张鹏，王春姣，陈林，等，2018. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题[J]. 气象，44(6)：725-736.

沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题*

张 鹏[1,2] 王春姣[1] 陈 林[2] 白文广[2] 漆成莉[2] 齐 瑾[2]

1 中国气象科学研究院，北京 100081

2 国家卫星气象中心，北京 100081

提 要： 沙尘暴是全球干旱、半干旱地区特有的一种灾害性天气，所产生的沙尘气溶胶是全球气溶胶系统重要组成部分，对全球环境、天气、气候和生态有复杂的影响。沙尘气溶胶作为一种吸收性气溶胶，对太阳辐射有着较强的吸收，还能通过加热大气、改变大气稳定度、蒸发云滴、减少云量等“半直接方式”影响气候。卫星遥感对沙尘气溶胶的监测具有独特的优势，是全球沙尘研究的重要手段。本文系统整理和介绍了目前常用的可见近红外、热红外、被动微波、紫外和主动激光测量等五类卫星遥感沙尘气溶胶的主要方法，在总结典型遥感仪器和主要产品基础上，讨论了遥感产品的定量精度和地面验证问题，结合辐射传输理论模拟了可见近红外和热红外的卫星观测，探讨了可见近红外遥感的地表反照率影响和热红外高光谱遥感的波段选择问题，最后对未来的一些研究重点进行了展望。

关键词： 沙尘气溶胶，卫星遥感，地表反照率，热红外高光谱

中图分类号： P405 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.001

Current Status of Satellite-Based Dust Aerosol Remote Sensing and Some Issues to Be Concerned

ZHANG Peng[1,2] WANG Chunjiao[1] CHEN Lin[2] BAI Wenguang[2] QI Chengli[2] QI Jin[2]

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Dust storm is a typical weather disaster which outbreaks in arid and semi-arid areas globally. The dust aerosol generated from dust storm dominates the aerosol loading in the troposphere and has comprehensive impacts on the global environment, weather, climate and ecology. As a kind of absorbing aerosol, dust aerosol has strong absorption on the incoming solar radiation. Dust aerosol can affect the climate through the semi-direct effect, such as heating the atmosphere, changing the atmospheric stability, evaporating the cloud droplet and reducing the cloud amount. Satellite remote sensing has showed special priority on dust monitoring and has become an indispensable way for dust aerosol study. The main satellite-based dust aerosol remote sensing methods are summarized in this paper as the visible-infrared method, thermal infrared method, microwave method, ultraviolet method and active lidar-based method. In addition, typical instruments and products are introduced, and the accuracy of products and the validation by ground-based remote sensing network are discussed. Based on the radiation transfer theory, the visible-infrared and thermal infrared radiance observed by satellite are simulated. Moreover, the effect of surface albedo and the channel selection issue are discussed for the visible remote sensing and thermal infrared

* 国家自然科学基金面上项目(41475031)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506074)共同资助

2018 年 2 月 8 日收稿； 2018 年 3 月 25 日收修定稿

第一作者：张鹏，主要从事卫星遥感大气及应用研究. Email：zhangp@cma.gov.cn

hyperspectral remote sensing separately. Finally, some prospects in the future study for the satellite-based dust aerosol remote sensing are presented.

Key words: dust aerosol, satellite-based remote sensing, surface albedo, thermal infrared hyper-spectrum

引 言

沙尘气溶胶是大气气溶胶重要的组成部分，会占对流层气溶胶总量的一半以上。沙尘气溶胶源自沙尘天气的起沙、输送过程，全球范围主要有中亚、北美、中非及澳大利亚等四大沙尘天气频发区。我国北方地区是中亚沙尘源区的一部分，是沙尘暴的多发地，几乎每年春季都会有不同强度沙尘天气的发生(Pye，1987；周自江和章国材，2003)。

沙尘对天气、气候和环境的影响广泛，例如沙尘气溶胶通过“直接效应”“间接效应”“半直接效应”等影响大气动力过程和地气系统能量收支平衡(Kaufman et al，2001；Sokolik，2002；Huang et al，2006；2010；Wang et al，2008；石广玉等，2008；Shao et al，2011；张天航等，2016)，沙尘气溶胶影响全球物质循环和生态环境(Jickells et al，2005；Kaufman et al，2005；Maher et al，2010；Muhs，2013；Chen et al，2017)等。

对沙尘发生区域和强度的准确监测是有效预警和预报沙尘灾害及研究沙尘气候环境效应的首要问题之一，卫星遥感覆盖范围大，观测频次稳定，逐渐成为全球监测沙尘气溶胶特征的有效手段。正是基于此，对沙尘暴和沙尘气溶胶的卫星遥感研究从20世纪80年代开始持续受到国内外学者们的关注，从未间断(石广玉和赵思雄，2003；曾庆存等，2007)。

20世纪70年代中期，国际上已经尝试应用卫星遥感手段来进行沙尘气溶胶的监测，只是受到卫星观测波长和通道的限制，方法比较简单。Shenk and Curran(1974)，Norton et al(1980)很早就应用静止卫星的可见光和红外数据监测出水面上空的沙尘气溶胶，并估算了其光学厚度。Ackerman(1989)利用卫星数据提取沙尘信息，较早地提出了沙尘定量识别的思路，并论证了应用卫星光谱资料进行沙尘气溶胶光学厚度反演的可行性与研究潜力。由于单一通道对沙尘、地表和云目标的探测数值比较接近，使用单一通道数据判识这些信息有很大的局限性。90年代后，卫星遥感沙尘突破了只利用单通道信息的局限，多通道遥感数据对沙尘进行监测的研究逐渐发展起来。应用卫星的多通道信息可以较好地获得沙尘、地表和云在反照率和温度上存在的差异，有效判识沙尘暴发生区域(方宗义等，2001；范一大等，2002)。

2000年前后，随着一系列对地观测计划的实施，微波遥感、红外高光谱遥感、光学主动遥感技术陆续投入应用，卫星遥感沙尘气溶胶在监测手段、参数类别和定量精度等方面均有很大程度的改进和提高，从早期的沙尘区域识别、到半定量强度计算、再到对沙尘光学参数和沙尘高度的定量反演等方面不断深入进步，取得了相当丰富的成果(Chen et al，2014)。任何单一的遥感手段获取的沙尘气溶胶信息存在明显的差异和局限，不能够全面反映沙尘目标物的特征，随着全球沙尘起沙和输送研究的深入，特别是数值模拟技术的发展，综合利用多源遥感数据进行沙尘监测成为新的发展方向(Li et al，2015；Zhao et al，2015；Mamouri et al，2016；El-Askary et al，2015；Madhavan et al，2017)。

本文系统整理和介绍了目前常用的可见近红外、热红外、被动微波、紫外和主动激光测量等五类卫星遥感沙尘气溶胶的主要方法，在总结典型遥感仪器和主要产品基础上，讨论了遥感产品的定量精度和地面验证问题，结合辐射传输理论模拟了可见近红外和热红外的卫星观测，探讨了可见近红外遥感的地表反照率影响、热红外高光谱遥感的波段选择问题，最后对未来的一些研究重点进行了展望。

1 沙尘气溶胶卫星遥感的主要方法

卫星遥感监测沙尘气溶胶的方法在发展过程中经不断改进和创新，逐渐形成了被动遥感和主动遥感两类不同的监测方法。星载被动遥感利用太阳或地气系统等自然辐射源来反演所需的大气参量，沙尘的被动遥感方法主要分为可见近红外VIR方法(Kaufman et al，2001)、热红外TIR方法(Zhang

et al, 2006)、微波极化指数 MPI 法(Huang et al, 2007),以及紫外吸收气溶胶指数 AAI 方法(De Graaf et al, 2005)等。主动遥感使用人为方式产生的辐射源(如激光雷达等),通过接收后向散射信号,从中识别沙尘层的存在并获得沙尘层高度和厚度信息(Vaughan et al,2009)。

1.1　可见近红外遥感

可见近红外通道是遥感卫星的经典通道,也是最早用于沙尘遥感判识的通道。目前最成熟和广泛使用的沙尘气溶胶定量遥感方法源自 1999 年发射的美国 EOS/MODIS 遥感仪器的陆地上空气溶胶反演方法,即所谓的"暗像元法"(Kaufman et al, 1997),主要原理是利用浓密植被在红光和蓝光波段对地表反射率比较低且易于确定的特点,去除来自地表的贡献,从而获得大气程辐射,经过水汽吸收和分子瑞利散射订正,可以得到气溶胶的光学厚度(AOD)。如果利用两个以上通道,还可以得到两个波长上的 AOD 比值,即 Angstrom 指数(α 指数)。AOD 表征大气气溶胶的浓度,α 指数表征气溶胶粒子的大小,α 指数越小,粒子尺度越大。背景大气 AOD 很低(小于 0.1),当大气中有沙尘发生时,AOD 主要源自沙尘气溶胶的贡献,用公式可以简化表示如下:

$$\tau_a = \left[R(\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0) - \frac{\pi I_S \mathrm{e}^{-\tau_1/\mu}}{\mu_0 F_0}\right]\times \frac{4\pi\mu\mu_0}{\omega P(\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0)} - \tau_m - \tau_g \quad (1)$$

式中,τ_a 即为沙尘气溶胶的 AOD;$R(\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0)$为大气顶表观反射率,即卫星测量值;$\left[R(\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0) - \frac{\pi I_s \mathrm{e}^{-\tau_1/\mu}}{\mu_0 F_0}\right]$为大气程辐射对应的表观反射率;$\omega$ 和 $P(\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0)$分别为沙尘气溶胶的单次散射反照率和散射相函数,由沙尘气溶胶的物理化学组成确定;τ_m 是分子瑞利散射引起的光学厚度,τ_g 是大气气体吸收引起的光学厚度;(μ,φ)是卫星观测天顶角余弦和方位角,(μ_0,φ_0)是太阳入射天顶角余弦和方位角。

该方法适用于浓密植被覆盖、湖面、海洋上空等暗表面地区。Hsu et al(2006)发现在高地表反射率地区,红(0.66 μm)、蓝(0.47 μm)和中红外波段地表反射率的线性关系不成立,通过在红光和蓝光波段 AOD 对天顶辐亮度有显著的贡献,提出了基于地表反射率库的深蓝算法(Deep Blue),相较于暗像元算法,它能够对高地表反射率地区的气溶胶光学厚度进行有效反演。

在分析沙尘粒子与云等其他粒子不同的发射和散射特性的基础上,国内外学者们发展出一系列应用可见近红外方法监测陆上沙尘信息的反演方法,包括阈值判别法、最佳波段组合指数法等(肖继东等,2007;Hutchison et al,2008),能有效识别沙尘、云和地表等不同地物特征。近年的研究中,Zhao (2012)开发了一种沙尘监测方案,这一方案基于可见光通道反射率(或辐射率)或红外通道亮温(BT)的分析,通过所选通道的反射率和亮温差异大小来推断沙尘粒子的特征。

应用可见近红外(VIR)技术可以对水面和陆地暗背景上空的沙尘进行有效的监测,它的精度误差主要来自于表面反射率的影响。一般而言,沙尘发生源区的下垫面为高反射率的沙漠等地区,使得利用 VIR 技术定量遥感沙尘产生相当大的误差。而且沙尘发生时,常常伴随有云的出现,VIR 技术无法穿透云层,不能观测到云下的沙尘情况。

1.2　热红外遥感

早在 20 世纪 70 年代,国外学者就在沙尘的红外特性方面展开了研究。Shenk and Curran (1974)通过对 THIR(temperature humidity infrared radiometer)卫星数据的分析,研究了 THIR 在观测沙尘和卷云目标的光谱通道亮温差异,提出了利用红外波段区分沙尘、云和晴空的方法。Legrand et al (1992)尝试使用卫星红外数据对沙尘参数进行反演,用中尺度边界层模型正向模拟了撒哈拉地区沙尘气溶胶的影响,结合 Meteosat 沙尘影像,确定了卫星对各物理变化响应的敏感度,并建立了可用来表征沙尘强度信息的红外沙尘差值指数(infrared difference dust index, IDDI),为之后的红外反演沙尘参数研究提供了参考和思路。胡秀清等(2007)总结了沙尘气溶胶在红外分裂窗通道表现出的两个特征,基于沙尘多通道光谱聚类法,开发了针对静止气象卫星监测沙尘的业务算法,获取了沙尘暴监测和红外沙尘差值指数产品。此后,基于 IDDI 值算法和不同地区沙尘气溶胶的特征,用来描述沙尘强度

的沙尘指数法被不断改进且更加适应于不同的地理区域特征(Klüser and Schepanski, 2009; Good et al,2012;Di et al,2016;曹广真等,2016),极大地提高了沙尘气溶胶卫星遥感的监测精度,应用这些方法能够对沙尘进行高精度的定性及半定量分析。

为了能够在高亮陆地表面定量反演沙尘气溶胶参数,Zhang et al(2006)发展了考虑沙尘云微物理特征的红外大气辐射传输计算模型,研究了沙尘气溶胶光学厚度、粒子有效半径变化对 MODIS 8.5、11 和 12 μm 波段亮温的影响,发现 11 μm 通道的亮温同沙尘大气的光学厚度存在较强的线性关系,11 μm 与 12 μm 通道的亮温差同沙尘粒子的等效半径间也存在较强的线性关系。在此基础上建立了沙尘气溶胶反演的查找表,可以定量遥感沙尘气溶胶的 AOD 和粒子有效半径 r_e。

基于 TIR 技术定量遥感沙尘参数的主要误差来自地表温度、大气温度廓线和地表比辐射率的不确定性(张鹏等,2007),而这些因素都是空间分布的慢变函数,对 TIR 技术定量遥感沙尘的影响相对较小。因此,在卫星定量遥感沙尘气溶胶的研究中,TIR 技术尤其是高光谱 TIR 技术拥有比较大的优势和研究潜力。此外,TIR 技术不受白天和夜间观测条件的限制,可以有效监测夜间沙尘范围。

1.3 被动微波遥感

可见光和红外技术虽然能够有效监测沙尘信息,但无法穿透冰云,不能有效监测云下沙尘。研究学者们通过分析沙尘对微波辐射的影响,提出了利用微波技术识别部分云下沙尘区域的新方法。

Huang et al(2007)通过对发生在我国塔克拉玛干和内蒙古等地区的多次沙尘暴天气进行微波数据分析,应用卫星微波扫描辐射计 Aqua/AMSR-E 与微波辐射传输模式对沙尘进行观测和模拟。对沙尘的微波辐射传输进行敏感性分析的结果表明,沙尘发生时在小于 36.5 GHz 的低频波段亮温值大于晴空,但在高频波段由于沙尘对微波的散射、吸收作用大于向外的辐射,沙尘目标亮温值比晴空的小,证明了沙尘情况下对高频微波会有明显的削减影响,并有较弱的去极化作用。基于这种影响,定义了一种新的极化亮温差(microwave polarized index, MPI)指数,用于监测沙尘,即:

$$\begin{aligned} MPI &= 89\ \mathrm{GHz}(V) - 89\ \mathrm{GHz}(H) - \\ &\quad 23.8\ \mathrm{GHz}(V) + 23.8\ \mathrm{GHz}(H) \\ &= \Delta T_{b89\ \mathrm{GHz}} - \Delta T_{b23.8\ \mathrm{GHz}} \end{aligned} \tag{2}$$

式中用低频和高频亮温差作为微波散射指数,即使用 23.8 和 89 GHz 通道亮温值来研究沙尘对微波的散射效果,可以同时描述沙尘对微波高频的衰减作用和去极化作用。选取了塔克拉玛干沙漠和内蒙古等地区的 6 次典型沙尘个例,统计分析了每次沙尘暴天气中不同区域 MPI 指数的变化范围。Ge et al(2008)也基于此方法,应用 Aqua/AMSR-E 微波辐射计,深入研究了沙尘气溶胶在微波波段的特征,并应用 2003—2006 年发生在塔克拉玛干地区的 8 个沙尘个例对该方法进行了系统的验证。

微波技术可以有效地识别冰云下的沙尘区域,大量试验结果证明 MPI 识别的沙尘区与地面站点记录有沙尘的观测范围较为接近,结合可见与红外技术可以提高沙尘区域的判识精度。然而微波方法目前还不是很成熟,利用微波技术无法有效判识云区的存在,需要依赖于其他数据的辅助信息。此外该方法可能会在一定程度上受下垫面极化特性变化的影响,加之空间分辨率很粗,一般在几十千米以上,因此 MPI 技术在未来的研究过程中仍存在较大的不确定性。

1.4 紫外遥感

沙尘气溶胶作为一种吸收性气溶胶,对太阳辐射有着较强的吸收,还能通过加热大气、改变大气稳定度、蒸发云滴、减少云量等“半直接方式”影响气候。

NASA 的臭氧总量测绘光谱仪(total ozone mapping spectrometer,TOMS)气溶胶指数(aerosol index,AI)表示气溶胶在紫外波段对太阳辐射的吸收程度,用来定性识别气溶胶源和传输类型。早在 1997 年,Herman et al(1997)就曾利用 TOMS 仪器探测的 340 和 380 nm 辐亮度的比值,即 AI 指数,研究了全球区域紫外吸收性气溶胶的分布,以及沙尘源区在内的几个主要源区的气溶胶年际变化。研究发现,沙尘气溶胶对 AI 信号贡献最大,因此 AI 能用来识别沙尘源区。在此基础上,Israelevich et al(2002),Washington et al(2003)都曾应用 TOMS 的 AI 值来识别全球或地区的沙尘源区。

我国学者也较早应用紫外波段遥感对沙尘源区及沙尘气溶胶特性进行过研究。张军华等(2002)研究了利用 TOMS 资料定量遥感沙尘暴的方法,通过对一次沙尘暴过程的研究,得到了沙尘暴发生、发展、强度以及影响范围等特征。高庆先等(2004)通过对 TOMS AI 值分析,揭示了我国北方沙尘气溶胶的时空分布特征和长期演变规律;近些年,也有学者应用 TOMS 和臭氧监测仪(ozone monitoring instrument,OMI)AI 值研究了全球或地区范围紫外吸收性气溶胶的时空变化特征(Li et al,2009;宿兴涛等,2015)。

利用紫外遥感的 AI 可在高亮地表上空对沙尘气溶胶进行反演监测,比较准确地遥感沙尘暴的发生、发展和影响范围,并能定量描述沙尘气溶胶的强度。AI 资料虽然可用于研究紫外吸收性气溶胶的空间分布特征,但是它不能用于吸收性气溶胶的时间趋势分析;且由于地面"噪声"的干扰,TOMS/OMI 传感器对 1 km 高度以下边界层吸收性气溶胶信号不敏感(宿兴涛等,2015);应用紫外遥感方法也无法区分吸收性气溶胶种类,不能对强沙尘气溶胶天气进行定量反演。

1.5　主动激光遥感

目前为止,多数对沙尘气溶胶的垂直分布特征的研究,是基于地基激光雷达研究其单点的沙尘气溶胶垂直廓线,为了更大限度地发挥激光雷达在大气探测中的作用,在成熟的地基激光雷达单点观测的基础上,许多国家都发展了自主的星载大气探测激光雷达技术(卢乃锰等,2016;2017)。激光雷达属于主动遥感手段,优点在于探测距离大,精度高且可以进行连续观测,在进行沙尘气溶胶垂直分布研究方面具有独到的优势(Zhou et al,2012;姜学恭等,2014;郭伟等,2016)。

2009 年,星载激光雷达 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)首次得到了全球范围的气溶胶或云垂直消光廓线的反演结果,较为可靠地给出了全球,尤其是沙漠、戈壁等亮地表地区的气溶胶分层特征(Vaughan et al,2009)。CALIPSO 和 CloudSat 等星载激光雷达的应用,为高空大气气溶胶的研究提供了更多的观测资料,可以直观且有效地判断沙尘垂直分布特征,提高了沙尘气溶胶识别的准确性(白冰等,2016;Lakshmi et al,2017),在空气质量监测和沙尘天气的数值天气预报之中都发挥着重要作用。

激光雷达探测的最大优势在于可以获得沙尘气溶胶的垂直分布廓线。偏振激光雷达可以有效监测沙尘气溶胶和云粒子的形状,从而对沙尘和云粒子进行区分;多波长米散射激光雷达还可以反演沙尘气溶胶尺度谱和有效粒子半径等信息;机载和星载激光雷达则可以获得全球范围的大气气溶胶和云的三维分布空间信息。星载激光雷达探测技术的不足之处是受激光能量的限制,白天的探测高度有限,且在数据反演方法上仍需进一步的改进和研究。

2　沙尘气溶胶卫星遥感的典型产品和地面验证问题

2.1　典型仪器和产品

早期的沙尘气溶胶产品主要为沙尘监测的专题图,即用 0 和 1 表示的有无沙尘的判识二值图,例如日本静止气象卫星葵花 GMS1-5 卫星上的可见红外自旋扫描辐射计 VISSR,从 1978 年 TIROS-N 开始的美国极轨环境卫星 NOAA 系列上的甚高分辨率辐射计 AVHRR 等均有沙尘监测专题图产品。

自 21 世纪初开始,随着美国对地观测卫星中分辨率成像光谱仪 EOS/MODIS、中国新一代极轨气象卫星风云三号可见光红外扫描辐射计 FY-3/VIRR 以及静止气象卫星风云四号静止轨道辐射成像仪 FY-4/AGRI 等新型星载遥感仪器的发射,卫星观测的空间分辨率和定标精度得到极大改进和提高,为定量反演沙尘气溶胶提供了可能,对沙尘气溶胶的遥感监测研究开始由定性和半定量研究向沙尘属性特征参数的定量提取发展,逐渐出现了 AOD、α 指数、IDDI 指数和 r_e 等产品。

近些年,人们认识到应用红外波段,特别是高光谱红外波段研究沙尘气溶胶特性的独特优势,利用高光谱卫星进行沙尘监测的方法也在不断发展,目前利用超高光谱分辨率的 AIRS(atmospheric infrared sounder)观测资料不仅可以反演得到 AOD,还可以反演得到沙尘顶的高度。除此之外,星载激光

雷达在精确测量沙尘气溶胶特性方面也得到了广泛应用，CALIPSO卫星作为迄今为止最为成功的星载大气探测激光雷达卫星，其上搭载的星载激光雷达CALIOP已获取了大量气溶胶的垂直观测廓线数据。沙尘气溶胶卫星遥感典型仪器和产品如表1所示。

表1 沙尘气溶胶典型卫星遥感仪器和产品

Table 1 Typical satellite-based dust aerosol products

遥感仪器	典型产品	遥感方法	空间分辨率	时间分辨率	起止时间/年.月
GMS1-5/VISSR	沙尘监测专题图	可见近红外遥感	1.25 km	逐小时	1977.7至2003.5
NOAA/AVHRR 1-3	沙尘监测专题图	可见近红外遥感	1.1 km	每日一次	1978.10至今
EOS/MODIS	AOD，α指数 IDDI指数，AOD，r_e	(1)可见近红外遥感 (2)热红外遥感	1 km	每日一次	1999.12至今
EOS/AIRS	AOD，沙尘顶高度	热红外遥感(高光谱)	13.5 km(星下点)	每日一次	2002.5至今
EOS/AMSR-E	MPI指数	被动微波遥感	25 km	每日一次	2002.5至今
EOS/OMI	AAI	紫外遥感	14 km×24 km	每日一次	2004.7至今
CALIPSO/CALIOP	AOD，沙尘气溶胶 垂直廓线	主动激光遥感	333 m	每日一次	2006.4至今
FY-3/VIRR	沙尘监测专题图，AOD IDDI指数	(1)可见近红外遥感 (2)热红外遥感	1.1 km	每日一次	2008.5至今
FY-4/AGRI	沙尘监测专题图，AOD IDDI指数	(1)可见近红外遥感 (2)热红外遥感	1和4 km	逐小时	2016.12至今

2.2 地基观测与验证

地基观测是气溶胶研究的基础，不仅在沙尘气溶胶粒子的物理、化学及辐射特性等研究中具有广泛应用，且常常用来对卫星遥感反演结果进行检验与验证。毛节泰等(2002)曾将目前国内开展的地基遥感方法总结为：太阳直接辐射的宽带分光辐射遥感、多波段光度计遥感、根据天空散射亮度分布遥感、全波段太阳直接辐射遥感、华盖计遥感，以及激光雷达遥感等。当前国际上还建立了多个全球气溶胶光学厚度观测网络，积累了大量的数据资料。表2总结了目前国内外具有代表性的气溶胶地基观测网络。各监测网络在世界范围内可以互相弥补观测的空白区域，通过协作组成一个完整的全球气溶胶光学厚度观测网(延昊等，2006)。

表2 国内外具有代表性的气溶胶地基观测网说明

Table 2 Main introduction to representative aerosol observation network in China and abroad

国家或组织	建立时间	名称	简称	基本观测仪器	主要产品
美国	1992年	气溶胶自动观测网 (Aerosol Robotic Network)	AERONET	CIMEL自动太阳光度计 (SPAM)	AOD，α指数，r_e， 粒子复折射率指数
加拿大	1993年	太阳光度计网络 (Canadian Sun-Photometer Network)	AEROCAN	全自动CIMEL型 太阳光度计	AOD，α指数，r_e， 粒子复折射率指数
日本	1997年	气溶胶/辐射观测网 (Aerosol/Radiation Observation Network)	SKYNET	Prede太阳/天空 自动辐射计	AOD，α指数，r_e， 粒子复折射率指数
澳大利亚	1998年	气溶胶地基网络 (Aerosol Ground Station Network)	AGSNet	CIMEL太阳光度计	AOD，α指数，r_e， 粒子复折射率指数
中国	2002年	中国气溶胶观测网	CAeroNet	CIMEL太阳光度计	AOD，α指数，r_e， 粒子复折射率指数

在气溶胶的地基观测网中，AERONET和SKYNET是两大主要的能够进行长期、连续观测气溶胶光学特征的数据网络，在世界各地都设有观测点(Che et al，2008；Chen et al，2016；Kosmopoulos et al，2017)。中国从21世纪初就开始着手搭建自己的气溶胶观测网，在沙尘天气多发的北方地区组建了一个自动化程度较高的沙尘暴天气综合监测网。

目前沙尘气溶胶的地面观测也主要以遥感方法为主，因此星基和地基沙尘气溶胶的产品物理定义

相同或者近似,但是地基遥感由于不受下垫面的影响,所以精度较卫星遥感产品为高。只要对两种数据进行合适的时间和空间匹配,就可以利用地基遥感产品对卫星遥感反演结果进行验证,形成一个“天地一体化”系统,提高了反演结果的准确性。

但是需要特别指出的是,对地基和卫星遥感而言,均需要准确的沙尘气溶胶物理模型,即沙尘气溶胶的粒子谱分布数据和复折射率光谱数据,据此先验值作为输入假定方能在散射计算和大气辐射传输模拟计算的基础上开展沙尘气溶胶的可靠反演。目前,针对国内沙尘源区气溶胶物理特征的观测数据较少,特别是典型的戈壁沙尘气溶胶的复折射率光谱观测数据更是缺乏,应该是未来地面观测需要强化的方面。

3　利用可见近红外遥感数据获取沙尘参数的数值模拟分析和地表反照率影响评估

3.1　可见近红外遥感沙尘的数值模拟分析

可见近红外波段,卫星探测到的受沙尘气溶胶吸收和散射影响的辐射能量主要由三部分组成:(1)表示来自大气的散射太阳光,包含大气气体分子的瑞利(Rayleigh)散射和来自大气气溶胶散射的贡献;(2)是地表与大气间的多次反射后的直接透射辐射;(3)是地表与大气间的多次反射后的漫射透射辐射(图 1)。

根据平面平行大气辐射传输理论,在朗伯体地表,大气反射各向同性假定条件下,可见光波段卫星观测辐亮度可近似表示为(廖国男,1985):

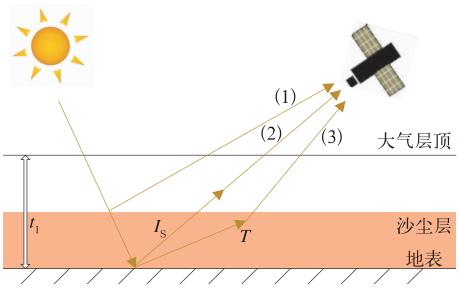


图 1　沙尘气溶胶太阳反射波段辐射传输示意图

Fig. 1　Sketch diagram of radiative transfer of dust aerosol in visible wave band

$$I^*(0;\mu,\varphi)=I(0;\mu,\varphi)+I_s e^{-\tau_1/\mu}+\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^1 T(\mu,\varphi;\mu',\varphi')I_s\mu'\mathrm{d}\mu'\mathrm{d}\varnothing' \tag{3}$$

$$I_s=\frac{r_s}{1-r_s\bar{r}}\frac{\mu_0 F_0}{\pi}\left[\frac{1}{T(\mu_0)}+e^{-\tau_1/\mu}\right] \tag{4}$$

式中,$I^*(0;\mu,\varphi)$表示卫星接收到的大气顶部反射辐射;μ 为卫星视场角余弦值;φ 表示方位角;τ_1 为大气总光学厚度;T 为大气漫射透射函数;I_s 表示向上的漫射辐强度;r_s 为地表反照率;$\bar{r}$ 为平均大气反射比;μ_0 为太阳入射角余弦,F_0 为太阳光谱函数。式(3)中右边第一项为大气反射贡献,第二、第三项分别表示地表与大气多次反射后的直接透射辐射和散射透射部分,与地表反照率密切相关。实际计算中,漫射透射部分作用很小,常忽略不计。

式(3)进一步在单次散射近似条件下,经分子瑞利散射订正后,卫星观测的表观反射率 R 与沙尘气溶胶光学厚度 τ^* 关系可近似表示为(廖国男,1985):

$$R(\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0)=\frac{\pi I^*(0;\mu,\varphi)}{\mu_0 F_0}\approx\tau^*\frac{\omega P(\mu,\varphi;\mu_0,\varphi_0)}{4\pi\mu\mu_0}+\frac{\pi I_s e^{-\tau_1/\mu}}{\mu_0 F_0} \tag{5}$$

式中,右边第一项表示气溶胶单次散射贡献,第二项表示地表反射贡献。由式(5)可见,随着地表反照率的升高,卫星观测表观反照率增大;随着气溶胶光学厚度增大,气溶胶单次散射贡献增强,来自地表反射辐射贡献减弱。因此如何从卫星观测中剔除地表影响是对气溶胶精确遥感的关键。

3.2　地表反照率的影响评估

为定量评估地表反照率的影响,本文利用 6 s 辐射传输模式,模拟得到四种 AOD 浓度条件下 0.47 μm 波长处卫星观测表观反射率与地表反射率的差值随地表发射率的变化关系,结果如图 2 所示。图中设定太阳天顶角为 45°,卫星观测天顶角为 30°,太阳方位角为 98°,卫星方位角为 99°,采用气溶胶类型为沙漠型气溶胶。从图 2 可见,表观反射率与地表反射率的差值随着地表反射率的增加呈线性减小变化,说明卫星观测信号中大气的贡献减小,地表的贡献加大。当地表反射率大于 0.3 后,卫星观测信号以地表的贡献为主,即高亮地表不再适合气溶胶的定量遥感。另外,气溶胶光学厚度越大,差值的线性变化斜率越大,表明暗背景上空,气溶胶浓度越高,气溶胶的反演精度越高。上述结论同Fraser

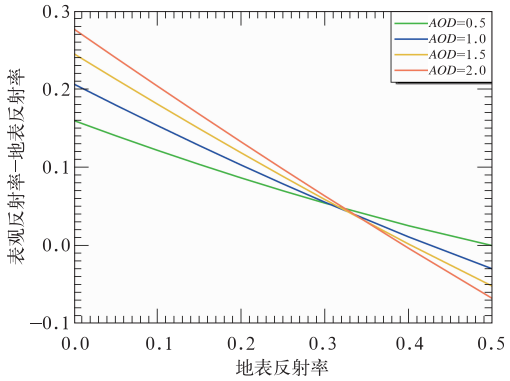


图 2 0.47 μm 处地表反射率对表观反射率的影响

Fig. 2 The variation of apparent reflectivity affected by surface reflectivity at 0.47 μm

and Kaufman(1985)的分析结果类似。

从以上分析可知,利用可见光遥感,能够有效监测海洋上空的沙尘气溶胶(Stowe et al,1997;Norton et al,1980);但对于下垫面类型复杂的地表,需要考虑式(5)中地表反射贡献。当地表反射率大到一定数值时,随着光学厚度的增大,表观反射率变化不大,卫星观测辐射主要来自地表反射贡献,因此本方法难以准确反演陆地上空的沙尘信息,即高亮背景上空气溶胶遥感的难题。

4 利用热红外高光谱遥感数据获取沙尘参数的数值模拟分析和通道选择问题

4.1 热红外高光谱遥感沙尘的数值模拟分析

不考虑沙尘的垂直结构,将沙尘假定为一个等效高度层(图 3),这样卫星观测的大气层顶出射红外辐射可以用式(6)表示如下:

$$I_{\mathrm{TOA}} = I_0 T_{\mathrm{s}} + I_{\mathrm{low}} T_{\mathrm{d}} T_2 + I_{\mathrm{d}} T_2 + I_{\mathrm{upper}} \quad (6)$$

即卫星观测的辐射主要由地表的发射辐射项、等效沙尘层下部大气的发射辐射项、等效沙尘层的发射辐射项,以及等效沙尘层上部大气的发射辐射项共 4 项组成。式(6)中,I_{TOA} 为到达大气层顶的辐射;I_0 为地表发射的辐射;I_{low},I_{d} 和 I_{upper} 分别为下部大气层、等效沙尘层和上部大气层的发射辐射;T_{s} 为整层大气透过率;T_1,T_{d} 和 T_2 分别为下部大气层、等效沙尘层和上部大气层的透过率。

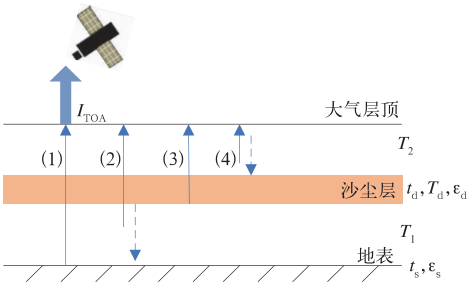


图 3 沙尘气溶胶红外波段辐射传输示意图

Fig. 3 Sketch diagram of infrared radiative transfer of dust aerosol in infrared wave band

式(6)中,下部大气和上部大气的发射辐射项分别包含了上行发射辐射项和下行辐射项的反射两个部分,各层大气的发射辐射项由普朗克函数 $B(t)$ 描述,经过推导最终沙尘大气的辐射传输计算方程可以表示如下:

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{TOA}} = {} & \varepsilon_{\mathrm{s}} B(t_{\mathrm{s}}) T_{\mathrm{s}} + \int_{p_{\mathrm{s}}}^{0} B(t)\mathrm{d}T + \\ & (1-\varepsilon_{\mathrm{s}}) T_{\mathrm{s}} \int_{0}^{p_{\mathrm{s}}} B(t)\mathrm{d}\frac{T_{\mathrm{s}}}{T} + \\ & \varepsilon_{\mathrm{d}} B(t_{\mathrm{d}}) T_2 + (1-\varepsilon_{\mathrm{s}}) \frac{T_{\mathrm{s}}^2}{T_{\mathrm{d}} T_2} \varepsilon_{\mathrm{d}} B(t_{\mathrm{d}}) + \\ & (1-\varepsilon_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{d}}) T_2 \int_{0}^{p_{\mathrm{d}}} B(t)\mathrm{d}\frac{T_2}{T} \end{aligned} \quad (7)$$

式中,ε_{s} 表示地表发射率;t_{s} 表示地表温度;t_{d} 表示沙尘层温度;t 为大气压强 p 处温度;B 为黑体普朗克函数;T 为压强 p 处的大气透过率;ε_{d} 为沙尘层发射率;T_{d} 为沙尘层总透过率,p_{s} 和 p_{d} 分别表示地表与沙尘层压强。式中右边第一项表示地表发射辐射的透射辐射;第二项表示大气上行发射辐射;第三项为大气下行辐射经地表反射的透射辐射;第四项为等效沙尘层向上发射的透射辐射;第五项表示等效沙尘层向下发射经地表反射的透射辐射;第六项为沙尘上部大气下行辐射经沙尘层反射的透射辐射。具体推导过程可参见文献(董超华等,2013)。

4.2 热红外高光谱遥感的通道选择问题

近年来,伴随高光谱分辨率红外探测仪器的开发,如大气红外探测仪 AIRS 和红外大气探测干涉仪(the infrared atmospheric sounding interferometer,IASI),诸多红外探测方法得以更为充分的应用。Pierangelo et al(2004;2005)通过对沙尘气溶

胶光谱特征的敏感性分析,应用 AIRS 高光谱红外数据同时反演得到了大西洋海域上空撒哈拉沙尘层的光学厚度和高度信息,并利用多个红外与近红外通道资料,建立了沙尘粗粒子模型有效半径。此后,利用高光谱红外资料对沙尘气溶胶的红外特性和光学参数的研究受到了更多的重视,国内外的专家学者们也相继提出了很多新的思路和方法,并尝试应用高光谱数据结合其他卫星资料对沙尘层高度进行定量化反演(DeSouza-Machado et al,2006;2010;Peyridieu et al,2010;Yao et al,2012;2015),极大地拓宽了沙尘遥感的研究领域。

图 4 为应用辐射传输模式 RTTOV(Radiative Transfer for TOVS)模拟得到的不同沙尘光学厚度、不同高度条件下的大气顶观测辐射值。其中设定地表温度 289.94 K,地表比辐射率 0.98,采用气溶胶类型为亚洲沙尘类型 ASDU,大气模式均采用 1976 年美国标准大气,模拟光学厚度为波长 10 μm 处光学厚度值。其中不同光学厚度试验中假设沙尘层高度在 3 km,不同高度试验中假设沙尘气溶胶光学厚度为 1(10 μm 处)。图中可见,在窗区 12 μm 波段附近(800～900 cm^{-1})和 4 μm 波段附近(2500～2600 cm^{-1}),随着沙尘气溶胶光学厚度的增大和沙尘气溶胶层在大气中高度位置的升高,亮温值均逐渐减小,可以根据这一特点设计反演算法得到沙尘气溶胶的光学厚度和等效沙尘层的高度。

热红外高光谱遥感通常在 4～15 μm 波段区间分出上千个观测通道,沙尘气溶胶的散射在该区间呈现慢变特点,而沙尘气溶胶吸收除了在紫外存在一个变化较大的硅酸盐吸收谱带外,复折射率虚部逐步增大,但是总体也呈现出慢变的特点(图 5)。因此可以断定,利用热红外高光谱遥感存在大量冗余信息,需要对遥感的通道进行有效信息选择。

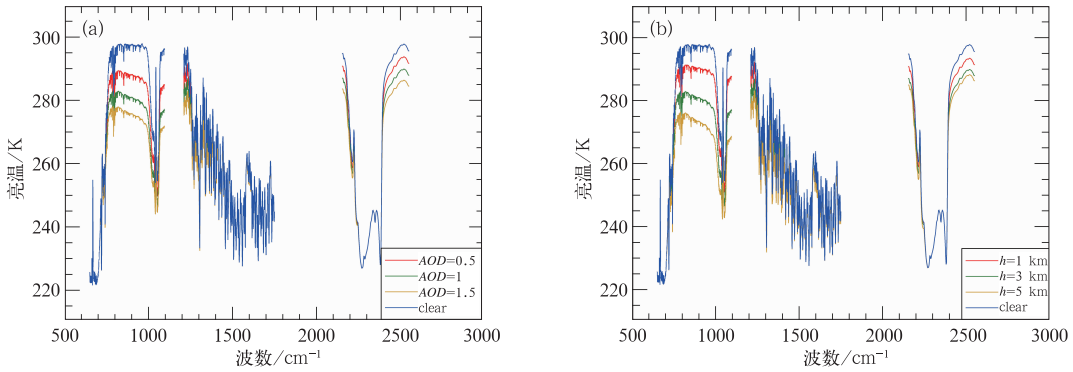


图 4　大气层顶红外波段观测亮温与沙尘光学厚度(a)、高度(b)敏感性分析

Fig. 4　Analysis of brightness temperature, dust optical depth (a) and altitude (b) sensitivity infrared bands in the top of atmosphere

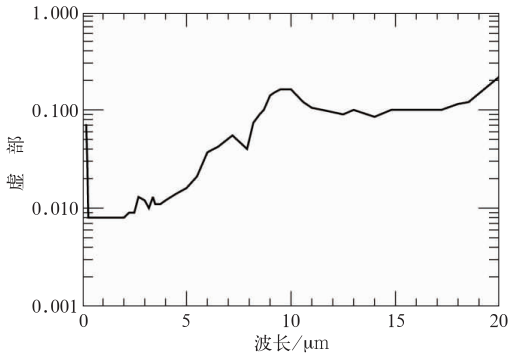


图 5　类沙尘气溶胶的复折射率虚部光谱图

Fig. 5　Imaginary part of complex index for dust-like aerosol

5　结论与展望

通过对不同卫星遥感监测手段的分析,对未来的卫星遥感沙尘气溶胶提出了如下展望:

(1) 本文综合回顾和比较了卫星遥感沙尘气溶胶的主被动方法,一般而言可见近红外方法适合浓度含量不高的沙尘气溶胶的反演,但是高亮地表上空的定量反演一直是该方法无法解决的难题;热红外遥感适用于高浓度含量的沙尘气溶胶的反演,可用于夜间的沙尘遥感,但需要提前获取准确的下垫面温度信息。上述两种方法均只适用于晴空无云大

气的遥感，当沙尘上层有云遮挡时，微波遥感可以获取云下沙尘的信息，但是空间分辨率和定量精度均不高。利用紫外遥感可在高亮地表上空对沙尘气溶胶进行监测，是对吸收性气溶胶遥感的一种有益的补充。层顶高度和垂直廓线分布是沙尘气溶胶的重要参数，最为准确的测量依靠星载的激光雷达探测，如美国的CALIPSO。

（2）对于卫星定量遥感沙尘气溶胶而言，需要准确的沙尘气溶胶物理模型，即沙尘气溶胶的粒子谱分布数据和复折射率光谱数据，据此方能在散射计算和大气辐射传输模拟计算的基础上发展可靠的沙尘气溶胶反演算法。目前，针对国内沙尘源区气溶胶物理特征的观测数据较少，特别是典型的戈壁沙尘气溶胶的复折射率光谱观测数据更是缺乏，应该是未来地面观测需要强化的方面。

（3）近年来，热红外技术凭借其独特的优势，受到了各国专家学者们的重视，特别当大气中沙尘浓度含量增高时，可见和近红外的信号趋于饱和，应用红外辐射可以定量遥感沙尘光学厚度，随着新型星载红外高光谱仪器，如美国的JPSS-1/CrIS和我国的FY-3/HIRAS的投入使用，使得沙尘高度、沙尘粒子有效半径等参数的定量遥感成为可能，因此应用热红外技术定量遥感沙尘的方法仍然有较大的研究空间。

（4）通过建立有效的多源信息融合方法，综合多种遥感数据及已有产品信息，充分分析各种遥感仪器和遥感观测方法的优势及局限，利用主、被动相结合的遥感方式，实现遥感观测彼此之间的优势互补，能够更加全面监测并分析沙尘过程，并通过数据同化技术改进和提高数值模拟沙尘起沙和输送的预报精度。

参考文献

白冰，张强，吕巧谊，等，2016. 一次区域沙尘过程的垂直结构和传输路径分析[J]. 干旱区资源与环境，30(9)：128-133.

曹广真，张鹏，胡秀清，等，2016. 静止与极轨气象卫星监测沙尘的融合算法研究[J]. 气象科技进展，6(1)：116-119.

董超华，李俊，张鹏，等，2013. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用[M]. 北京：科学出版社.

范一大，史培军，王秀山，等，2002. 中国北方典型沙尘暴的遥感分析[J]. 地球科学进展，17(2)：289-294.

方宗义，张运刚，郑新江，等，2001. 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果[J]. 第四纪研究，21(1)：48-55.

高庆先，任阵海，李占青，等，2004. 中国北方沙尘气溶胶时空分布特征及其对地表辐射的影响[J]. 资源科学，26(5)：2-10.

郭伟，卜令兵，贾小芳，等，2016. 基于激光云高仪的北京沙尘气溶胶特征分析[J]. 气象，42(12)：1540-1546.

胡秀清，卢乃锰，张鹏，2007. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴[J]. 应用气象学报，18(3)：266-275.

姜学恭，陈受钧，云静波，2014. 基于CALIPSO资料的沙尘暴过程沙尘垂直结构特征分析[J]. 气象，40(3)：269-279.

廖国男，1985. 大气辐射导论[M]. 周诗健，译. 北京：气象出版社.

卢乃锰，方翔，刘健，等，2017. 气象卫星的云观测[J]. 气象，43(3)：257-267.

卢乃锰，闵敏，董立新，等，2016. 星载大气探测激光雷达发展与展望[J]. 遥感学报，20(1)：1-10.

毛节泰，张军华，王美华，2002. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报，60(5)：625-634.

石广玉，王标，张华，等，2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学，32(4)：826-840.

石广玉，赵思雄，2003. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. 大气科学，27(4)：591-606.

宿兴涛，许丽人，张志标，等，2015. 基于卫星观测的我国北方地区紫外吸收性气溶胶的时空分布研究[J]. 气候与环境研究，20(1)：11-20.

肖继东，汪溪远，陈爱京，2007. 沙尘暴EOS/MODIS卫星遥感监测指数模型[J]. 干旱区研究，24(2)：268-272.

延昊，矫梅燕，毕宝贵，等，2006. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划[J]. 气象科学，26(1)：110-117.

曾庆存，董超华，彭公炳，等，2007. 沙尘暴及相关的自然灾害[J]. 气候与环境研究，12(3)：225-226.

张军华，毛节泰，王美华，2002. 利用TOMS资料遥感沙尘暴的研究[J]. 高原气象，21(5)：457-465.

张鹏，张兴赢，胡秀清，等，2007. 2006年一次沙尘活动的卫星定量遥感和分析研究[J]. 气候与环境研究，12(3)：302-308.

张天航，廖宏，常文渊，等，2016. 基于国际大气化学-气候模式比较计划模式数据评估中国沙尘气溶胶直接辐射强迫[J]. 大气科学，40(6)：1242-1260.

周自江，章国材，2003. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954—2002年)[J]. 科学通报，48(11)：1224-1228.

Ackerman S A，1989. Using the radiative temperature difference at 3.7 and 11 μm to tract dust outbreaks[J]. Remote Sens Environ，27(2)：129-133.

Che Huizheng，Shi G，Uchiyama A，et al 2008. Intercomparison between aerosol optical properties by a PREDE skyradiometer and CIMEL sunphotometer over Beijing，China[J]. Atmos Chem Phys，8(12)：3199-3214.

Chen Bin，Zhang Peng，Zhang Beidou，et al，2014. An overview of passive and active dust detection methods using satellite measurements[J]. J Meteor Res，28(6)：1029-1040.

Chen Hao，Cheng Tianha，Gu Xingfa，et al，2016. Characteristics of aerosols over Beijing and Kanpur derived from the AERONET

dataset[J]. Atmos Pollut Res,7(1):162-169.

Chen Siyu, Huang Jianping, Qian Yun, et al, 2017. An overview of mineral dust modeling over East Asia[J]. J Meteor Res,31(4):633-653.

De Graaf M, Stammes P, Torres O, et al, 2005. Absorbing aerosol index: sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS[J]. J Geophys Res,110(D1):D01201.

DeSouza-Machado S G, Strow L L, Hannon S E, et al, 2006. Infrared dust spectral signatures from AIRS[J]. Geophys Res Lett, 33(3):L03801.

DeSouza-Machado S G, Strow L L, Imbiriba B, et al, 2010. Infrared retrievals of dust using AIRS: comparisons of optical depths and heights derived for a North African dust storm to other collocated EOS A-Train and surface observations[J]. J Geophys Res, 115(D15):D15201.

Di Aojie, Xue Yong, Yang Xihua, et al, 2016. Dust aerosol optical depth retrieval and dust storm detection for Xinjiang region using Indian national satellite observations[J]. Remote Sens, 8(9):702.

El-Askary H, Park S K, Ahn M H, et al, 2015. On the detection and monitoring of the transport of an Asian dust storm using multisensor satellite remote sensing[J]. J Environ Inform, 25(2):99-116.

Fraser R S, Kaufman Y J, 1985. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, GE-23(5):625-633.

Ge Jinming, Huang J, Weng F, et al, 2008. Effects of dust storms on microwave radiation based on satellite observation and model simulation over the Taklamakan desert[J]. Atmos Chem Phys, 8(16):4903-4909.

Good E J, Kong Xin, Embury O, 2012. An infrared desert dust index for the Along-Track Scanning Radiometers[J]. Remote Sens Environ, 116:159-176.

Herman J R, Bhartia P K, Torres O, et al, 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data[J]. J Geophys Res Atmos, 102(D14):16911-16922.

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.

Huang Jianping, Ge Jinming, Weng Fuzhong, 2007. Detection of Asia dust storms using multisensor satellite measurements[J]. Remote Sens Environ, 110(2):186-191.

Huang Jianping, Lin Bing, Minnis P, et al, 2006. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia[J]. Geophys Res Lett, 33(19):L19802.

Huang J, Minnis P, Yan Hongru, et al, 2010. Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements[J]. Atmos Chem Phys, 10(14):6863-6872.

Hutchison K D, Iisager B D, Kopp T J, et al, 2008. Distinguishing aerosols from clouds in global, multispectral satellite data with automated cloud classification algorithms[J]. J Atmos Oceanic Technol, 25(4):501-518.

Israelevich P L, Levin Z, Joseph J H, et al, 2002. Desert aerosol transport in the Mediterranean region as inferred from the TOMS aerosol index[J]. J Geophys Res Atmos, 107(D21):AAC 13-1-AAC 13-13.

Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al, 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate[J]. Science, 308(5718):67-71.

Kaufman Y J, Koren I, Remer L A, 2005. Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean[J]. J Geophys Res, 110(D10):D10S12.

Kaufman Y J, Tanré D, Dubovik O, et al, 2001. Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground-based remote sensing[J]. Geophys Res Lett, 28(8):1479-1482.

Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al, 1997. The MODIS 2.1-μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 35(5):1286-1298.

Klüser L, Schepanski K, 2009. Remote sensing of mineral dust over land with MSG infrared channels: a new Bitemporal Mineral Dust Index[J]. Remote Sens Environ, 113(9):1853-1867.

Kosmopoulos P G, Kazadzis S, Taylor M, et al, 2017. Dust impact on surface solar irradiance assessed with model simulations, satellite observations and ground-based measurements[J]. Atmos Meas Tech, 10(7):2435-2453.

Lakshmi N B, Nair V S, Babu S S, 2017. Vertical structure of aerosols and mineral dust over the Bay of Bengal from multisatellite observations[J]. J Geophys Res Atmos, 122(23):12845-12861.

Legrand M, Cautenet G, Buriez J C, 1992. Thermal impact of Saharan dust over land. Part II: application to satellite IR remote sensing[J]. J Appl Meteor, 31(2):181-193.

Li Jing, Carlson B E, Lacis A A, 2009. A study on the temporal and spatial variability of absorbing aerosols using Total Ozone Mapping Spectrometer and Ozone Monitoring Instrument Aerosol Index data[J]. J Geophys Res, 114(D9):D09213.

Li Rong, Gong Jieping, Sun Wenyi, et al, 2015. Multi-satellite observation of an intense dust event over Southwestern China[J]. Aerosol Air Quality Res, 15(1):263-270.

Madhavan S, Qu J J, Hao Xianjun, 2017. Saharan dust detection using multi-sensor satellite measurements[J]. Heliyon, 3(2):e00241.

Maher B A, Prospero J M, Mackie D, et al, 2010. Global connections between Aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum[J]. Earth Sci Rev, 99(1-2):61-97.

Mamouri R E, Ansmann A, Nisantzi A, et al, 2016. Extreme dust storm over the eastern Mediterranean in September 2015: satellite, Lidar, and surface observations in the Cyprus region [J]. Atmos Chem Phys, 16(21): 13711-13724.

Muhs D R, 2013. The geologic records of dust in the Quaternary[J]. Aeol Res, 9: 3-48.

Norton C C, Mosher F R, Hinton B, et al, 1980. A model for calculating desert aerosol turbidity over the oceans from geostationary satellite data[J]. J Appl Meteor, 19(6): 633-644.

Pierangelo C, Chédin A, Heilliette S, et al, 2004. Dust altitude and infrared optical depth from AIRS[J]. Atmos Chem Phys, 4(7): 1813-1822.

Peyridieu S, Chéhyr A, Tanri D, et al, 2010. Saharan dust infrared optical depth and altitude retrieved from AIRS: a focus over North Atlantic-comparison to MODIS and CALIPSO[J]. Atmos Chem Phys, 9(4): 1953-1967.

Pierangelo C, Mishchenko M, Balkanski Y, et al, 2005. Retrieving the effective radius of Saharan dust coarse mode from AIRS[J]. Geophys Res Lett, 32(20): L20813.

Pye K, 1987. Aeolian Dust and Dust Deposits[M]. London: Academic Press: 340.

Shao Yaping, Wyrwoll K H, Chappell A, et al, 2011. Dust cycle: an emerging core theme in Earth system science[J]. Aeol Res, 2(4): 181-204.

Shenk W E, Curran R J, 1974. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements[J]. Mon Wea Rev, 102(12): 830-837.

Sokolik I N, 2002. The spectral radiative signature of wind-blown mineral dust: implications for remote sensing in the thermal IR region[J]. Geophys Res Lett, 29(24): 7-1-7-4.

Stowe L L, Ignatov A M, Singh R R, 1997. Development, validation, and potential enhancements to the second-generation operational aerosol product at the National Environmental Satellite, Data, and Information Service of the National Oceanic and Atmospheric Administration[J]. J Geophys Res Atmos, 102(D14): 16923-16934.

Vaughan M A, Powell K A, Winker D M, et al, 2009. Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO lidar measurements[J]. J Atmos Oceanic Technol, 26(10): 2034-2050.

Wang X, Huang J, Ji M, et al, 2008. Variability of east Asia dust events and their long-term trend[J]. Atmos Environ, 42(13): 3156-3165.

Washington R, Todd M, Middleton N J, et al, 2003. Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations[J]. Ann Assoc Am Geograph, 93(2): 297-313.

Yao Zhigang, Li Jun, Han H J, et al, 2012. Asian dust height and infrared optical depth retrievals over land from hyperspectral longwave infrared radiances[J]. J Geophys Res, 117(D19): D19202.

Yao Zhigang, Li Jun, Zhao Zengliang, 2015. Synergistic use of AIRS and MODIS for dust top height retrieval over land[J]. Adv Atmos Sci, 32(4): 470-476.

Zhang Peng, Lu Naimeng, Hu Xiuqing, et al, 2006. Identification and physical retrieval of dust storm using three MODIS thermal IR channels[J]. Global Planet Change, 52(1-4): 197-206.

Zhao Suping, Yin Daiying, Qu Jianjun, 2015. Identifying sources of dust based on CALIPSO, MODIS satellite data and backward trajectory model[J]. Atmos Pollut Res, 6(1): 36-44.

Zhao Xuepeng, 2012. Asian dust detection from the satellite observations of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS)[J]. Aerosol Air Quality Res, 12(6): 1073-1080.

Zhou B, Zhang L, Cao Xianjie, et al, 2012. Analysis of the vertical structure and size distribution of dust aerosols over the semi-arid region of the Loess Plateau in China[J]. Atmos Chem Phys, 12(2): 6113-6143.