

吴序鹏, 杨军, 车慧正, 等. 2012. 塔克拉玛干沙漠地区气溶胶光学厚度卫星遥感产品验证 [J]. 气候与环境研究, 17 (2): 149–159, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10089. Wu Xupeng, Yang Jun, Che Huizheng, et al. 2012. Verification for the satellite remote sensing products of aerosol optical depth in Taklimakan desert area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (2): 149–159.

塔克拉玛干沙漠地区气溶胶光学厚度卫星遥感产品验证

吴序鹏^{1,2} 杨军¹ 车慧正³ 李晓静⁴ 夏祥鳌²

1 南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

3 中国气象局大气成分观测与服务中心, 北京 100081

4 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘 要 基于塔克拉玛干沙漠地区地基太阳光度计数据, 系统验证 2007~2008 年星载多角度成像光谱仪 (MISR)、中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和臭氧监测仪 (OMI) 气溶胶反演产品, 旨在定量评估这些产品在我国沙漠地区的气溶胶光学厚度 (AOD) 反演精度。结果表明: MODIS/AOD 的相关系数在 4 种产品中最高 (0.91), OMI/AOD 次之 (0.87), 其次为 MISR/AOD (0.84), OMI/UVAI 相关系数偏低 (0.51)。MISR/AOD 均方根误差 (0.14) 和平均偏差 (−0.06) 在 4 种反演产品中最低。与地基观测相比, MISR/AOD、MODIS/AOD 系统偏低, OMI/AOD、OMI/UVAI 系统偏高。在相同比较条件下 (地基观测气溶胶光学厚度值限定在 2.0 以内), MISR 的均方根误差和平均偏差在 4 种反演产品中最低, 且相关系数也较高 (0.84)。尽管存在诸多不同, 但 3 种探测器气溶胶反演产品均能较好地展示该地区的气溶胶季节变化。塔克拉玛干沙漠春、夏季 AOD 较大, 秋、冬季 AOD 相对较小。Ångström 波长指数的结果表明, 春季 (3~5 月) 最小 (均值为 0.11), 夏季 (6~8 月) 次之, 秋季 (9~11 月) 和冬季 (12 月至次年 2 月) 较大 (均值达到 0.61), 这表明在春、夏季气溶胶粒子偏大, 秋、冬季气溶胶粒子偏小。此外, 通过研究 2000~2010 年 AOD 年际变化表明, 由于塔克拉玛干沙漠地区属于沙尘源区, 气溶胶类型较为单一, 所以总体来说, 变化趋势不是较为明显。从反演结果来看, 2003 年的气溶胶含量为此 10 年中最高, 年均值达到 0.32; 2005 年的气溶胶含量在这 10 年中最低, 年均值为 0.28。

关键词 沙尘气溶胶 遥感 气溶胶光学厚度

文章编号 1006-9585 (2012) 02-0149-11 **中图分类号** P407.5 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10089

Verification for the Satellite Remote Sensing Products of Aerosol Optical Depth in Taklimakan Desert Area

WU Xupeng^{1,2}, YANG Jun¹, CHE Huizheng³, LI Xiaojing⁴, and XIA Xiang'ao²

1 Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2010-07-06 收到, 2012-12-31 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-Y2-QN201, 国家科技支撑计划项目 2008BAC40B01, 国家自然科学基金项目 40805011、40775009, 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金 2010Z002、2008Y002

作者简介 吴序鹏, 男, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气物理学与大气环境方面的研究。E-mail: wxp343110@sina.com

3 *Centre for Atmosphere Watch and Services, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

4 *Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellite, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract Using ground-based Aerosol Optical Depth (AOD) data at Tazhong, Taklimakan desert area, four sets of satellite aerosol data, from the Multi-angle Imaging Spectrometer (MISR), the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), and the Ozone Monitoring Instrument (OMI) from 2007 to 2008 were validated. The results show that satellite aerosol retrievals are significantly correlated with the ground-based ones. The correlation coefficient for MODIS/AOD is the largest (0.91), followed by OMI/AOD (0.87), MISR/AOD (0.84), and OMI/UVAI (0.51). MISR/AOD root-mean-square error (0.14) and the average deviation (-0.06) are the lowest in the four products. MISR/AOD and MODIS/AOD is relatively less than the ground-based AOD, however, OMI/AOD and OMI/UVAI exceeds the ground-based ones. Under the same conditions (ground-based AOD is limited to less than 2.0), the root-mean-square error and the standard deviation of MISR is the lowest. Seasonal variation of aerosol is captured by satellite data. AOD is relatively larger in spring and summer and is relatively lower in autumn and winter. The result of Ångström wavelength exponent shows that the spring has the minimum (0.11), followed by summer and autumn, and winter has the maximum (0.61), which shows that the aerosol particle is larger in spring and summer while it is smaller in autumn and winter. Besides, Taklimakan desert area belongs to the sand source where aerosol type is single. In summary, the annual variability tendency of AOD from 2000 to 2010 is not obvious. The result of the retrieval shows that there is the maximal aerosol content in 2003 during the decade and the annual average is up to 0.32, while there is the minimal aerosol content in 2005 and the annual average is 0.28.

Key words sand dust aerosol, remote sensing, aerosol optical depth

1 引言

气溶胶时空分布的不确定性及其物理、化学特性的多变性,加上观测资料的严重缺乏,使得气溶胶成为当今环境与气候变化研究中一个既重要又难以估计的不确定因子(王明星, 2000; 王明星和张仁健, 2001; 谭浩波等, 2006)。气溶胶在全球气候变化、区域环境中起着举足轻重的作用(Charlson et al., 1992),特别是气候变化研究方面,气溶胶的辐射特性被认为是十分重要的关键因子(杨军等, 1999; 李成才等, 2004, 2005)。

近年来,我国沙尘活动频繁发生,对区域环境和气候产生了严重影响(吴兑, 2003; 黄蔚薇等, 2007)。沙尘气溶胶会影响局地能见度及空气质量,给人民的生活带来不便,财产造成损失;而且就大的空间、时间尺度而言,是对对流层气溶胶的一个重要来源,对地气系统接受太阳辐射的影响不容忽视,由于近年来频发的沙尘天气而引起的太阳辐射强迫作用对气候已造成了一定的影响(孔丹等, 2008)。

为了加深气溶胶理化特征、光学特性和辐射特性不确定性的科学理解水平,国内外开展了大量的地基和卫星遥感研究。地基观测是气溶胶研究的基础,它可以直接获得气溶胶粒子的各种物理、化学以及辐射特性,被认为是最准确的气溶胶研究手段(邓学良, 2008)。当前国际上建立了多个全球气溶胶光学厚度观测网络,美国的气溶胶自动观测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)(Holben et al., 2001)、日本的气溶胶/辐射观测网络(Aerosol/Radiation Observation Network, SKYNET)(Uchiyama et al., 2005)、加拿大的太阳光度计网络(Canadian Sun-Photometer Network, AEROCAN)(Bokoye et al., 2001)、澳大利亚的气溶胶地基网络(Aerosol Ground Station Network, AGSNet)(Qin and Mitchell, 2009)、世界气象组织的全球大气观测计划(Global Atmosphere Watch Programme, GAW)(WMO and Global Atmosphere Watch, 2003)等。2001年春季亚洲气溶胶特性实验期间,中美合作在中国北方建立了4个临时AERONET站点,2002年4月以来,陆续有数十个AERONET站点在中国大陆建立(柳晶, 2008)。

2002 年, 中国气象局着手建设中国气溶胶观测光学特性监测网络 CARSNET, 已在中国不同地区建立了近 30 个太阳光度计站点 (Che et al., 2009)。2004 年 6 月中国科学院大气物理研究所在中国科学院生态研究网络平台上建立了手动太阳光度计观测系统 (The Chinese Sun Hazemeter Network, CSHNET), Xin et al. (2007) 利用 CSHNET 气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 与 Ångström 波长指数资料, 研究了中国部分地区的大气气溶胶光学特性, 指出这些资料较好地描述了这些地区的大气气溶胶光学特性的时空分布特征。

另一方面, 气溶胶卫星遥感在近年来也有了很大发展。卫星遥感弥补了一般地基观测难以反映气溶胶的空间具体分布和变化趋向的不足。但与此同时, 卫星遥感对于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 (李晓静等, 2003), 它需要有地基观测进行验证评估。

塔克拉玛干沙漠位于塔里木盆地中部, 是我国最大、沙丘类型最复杂的沙漠, 面积为 $33.76 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占中国沙漠总面积的 47%, 是世界上面积占第二位的流动性沙漠, 其地表覆盖物少, 典型的亮地表地区, 是我国沙尘暴和沙尘气溶胶的主要源地之一。

塔中气象观测站 (39.00°N , 83.40°E , 1099.3 m) 位于塔克拉玛干沙漠中心, 是中国气溶胶观测网络 CARSNET 的观测站点之一, 该站是目前我国唯一深入流动沙漠腹地 200 km 以上的观测实验站。本文将基于塔中站地基太阳光度计 AOD 观测资料, 系统验证星载多角度成像光谱仪 (Multi-angle Imaging Spectrometer, MISR)、中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS) 和臭氧监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 气溶胶反演产品, 旨在定量评估这三套反演产品质量, 并系统分析该地区 AOD 季节和年际变化特征。

2 数据

塔中气象观测站采用的太阳光度计为法国 CIMEL 公司 8 波段 CE318 极化太阳光度计, 该仪器能够高精度测量野外太阳和天空辐射, 包括 440

nm、670 nm、870 nm 和 1020 nm 4 个气溶胶波段, 936 nm 水汽波段, 以及 870 nm 3 个偏振波段, 各通道的带宽为 10 nm。利用测得的直接太阳辐射数据可以反演大气透过率、消光光学厚度、气溶胶光学厚度、大气水汽柱总量, 天空扫描数据则可以反演大气气溶胶尺度谱及气溶胶相函数等气溶胶参数。

MISR 是 1999 年 12 月美国国家宇航局发射的第一颗地球观测卫星 Terra 上搭载的 5 个探测器之一, 能够在全球范围内甚至复杂地形表面情况下, 提供中等分辨率的气溶胶总量和成分的反演资料。MISR 可从 9 个方向、分 4 个波段观测地球, 以便进行月、季及长周期的变化监测。9 个角度分别为 0° 、 $\pm 26.1^\circ$ 、 $\pm 45.6^\circ$ 、 $\pm 60.0^\circ$ 和 $\pm 70.5^\circ$, 4 个波段分布在可见光到近红外光谱范围内, 其中心波长分别为 446 nm、558 nm、672 nm 及 867 nm。由于 MISR 从 9 个不同角度观测地球, 因此能获取丰富的地表反射信息, 而且其气溶胶算法采用非均匀地表方法, 不依赖于地表反射率的假设。该算法充分利用 MISR 多角度、多波段的观测资料, 基于地表反射空间对比度, 用经验正交函数形式描述地表反射率, 选择合适的气溶胶模型反演出气溶胶光学厚度 (Diner et al., 2005)。

Aqua 卫星是法国和美国合作的卫星列车 (A-Train) 中的重要成员, 发射于 2002 年 5 月。MODIS 是 Aqua 卫星上的重要设备之一, 每天覆盖全球一次, 可提供在可见光、近红外和红外共 36 个通道的全球观测, 为反演有关陆地、云、气溶胶、水汽、臭氧、海色、浮游植物、生物地球化学等产品提供了丰富的信息。MODIS 扫描宽度 2330 km, 分 4 个波段观测地球, 中心波长分别为 412 nm、470 nm、550 nm、660 nm。早期 Terra 卫星上搭载的 MODIS 不提供亮地表地区的数据, Hsu et al. (2006) 基于蓝光通道地表反射率相对较暗, 提出了 AOD 深蓝反演算法, 在一段时间间隔内选取卫星观测的最低反射率时段, 确定该时间段内地表反射率, 并基于气溶胶模型和化学输送模式模拟的气溶胶廓线, 根据卫星表观反射率观测, 建立查找表, 实现气溶胶光学厚度反演 (Ginoux et al., 2010), 与 MODIS 暗地表算法相结合, 从而获得全球 AOD 分布, Aqua 卫星的数据产品提供了此算法的反演结果。

OMI 是紫外和可见光波段 (270~500 nm) 的高分辨率光谱仪, 是美国国家航天局于 2004 年 7 月 15 日发射的 Aura 卫星上携带的 4 个传感器之一, 是继全球 O₃ 监测实验和扫描成像大气吸收光谱仪之后的新一代大气成分探测传感器, 其波段范围为 270~500 nm, 光谱分辨率约为 0.5 nm, 空间分辨率为 24 km×13 km, 视场大小为 114°, 相应的地面扫描幅宽为 2600 km。OMI 具有较高的空间分辨率和每日一次全球覆盖的优势, 而且首次提供每日 O₃ 和其他污染物的全球测量结果 (王跃启等, 2009)。OMI 气溶胶近紫外算法 (The OMI near-UV aerosol Algorithm, OMAERUV) 主要利用 354 nm 和 388 nm 两个波段卫星观测的反射辐射对气溶胶吸收非常敏感, 提取气溶胶信息。OMAERUV 产品包括气溶胶紫外吸收指数 (Ultraviolet Radiation Aerosol Index, UVAI), AOD, 气溶胶吸收光学厚度 (Aerosol Absorption Optical Depth, AAOD)。OMI 反演产品算法考虑了 3 种气溶胶类型——沙尘气溶胶、与生物燃烧有关的含碳气溶胶、弱吸收的硫酸盐气溶胶, 通过改变模型中的单次散射反照率, 最终形成 21 种气溶胶微物理模型, 然后利用预设定的地表反照率, 假定气溶胶模型, 进行 AOD 的反演 (Satheesh et al., 2009)。

3 卫星遥感数据验证

本文中采用地基与卫星遥感资料的匹配标准选取为: 时间上对应于卫星遥感观测时间前后半小时的地基遥感资料进行平均, 且地基观测数据至少为 2 个; 空间上对应于地面站点 50 km 范围内的遥感产品, 卫星采样点至少为 2 个。此外, 卫星与地面匹配的样本数必须多于 4 个。为与卫星 AOD 产品进行比较, 对地面 AOD 数据进行插值 (Ångström, 1929), 以得到和星载辐射计观测波长匹配的 AOD:

$$\tau_{\lambda,\alpha} = \beta \times \lambda^{-\alpha},$$

其中, $\tau_{\lambda,\alpha}$ 为波长为 λ 的 AOD; α 为 Ångström 波长指数; β 为 Ångström 大气浑浊度系数。选用观测资料中 440 nm、670 nm、870 nm 和 1020 nm 拟合得到方程中两个参数, 基于此计算得到 388 nm、550 nm、558 nm 波段 AOD。

从整体对比结果来看, MODIS 深蓝算法产品的相关系数在 4 种产品中是最高的, 达到 0.91 (图 1a), OMI 的光学厚度产品次之, 为 0.87 (图 1b), 其次是 MISR 光学厚度产品, 为 0.84 (图 1c), OMI 的 UVAI 产品相关系数偏低, 仅为 0.60 (图 1d)。MISR/AOD 均方根误差 (0.14), 平均偏差 (−0.06), 在 4 种产品中最低。与地基观测相比, MISR/AOD、MODIS/AOD 系统偏低, OMI/AOD、OMI/UVAI 系统偏高。

由于上述对比中星地 AOD 匹配数据不一, 如 MISR 对比结果, 地基 AOD 均小于 1.0, 而 MODIS 和 OMI 对比中有较多 AOD 超过 1.0。为了消除此因素的影响, 更好地对比不同星载仪器 AOD 精度, 以下将通过限定 AOD 范围 (地基观测 AOD 小于 2.0), 确保是在相对比较相似的条件对比分析这 4 种卫星 AOD 产品。由图 2 可以看出, MISR 的均方根误差 (0.14) 与平均偏差 (−0.06) 在 4 种反演产品中最低, 且相关系数 (0.84) 也较高, 因此在下节中将使用 MISR/AOD 分析塔克拉玛干沙漠 AOD 时空分布特征。MODIS 的均方根误差为 0.27, 平均偏差为 −0.20, 小于 OMI/AOD 产品, 而 OMI/UVAI 产品的均方根误差为 0.74, 平均偏差为 0.59, 显得较大。

Ahn et al. (2008) 也通过研究发现, 在沙漠地区, OMI 的反演结果和 MODIS、MISR 反演结果相比会高一些。导致这种偏差的原因可能是由于 OMI 算法中对地面反照率进行了过高的估计, 辐射校准误差或者是这两者的结合, 视场中残留云的影响也不可忽略。

由图 1 和图 2 可以看出, 与地基观测相比, MODIS/AOD 系统偏低。MODIS 反演结果误差主要来源于: 1) MODIS 表观反射率观测误差; 2) MODIS 视场内残留云的影响; 3) 地表反射率估计误差; 4) 气溶胶模式设定误差 (相函数和单次散射反照率) (夏祥鳌, 2006)。误差来源 1~3 在气溶胶光学厚度比较小的情况下起到主导作用, 而在气溶胶光学厚度比较高的情况下, 气溶胶模式误差将占主导地位。塔克拉玛干沙漠地区由于为沙源地, 气溶胶光学厚度相对较高, 所以在此地区, 观测误差、残留云的影响、地表反射率估计误差应该属于次要误差, 而气溶胶模式误差应为主要误差所在。此外, Remer et al. (2005) 指

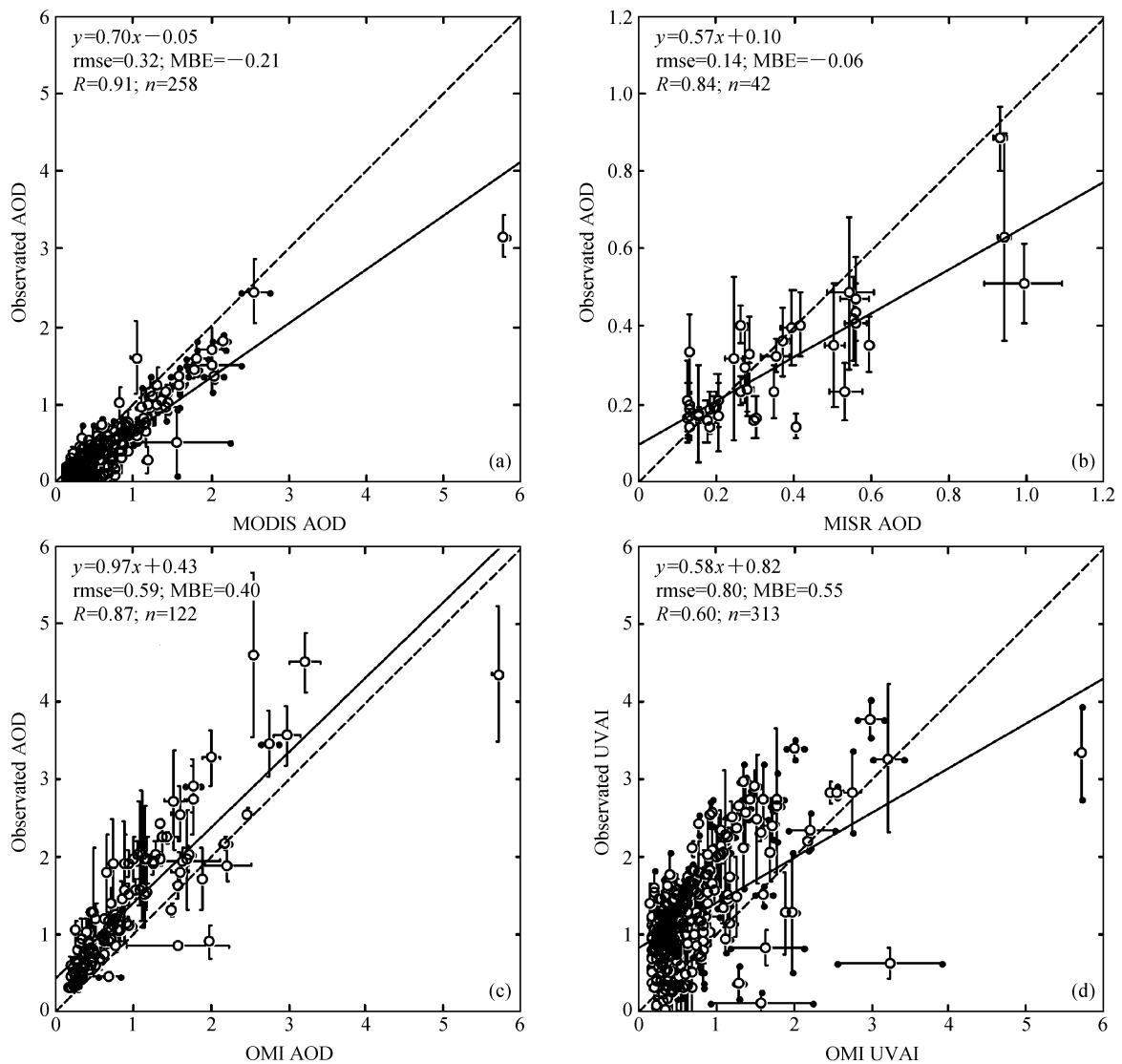


图1 地基观测数据与 (a) MODIS/AOD、(b) MISR/AOD、(c) OMI/AOD、(d) OMI/UVAI 散点图 (MBE 为平均偏差)

Fig. 1 The scatter diagrams of ground observations and (a) MODIS/AOD, (b) MISR/AOD, (c) OMI/AOD, and (d) OMI/UVAI (MBE denotes average deviation)

出 MODIS 卫星数据中 550 nm 波段数据并不是卫星直接探测反演所得,而是由 470 nm 和 660 nm 数据经过插值所得,这种插值方法根据气溶胶类型的不同,会产生 0~10% 的偏差,但是对于混合的或粗粒子而言,产生的偏差是最小的;同时,由于沙尘气溶胶粒子属于非球型粒子,这样也会引起反演值的不确定性。

与地基观测相比, MISR/AOD 同样系统偏低。影响 MISR 反演结果的主要因素包括: MISR 传感器观测误差、气溶胶特性设定的误差。柳晶 (2008) 经过研究发现, MISR 气溶胶反演算法适

用于亮地表,当 AOD 值较小时, MISR 反演结果比较准确;在我国东部,当 AOD 较大时, MISR/AOD 偏低,这可能与 MISR 算法中气溶胶的吸收设置偏低有关。

与地基观测相比, OMI/AOD、OMI/UVAI 系统偏高。影响 OMI 反演结果最重要的 3 个因素 (Torres et al., 2007) 为: 1) 视场中残留云的干扰; 2) 地表反射率的错误估计; 3) 气溶胶廓线的假设。在 4 种产品的比较中, OMI/UVAI 效果较差的原因是因为其对气溶胶层高度极其敏感 (Christopher et al., 2008)。OMI/UVAI 与气溶

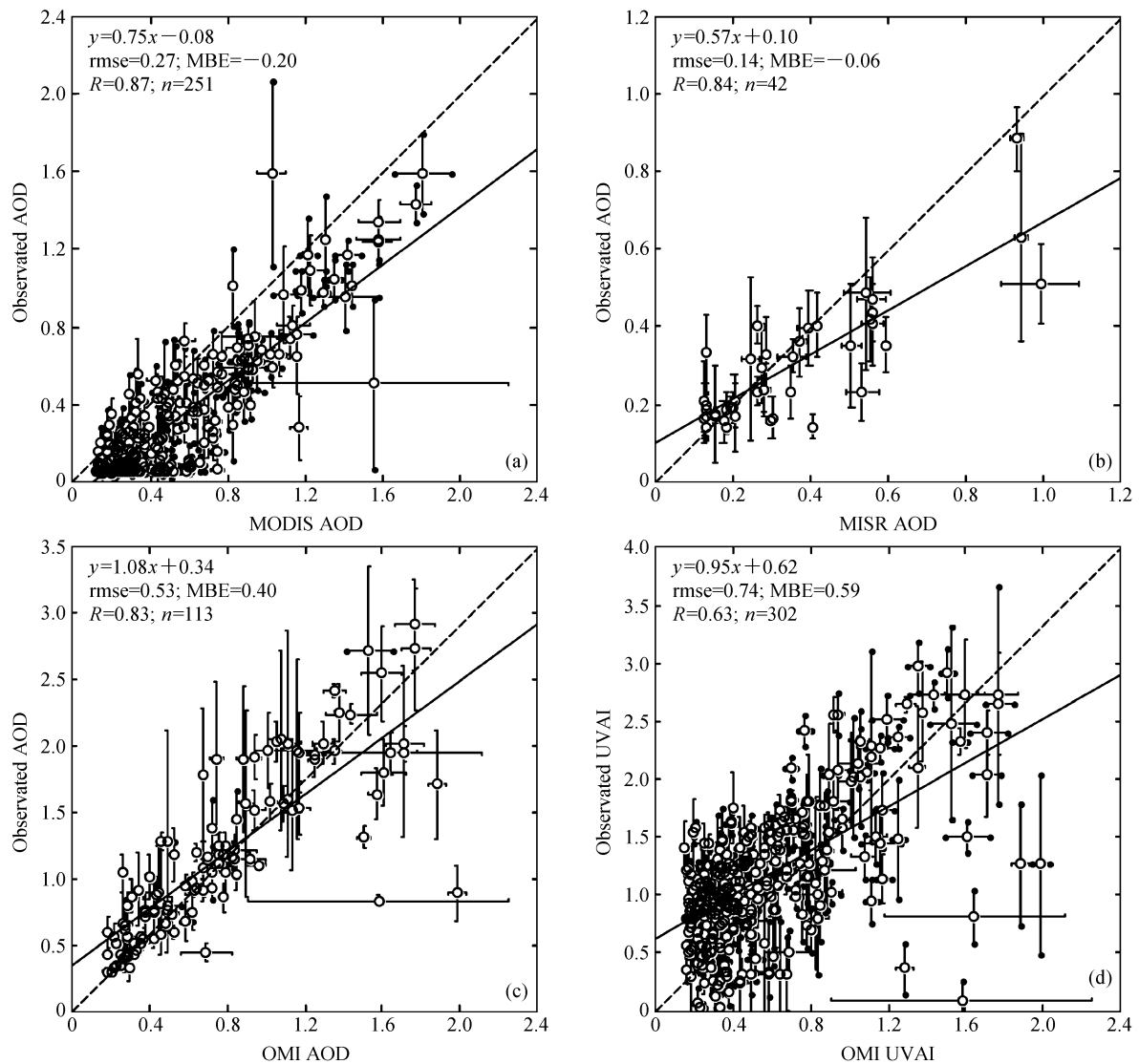


图2 地基观测数据与 (a) MODIS/AOD、(b) MISR/AOD、(c) OMI/AOD、(d) OMI/UVAI 线性相关分析 (地基观测气溶胶光学厚度值限定在 2.0 以内)

Fig. 2 Linear correlation analysis between ground observations and (a) MODIS/AOD, (b) MISR/AOD, (c) OMI/AOD, and (d) OMI/UVAI (aerosol optical depth of ground-based observations was limited to less than 2.0)

胶高度几乎成线性关系,它对低于 1~2 km 的边界层气溶胶不敏感,随着气溶胶层高度的增加,OMI/UVAI 也随着增加。除此之外,OMI/UVAI 还对气溶胶单次散射反照率相当敏感 (Torres et al., 2007)。

4 气溶胶光学厚度日变化和季节变化特征

图 3 给出的是 2007、2008 年地基观测的

AOD (440 nm) 观测数据,以及 Ångström 波长指数的日平均特征。图 4 是 2007~2008 年 MISR 在春、夏、秋、冬季的气溶胶光学厚度分布,由于图 4 中有些地方没有数据覆盖,为了更好地了解空间分布的置信度,图 5 进行了样本数空间分布的统计。结果表明,春季 (3~5 月) 的气溶胶光学厚度出现全年间的最大值 (均值达到 1.0)。其次是夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月)、冬季 (12 月至次年 2 月) 气溶胶光学厚度值较小 (均值为 0.31)。这与延昊等 (2006) 对塔克拉玛干沙漠

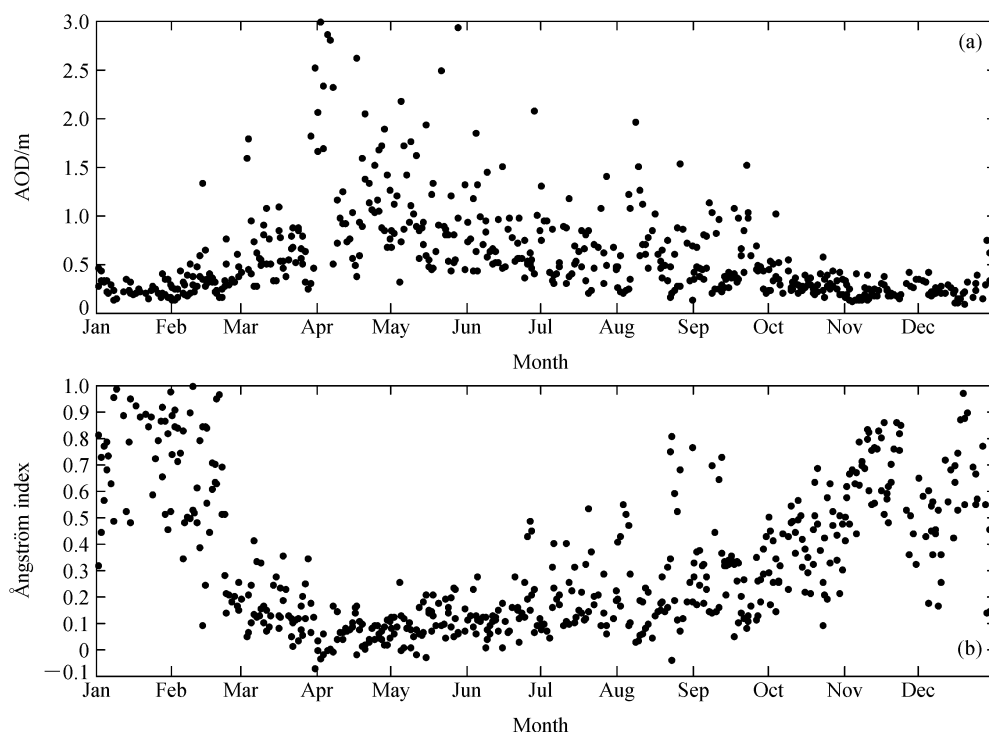


图3 2007、2008年地基440 nm (a) 气溶胶光学厚度和 (b) Ångström指数

Fig. 3 Ground observation data of (a) aerosol optical depth (AOD) and (b) Ångström exponent at 440 nm in 2007 and 2008

中心的沙尘气溶胶研究结果较为一致。组瑞平等(2005)研究指出,在塔克拉玛干沙漠地区,平均风速春、夏季最大,秋季次之,冬季最小,这种情况的出现主要与沙漠内部及周边不同下垫面导致的热力性质差异有关。在炎热的夏季,沙漠内部成为巨大的热源,与边缘地区形成较大的温度梯度,导致周边风系向沙漠腹地汇聚,在此过程中风力也会逐步增强,从而使沙漠内部出现了“风热同步”现象。所以,从大风的季节性来看,在地表具有极丰富的流动沙尘物质的塔克拉玛干沙漠,春、夏季沙丘移动最快,浮尘、沙尘暴天气出现频率较高,沙尘天气的出现,必然导致大气中气溶胶数量的增加,从而使得气溶胶光学厚度在春、夏季较大,秋、冬季较小。

Ångström波长指数的结果表明,春季最小(均值为0.11),夏季次之,秋、冬季较大(均值达到0.61)。这表明在春、夏季气溶胶粒子偏大,秋、冬季气溶胶粒子则偏小,原因是春、夏季发生的沙尘暴产生大量的沙尘大粒子,而秋、冬季由于沙尘天气较少,从而气溶胶粒子平均半径低于春、夏季。图3中对应于AOD高值区的 α 接近

0,甚至小于0,这表明在沙尘活动期间,大气气溶胶呈现出中性甚至反常消光特征(夏祥鳌等,2005)。

5 气溶胶的年际变化特征

图6给出了2000~2010年MISR气溶胶光学厚度年变化趋势和月距平变化趋势。由于塔克拉玛干沙漠地区属于沙尘源区,气溶胶类型较为单一,所以总体来说,变化趋势不是较为明显。从反演结果来看,2003年的气溶胶含量在这10年中最高,年均值达到0.32,2005年的气溶胶含量在这10年中最低,年均值为0.28。塔克拉玛干沙漠地区气候干燥,起沙风速较小,一般为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (陈渭南等,1995),气溶胶光学厚度年变化趋势可能与该地区风速情况存在很大的关系。

6 结论和讨论

本文利用2007~2008年塔克拉玛干沙漠地区地基太阳光度计观测的气溶胶光学厚度数据,系

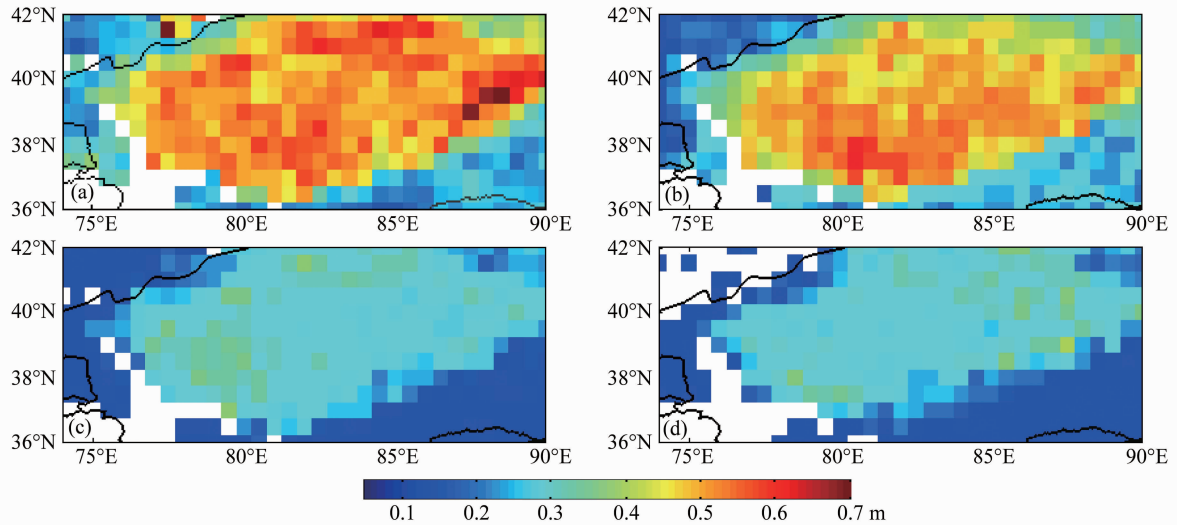


图4 2007、2008年MISR在(a)春季、(b)夏季、(c)秋季、(d)冬季的气溶胶光学厚度分布

Fig. 4 Distributions of MISR/AOD in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter in 2007 and 2008

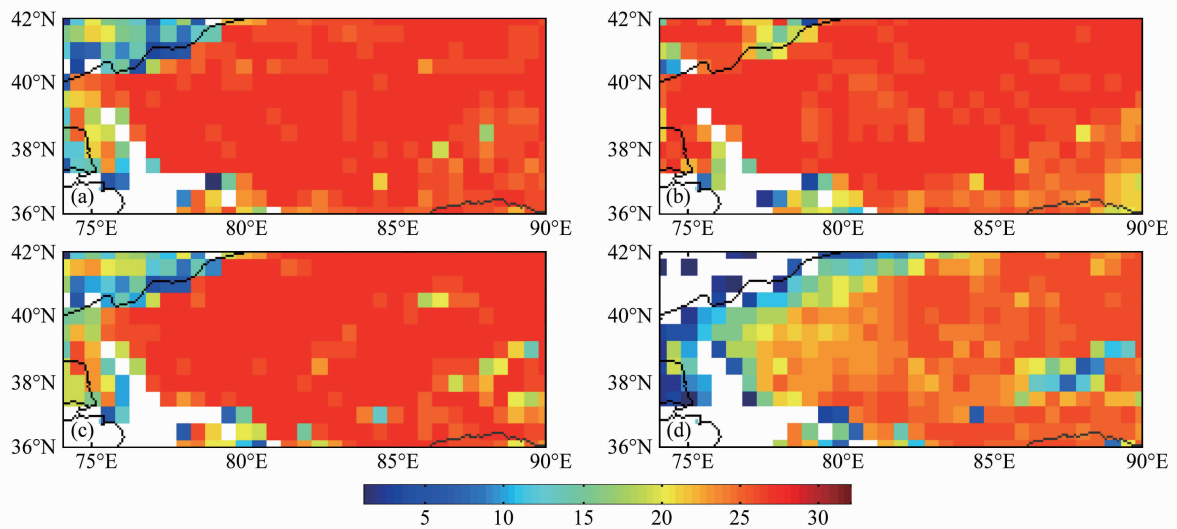


图5 同图4, 但为气溶胶光学厚度样本数

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the sample numbers of AOD

统验证了4套气溶胶卫星遥感产品, 比较各卫星在沙漠地区反演气溶胶光学厚度的优缺点, 并指出这几种卫星产品在我国沙漠地区的反演误差可能原因。结果表明:

(1) MODIS/AOD相关系数在4种反演产品中最高, OMI/AOD次之, 其次是MISR/AOD, OMI/UVAI相关系数则相对偏低, MISR/AOD均方根误差与平均偏差在4种产品中最低。除此之外, 与地基观测相比, MISR/AOD与MODIS/AOD均系统偏低, OMI/AOD与OMI/UVAI均

系统偏高。在相同比较条件下(地基观测气溶胶光学厚度值限定在2.0以内), MISR/AOD均方根误差、平均偏差在4种反演产品中最低, 且相关系数较高。

(2) 春季(3~5月)的气溶胶光学厚度出现全年间的最大值, 其次是夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12月至次年2月)气溶胶光学厚度值较小。在春、夏季气溶胶粒子偏大, 秋、冬季气溶胶粒子则偏小。

(3) 2003年的气溶胶含量在这10年中最高,

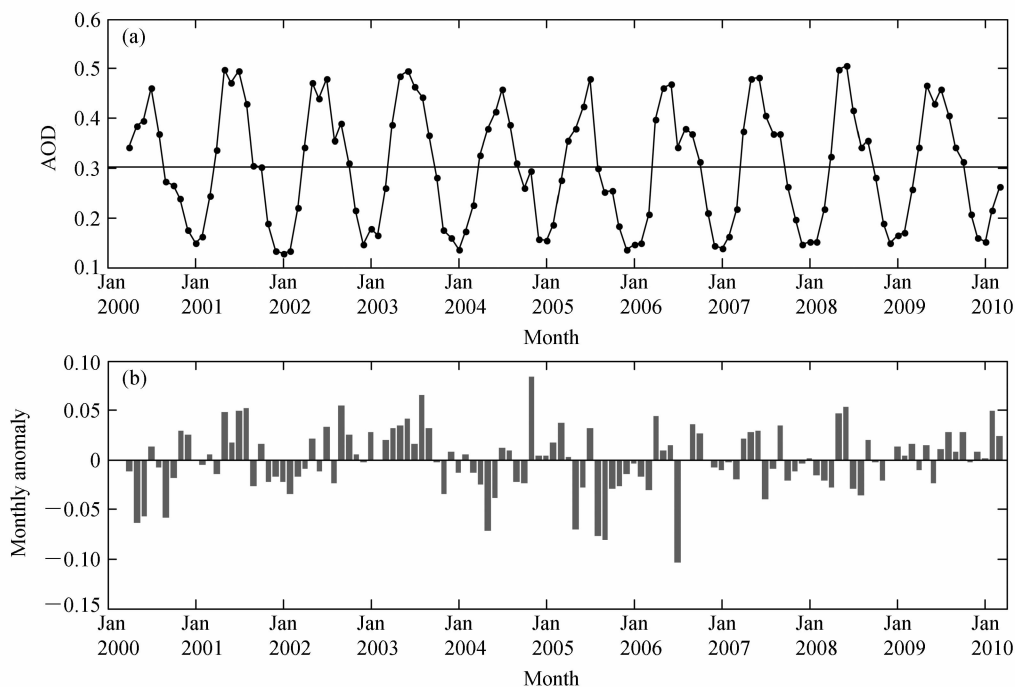


图 6 2000~2010 年 MISR 气溶胶光学厚度 (a) 年变化趋势和 (b) 月距平变化趋势

Fig. 6 Trends of (a) annual change and (b) monthly anomaly change of MISR/AOD during 2000–2010

年均值达到 0.32, 2005 年的气溶胶含量在这 10 年中最低, 年均值为 0.28。

卫星遥感气溶胶光学厚度与地面观测之间还存在着一定偏差, 今后应该结合包括地面观测在内的多种观测手段, 对卫星遥感结果进行配合检验, 促使卫星遥感不断改进算法, 促进产品质量的不断提高, 更好的研究气溶胶的特性。新近发射的 Calipso 卫星和 Cloudsat 卫星提供了气溶胶和云特性廓线信息, 这些信息将有助于提高气溶胶光学特性被动遥感。

致谢 感谢 NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center (ASDC) 提供的高质量数据。

参考文献 (References)

- Ahn C, Torres O, Bhartia P K. 2008. Comparison of ozone monitoring instrument UV aerosol products with aqua/moderate resolution imaging spectroradiometer and multiangle imaging spectroradiometer observations in 2006 [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D16S27, doi: 10.1029/2007JD008832.
- Ångström A. 1929. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air [J]. *Geografiska Annaler*, 11: 156–166.

- Bokoye A I, Royer A, O'Neill N T, et al. 2001. Characterization of atmospheric aerosols across Canada from a ground-based sun-photometer network; AEROCAN [J]. *Atmos. – Ocean*, 39 (4): 429–456.
- Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al. 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. *Science*, 255 (5043): 423–430.
- Che Huizheng, Zhang Xiaoye, Chen Hongbin, et al. 2009. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China Aerosol Remote Sensing Network [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D03206, doi: 10.1029/2008JD011030.
- 陈渭南, 董治宝, 杨佐涛, 等. 1995. 塔克拉玛干沙漠的起沙风速 [J]. *地理学报*, 50 (4): 360–367.
- Chen Weinan, Dong Zhibao, Yang Zuotao, et al. 1995. Threshold velocities of sand-driving wind in the Taklimakan desert [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 50 (4): 360–367.
- Christopher S A, Gupta P, Haywood J, et al. 2008. Aerosol optical thicknesses over North Africa: 1. Development of a product for model validation using Ozone Monitoring Instrument, Multiangle Imaging Spectroradiometer, and Aerosol Robotic Network [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D00C04, doi: 10.1029/2007JD009446.
- Diner D J, Martonchik J V, Kahn R A, et al. 2005. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land [J]. *Remote Sens. Environ.*, 94 (2): 155–171.
- 邓学良. 2008. 卫星遥感中国海域气溶胶光学特性及其辐射强迫研

- 究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 131. Deng Xueliang. 2008. Study on aerosol optical characteristics and aerosol radiative forcing by remote sensing over the China [D]. Ph.D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 131.
- Ginoux P, Garbuzov D, Hsu N C. 2010. Identification of anthropogenic and natural dust sources using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) deep blue level 2 data [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D05204, doi: 10.1029/2009JD012398.
- 黄蔚薇, 杨军, 凌士兵, 等. 2007. 沙尘气溶胶粒子表面变性对云滴形成过程的影响 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (2): 210 - 215. Huang Weiwei, Yang Jun, Ling Shibing, et al. 2007. Effects of the heterogeneous-phase chemical processes on mineral aerosols on the growth of cloud droplets [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 30 (2): 210 - 215.
- Holben B N, Tanr D, Smirnov A, et al. 2001. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (12): 67 - 97.
- Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. 2006. Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (11): 3180 - 3195.
- 孔丹, 何清, 张瑞军, 等. 2008. 塔克拉玛干沙漠腹地春季一次沙尘暴沙尘气溶胶的辐射特征 [J]. *干旱气象*, 26 (2): 36 - 40. Kong Dan, He Qing, Zhang Ruijun, et al. 2008. Analysis on radiation forcing of dust aerosol in a spring typical dust storm event in the centre of Takla Makan desert [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 26 (2): 36 - 40.
- 李成才, 刘启汉, 毛节泰, 等. 2004. 利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染 [J]. *应用气象学报*, 15 (6): 641 - 650. Li Chengcai, Lau Kaihon, Mao Jietai, et al. 2004. An aerosol pollution episode in Hong Kong with remote sensing products of MODIS and Lidar [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (6): 641 - 650.
- 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 2005. 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*, 29 (3): 632 - 639. Li Chengcai, Mao Jietai, Lau Kaihon. 2005. Remote sensing of high spatial resolution aerosol optical depth with MODIS data over Hong Kong [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (3): 632 - 639.
- 李晓静, 刘玉洁, 邱红, 等. 2003. 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*, 61 (5): 580 - 591. Li Xiaojing, Liu Yujie, Qiu Hong, et al. 2003. Retrieval method for optical thickness of aerosols over Beijing and its vicinity by using the MODIS data [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (5): 580 - 591.
- 柳晶. 2008. 中国地区气溶胶光学特性及辐射强迫的卫星遥感观测研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 132. Liu Jing. 2008. Aerosol optical properties and its radiative effects based on satellite observations in China [D]. Ph.D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 132.
- Qin Y, Mitchell R M. 2009. Characterisation of episodic aerosol types over the Australian continent [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9 (6): 1943 - 1956, doi: 10.5194/acp-9-1943-2009.
- Remer L A, Kaufman Y J, Tanr D, et al. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (4): 947 - 973.
- Satheesh S K, Torres O, Remer L A, et al. 2009. Improved assessment of aerosol absorption using OMI-MODIS joint retrieval [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D05209, doi: 10.1029/2008JD011024.
- 谭浩波, 吴兑, 毕雪岩. 2006. 南海北部气溶胶光学厚度观测研究 [J]. *热带海洋学报*, 25 (5): 21 - 25. Tan Haobo, Wu Dui, Bi Xueyan. 2006. Measurement and study of aerosol optical depth over northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 25 (5): 21 - 25.
- Torres O, Tanskanen A, Veihelmann B, et al. 2007. Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D24S47, doi: 10.1029/2007JD008809.
- Uchiyama A, Yamazaki A, Togawa H, et al. 2005. Characteristics of aeolian dust observed by sky-radiometer in the Intensive Observation Period 1 (IOP1) [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83A: 291 - 305.
- 王明星. 2000. 气溶胶与气候 [J]. *气候与环境研究*, 5 (1): 1 - 5. Wang Mingxing. 2000. Aerosol in relation to climate change [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (1): 1 - 5.
- 王明星, 张仁健. 2001. 大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. *气候与环境研究*, 6 (1): 119 - 124. Wang Mingxing, Zhang Renjian. 2003. Frontier of atmospheric aerosols researches [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (1): 119 - 124.
- 王跃启, 江洪, 张秀英, 等. 2009. 基于 OMI 卫星遥感数据的中国对流层 NO₂ 时空分布 [J]. *环境科学研究*, 22 (8): 932 - 937. Wang Yueqi, Jiang Hong, Zhang Xiuying, et al. 2009. Temporal spatial distribution of tropospheric NO₂ in China using OMI satellite remote sensing data [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 22 (8): 932 - 937.
- World Meteorological Organization, Global Atmosphere Watch. 2003. Aerosol measurement procedures guidelines and recommendations [R]. WMO/GAW, Report NO.153.
- 吴兑. 2003. 华南气溶胶研究的回顾与展望 [J]. *热带气象学报*, 19 (增刊): 145 - 151. Wu Dui. 2003. A review and outlook on the aerosol study over South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 19 (Suppl.): 145 - 151.
- 夏祥鳌. 2006. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高 [J]. *科学通报*, 51 (19): 2297 - 2303. Xia Xiang'ao. 2006. Significant overestimation of global aerosol optical thickness by MODIS over land [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 51

(19): 2297–2303.

夏祥鳌, 王普才, 陈洪滨, 等. 2005. 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, 9 (4): 429–437. Xia Xiang'ao, Wang Pucui, Chen Hongbin, et al. 2005. Ground-based remote sensing of aerosol optical properties over North China in spring [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 9 (4): 429–437.

Xin Jinyuan, Wang Yuesi, Li Zhanqing, et al. 2007. Aerosol optical depth (AOD) and Ångström exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August 2004 to September 2005 [J]. J. Geophys. Res., 112: D05203, doi: 10.1029/2006JD007075.

延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 2006. 塔克拉玛干沙漠中心的沙尘气溶胶观测研究 [J]. 中国沙漠, 26 (3): 389–393. Yan Hao,

Jiao Meiyao, Bi Baogui, et al. 2006. Observation on sand-dust aerosol in center of Taklimakan desert [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 26 (3): 389–393.

杨军, 李子华, 黄世鸿. 1999. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响 [J]. 大气科学, 23 (2): 239–247. Yang Jun, Li Zihua, Huang Shihong. 1999. Influence of relative humidity on shortwave radiative properties of atmospheric aerosol particles [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 23 (2): 239–247.

俎瑞平, 张克存, 屈建军. 2005. 塔克拉玛干沙漠风沙活动强度特征 [J]. 地理研究, 24 (5): 699–707. Zu Ruiping, Zhang Kexun, Qu Jianjun. 2005. The intensity of sand-drift activities in Taklimakan desert [J]. Geographical Research (in Chinese), 24 (5): 389–393.