM-02

Fig. 7 Daily comparisons of AODs inverted from three MODIS algorithms and sky radiometer. (a) DT and POM-02; (b) DB and POM-02; (c) DT&DB and POM-02

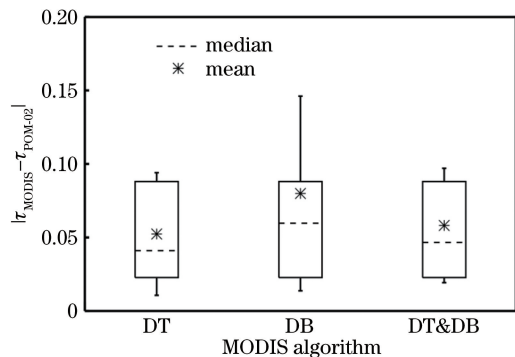


图 8 MODIS 三种算法与 POM-02 反演的 AOD 差值

Fig. 8 AOD differences between three MODIS algorithms and POM-02

值区主要位于西安、咸阳和渭南等地,低值区则位于

宝鸡、太白等区域,该结论与王钊等^[27]的结果一致。主要原因是关中地区气溶胶大部分来源于沙尘气溶胶和人类活动产生的气溶胶,其分布特征受地形和盛行风向的影响,使得气溶胶水平扩散受到抑制并在东部地区出现堆积,从而呈现出东高西低的趋势。

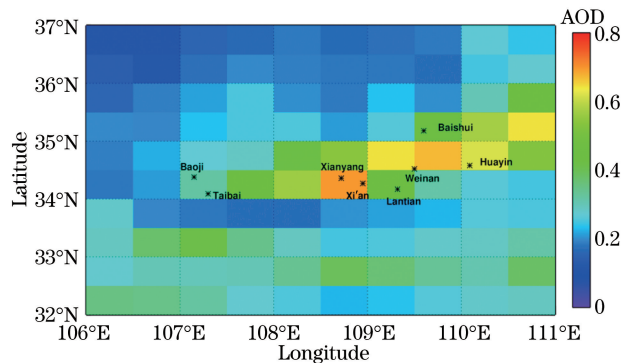


图 9 由 DT&DB 算法获得的关中地区气溶胶光学厚度年平均分布图

Fig. 9 Annual mean distribution of AODs in Guanzhong Plain calculated by DT&DB algorithm

图 10 为关中地区气溶胶光学厚度的季节分布。由图 10 可知:关中地区不同季节的 AOD 分布特征与年分布相似,整体呈现东高西低的趋势,不同季节 AOD 的高值中心和量值都存在较大差异:春季关中地区 AOD 高值中心主要位于西安东部以及渭南地区,主要原因是关中地区位于黄土高原的下游地区,春季黄土高原产生的沙尘气溶胶随风向下游地区输送导致关中地区东部春季气溶胶含量增加;夏季高值地区主要集中在渭南及其以东地区,这主要是夏季农业活动、秸秆焚烧导致该地区气溶胶含量剧增,夏季大气湿度较大促使气溶胶吸湿性增长;冬季高值中心位于西安、咸阳等地区,气溶胶主要由交通运输、工业排放等产生的气溶胶组成。除西安、咸阳地区以外,其他地区冬季 AOD 值都较低。在西安、咸阳地区,春季气溶胶光学厚度最大,为 0.65;秋季最

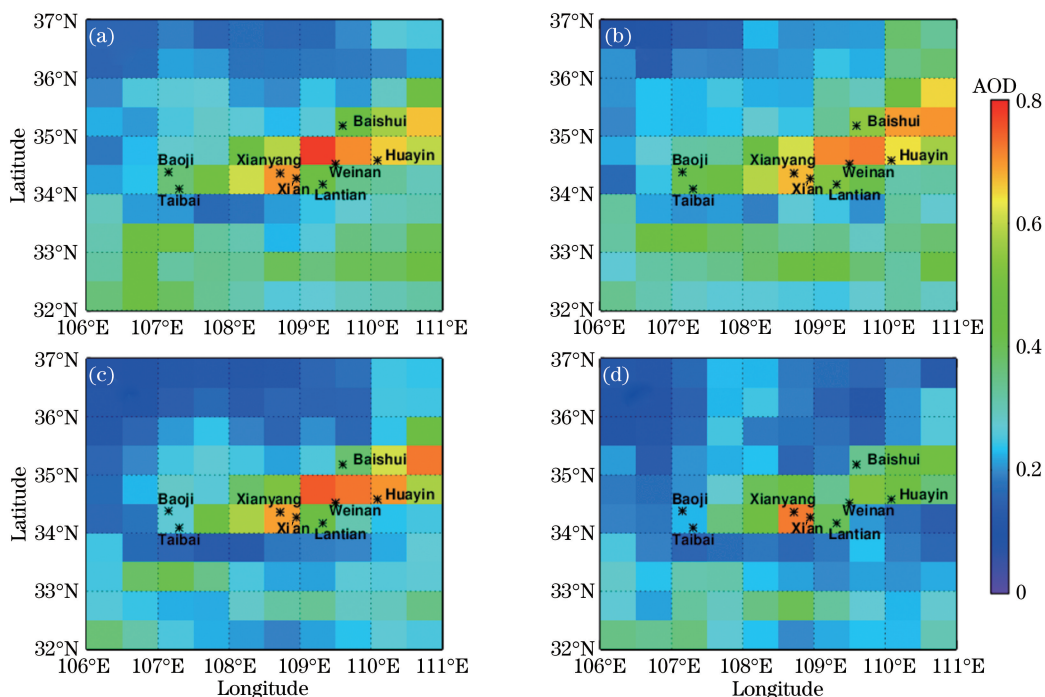


图 10 由 DT&DB 算法获得的西安及周边地区气溶胶光学厚度季节分布图。(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季
Fig. 10 Seasonal mean distributions of AOD in Xi'an and its surrounding regions calculated by DT&DB algorithm.

(a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

低,为 0.54;夏季和冬季分别为 0.6 和 0.56(图 11)。

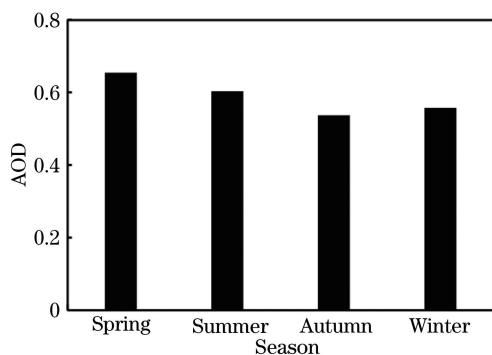


图 11 由 DT&DB 算法获得的西安、咸阳地区四个季节的气溶胶光学厚度

Fig. 11 Histogram of AODs in four seasons in Xi'an and Xianyang regions calculated by DT&DB algorithm

6 结 论

以西北典型城市西安为研究对象,利用太阳光度计的实时观测数据,选取符合条件的天气对太阳光度计进行定标,获得定标常数,反演了太阳光度计的气溶胶光学厚度。并与 MODIS 观测资料进行时空同步匹配,验证了 DT、DB、DT&DB 三种反演算法的精度并评估了它们在西安地区的适用性,最后获得了西安及周边地区气溶胶光学厚度的时空分布特征。结果表明:DT&DB 算法与太阳光度计的相

关性最高,关中地区气溶胶光学厚度整体呈现东高西低的趋势,高值中心位于西安、咸阳和渭南等地,在西安、咸阳地区气溶胶光学厚度春季最大、秋季最小。下一步将利用多站点的长期连续地基观测和多种卫星观测进行相互对比和验证。

致谢 感谢 NASA 提供的 MODIS 资料。

参 考 文 献

- [1] Mao J T, Zhang J H, Wang M H. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.
毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- [2] Shi G Y, Wang B, Zhang H, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.
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.
- [3] Zhang H, Huang J P. Interpretation of the IPCC fifth assessment report on anthropogenic and natural radiative forcing [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 40-44.
张华, 黄建平. 对 IPCC 第五次评估报告关于人为和

- 自然辐射强迫的解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 40-44.
- [4] Zhang X Y, Liao H, Wang F J. The effects of aerosols and clouds on climate change and their responses[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2014, 10(1): 37-39.
张小曳, 廖宏, 王芬娟. 对 IPCC 第五次评估报告气溶胶-云对气候变化影响与响应结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 37-39.
- [5] Yao Y B, Wang Y R, Li Y H, *et al.* Climate warming and drying and its environmental effects in the Loess Plateau[J]. *Resources Science*, 2005, 27(5): 146-152.
姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 146-152.
- [6] Xia X A, Wang P C, Chen H B, *et al.* Ground-based remote sensing of aerosol optical properties over north China in spring [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(4): 429-437.
夏祥鳌, 王普才, 陈洪滨, 等. 中国北方地区春季气溶胶光学特性地基遥感研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(4): 429-437.
- [7] Takamura T, Sugimoto N, Shimizu A, *et al.* Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the atmospheric Brown cloud east Asian regional experiment 2005 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D22): D22S36.
- [8] Che H, Shi G, Uchiyama A, *et al.* Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(12): 3199-3214.
- [9] Mao J T, Li C C, Zhang J H, *et al.* The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observations [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(s1): 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(s1): 127-135.
- [10] Li C C, Mao J T, Liu Q H, *et al.* Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19): 2094-2100.
李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2094-2100.
- [11] Tan H B, Wu D, Deng X J, *et al.* Observation of aerosol optical depth over the pearl river delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(6): 1146-1155.
谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶光学厚度的观测研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1146-1155.
- [12] Hu D, Zhang L, Sha S, *et al.* Contrast and application of MODIS aerosol products over the arid and semiarid region in northwest China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(4): 677-683.
胡蝶, 张镭, 沙莎, 等. 西北地区 MODIS 气溶胶产品的对比应用分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 677-683.
- [13] Liu B M, Ma Y Y, Gong W, *et al.* Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and sun photometer under different conditions over central China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10066.
- [14] Zhang M, Ma Y Y, Gong W, *et al.* Aerosol optical properties and radiative effects: assessment of urban aerosols in central China using 10-year observations [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 182: 275-285.
- [15] Zhou C Y, Liu Q H, Tang Y, *et al.* Comparison between MODIS aerosol product C004 and C005 and evaluation of their applicability in the north of China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(5): 854-872.
周春艳, 柳钦火, 唐勇, 等. MODIS 气溶胶 C004、C005 产品的对比分析及其在中国北方地区的适用性评价[J]. 遥感学报, 2009, 13(5): 854-872.
- [16] Sayer A M, Munchak L A, Hsu N C, *et al.* MODIS Collection 6 aerosol products: comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and "merged" data sets, and usage recommendations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(24): 13965-13989.
- [17] Che H Z, Qi B, Zhao H J, *et al.* Aerosol optical properties and instantaneous radiative forcing based on high temporospatial resolution CARSNET ground-based measurements over eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2017: 1-42.
- [18] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11): 2989-3034.
- [19] Xie Y, Zhang Y, Xiong X X, *et al.* Validation of MODIS aerosol optical depth product over China using CARSNET measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(33): 5970-5978.
- [20] Takamura T, Nakajima T. Overview of SKYNET and its activities [J]. *Óptica Pura Y Aplicada*, 2004, 37(3): 3303-3308.

- [21] Khatri P, Takamura T, Yamazaki A, *et al.* Use of 315 nm channel data of the sky radiometer to estimate the columnar ozone concentration: a preliminary study[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2014, 92A: 185-194.
- [22] Campanelli M, Nakajima T, Khatri P, *et al.* Retrieval of characteristic parameters for water vapour transmittance in the development of ground-based sun-sky radiometric measurements of columnar water vapour [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(4): 1075-1087.
- [23] Uchiyama A, Yamazaki A, Kudo R, *et al.* Continuous ground-based observation of aerosol optical properties at Tsukuba, Japan: trend and climatology[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II, 2014, 92A: 93-108.
- [24] Barnes W L, Xiong X, Salomonson V V. Status of Terra MODIS and Aqua MODIS [J]. Advances in Space Research, 2003, 32(11): 2099-2106.
- [25] Xiong X X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(1): 69-79.
- [26] Justice C O, Townshend J R G, Vermote E F, *et al.* An overview of MODIS land data processing and product status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 3-15.
- [27] Wang Z, Peng Y, Che H Z, *et al.* Analyses on spatial and temporal characteristics of AOD in Guanzhong region of Shaanxi province using long term MODIS data [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 234-242.
- 王钊, 彭艳, 车慧正, 等. 近 10 年关中盆地 MODIS 气溶胶的时空变化特征 [J]. 高原气象, 2013, 32(1): 234-242.