

# 大气气溶胶光学厚度遥感研究概况

宋 薇, 张 镭\*

(兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘 要:** 大气气溶胶是影响气候变化的重要因子之一, 利用遥感手段不仅可以获得气溶胶的分布信息, 也可以得到相关的气溶胶光学特性参数。本文阐述了国内外气溶胶遥感的发展动态, 介绍了气溶胶遥感的基本情况, 以及气溶胶光学厚度反演的几种方法, 提出了存在的问题并对今后的研究进行了展望。

**关键词:** 大气气溶胶; 遥感; 反演; 气溶胶光学厚度

**中图分类号:** P407. 4

**文献标识码:** A

## 引 言

气溶胶是指悬浮在气体中的固体和液体微粒与气体载体共同组成的多相体系, 其动力学直径大约是  $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 。因此, 可以把空气看成是一种气溶胶, 因为空气中含有各种悬浮的固体和液体粒子, 即大气气溶胶粒子, 其组分复杂, 具有独特的物理化学性质。

大气气溶胶由不同相态的物质组成, 虽然含量很少, 但对大气中发生的许多物理化学过程都有重要影响, 因此是气候变化模拟和环境遥感中的重要因子。研究表明, 气溶胶主要通过 3 种机制来影响气候<sup>[1-4]</sup>:

(1) 气溶胶对短波和长波辐射的直接散射和吸收。对大气的影晌是: 气溶胶的散射作用将减少入射到地气系统的太阳辐射, 起冷却作用; 气溶胶吸收太阳短波辐射, 对其所在的气层有加热作用。气溶胶的冷却和增暖 2 种作用的大小与其吸收散射比及地表反射率有关; 气溶胶不仅影响太阳短波辐射, 也影响红外辐射的传输。

(2) 气溶胶粒子的增加能改变云的特性 (大量的气溶胶粒子作为云凝结核, 使单位体积云内的云粒子数量增加, 使云滴半径减小, 增加了云的短波反射率, 同时延长了云的生命时间)。这种变化不但影响了地气系统的短波辐射, 同时对地气系统的长

波辐射也会产生影响, 即间接辐射强迫。

(3) 气溶胶可以改变大气化学过程, 进而影响温室气体的浓度和分布。

正是因为气溶胶具有很强的时空变化和复杂的化学组成, 目前针对气溶胶的研究还有很大的不确定性。而通过遥感获得的信息可以为研究气溶胶提供有力的依据, 同时也有助于深入研究气溶胶的辐射强迫及其气候效应。

## 1 气溶胶的遥感

### 1.1 地基遥感和卫星遥感

气溶胶粒子经过对入射辐射的散射和吸收作用, 使入射辐射的性质及强度发生了变化。通过测量入射辐射性质的变化便可以反演气溶胶粒子的特性, 这是遥感气溶胶的基本原理。对于气溶胶遥感, 可以分为地基遥感和卫星遥感<sup>[5]</sup>。

地基遥感主要有波段光度计遥感、激光雷达遥感、全波段太阳直接辐射遥感等方法。在地基遥感中, 多波段光度计遥感气溶胶光学厚度是目前气溶胶遥感中最准确的方法, 通常被用来校验卫星遥感的结果<sup>[6]</sup>。光度计遥感尽管在空间代表性上有一定缺陷, 但它丰富的信息含量, 相对比较成熟的反演理论, 使其在气溶胶研究中具有不可替代的作用。

收稿日期: 2007 - 03 - 26; 改回日期: 2007 - 06 - 21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40675078) 和国家重点基础研究发展规划项目 (2006CB400501) 资助

作者简介: 宋薇 (1982 - ) 女, 甘肃敦煌人, 硕士研究生, 主要从事大气辐射和大气遥感研究。E-mail: songwei04@lzu.cn

\* 通讯联系人: zhanglei@lzu.edu.cn

它是以太阳光为光源的被动遥感手段。因为自大气上界入射到地气系统的太阳辐射受到了大气中气体分子以及大气气溶胶粒子的散射和吸收,所以在地面接收到的太阳辐射包含了大气中气溶胶信息,通过测量接收到的辐射就可以反演气溶胶的信息。近年来地基太阳光度计遥感在观测反演原理等方面取得了许多成果,包括提出了联合太阳直接和散射辐射反演气溶胶特性的思路;同时反演气溶胶尺度谱、折射指数和地表反照率的方法;并且开发了适合于反演算法的快速准确的辐射传输理论和反演模式等。

激光雷达遥感是主动式遥感手段,利用它可以获得气溶胶的垂直分布信息。它测量气溶胶光学厚度的一般方法是利用 Femald 方法<sup>[7]</sup>求解气溶胶消光系数的高度分布,然后对消光系数求积分得到气溶胶光学厚度。邱金桓<sup>[8]</sup>等利用激光雷达和光度计对北京大气气溶胶进行了综合遥感,分析了北京大气柱气溶胶光学厚度、谱分布、折射率及粒子浓度的高度分布;王晓宾<sup>[9]</sup>等利用 L625Raman - Mie 激光雷达的探测数据计算分析了合肥地区对流层气溶胶的波长指数,给出了该地区对流层气溶胶光学特性的一些典型特征。夏俊荣<sup>[10]</sup>等论述了激光雷达探测大气的优点及求解 Mie 散射激光雷达方程的理论方法,并对近 20 a 来国内外 Mie 散射激光雷达探测气溶胶的成果进行了阐述。近几年利用激光雷达探测气溶胶受到了很大关注,但鉴于其设备费用较高,目前只在香港、北京、武汉、兰州、合肥等地利用激光雷达进行长期的气溶胶遥感观测。

全波段太阳直接辐射遥感气溶胶特性,主要利用国内气象台站对全波段太阳直接辐射资料来研究大气气溶胶的光学特性,邱金桓<sup>[11]</sup>等通过分析全波段太阳直接辐射对气溶胶光学厚度及粒子谱的敏感性,提出了利用晴天全波段太阳直接辐射信息确定 0.7 $\mu\text{m}$  波长处气溶胶光学厚度的方法。后来又对此方法进行改进,在利用全波段太阳短波直接辐射和能见度资料的基础上<sup>[12]</sup>,反演整层大气及平流层的气溶胶光学厚度。

地面遥感气溶胶可以得到较为准确的气溶胶信息,但是目前该方法只能在有限的区域进行,无法用来遥感大范围气溶胶的光学特性,利用卫星遥感可以弥补这一不足,特别是在环境恶劣的边远地区和广阔的海洋地区。

对于卫星遥感,目前用于气溶胶遥感的传感器可以分为以下几类<sup>[13]</sup>:利用反射光谱强度信息,如

EOS - MOD IS;利用角度分布反射光谱信息,如 EOS - MISR;利用反射光谱的极化信息,如 POLDER、Terra 和 Aqua 卫星上搭载的 MOD IS 仪器,是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 0.4 ~ 14  $\mu\text{m}$  的电磁波谱范围内,仪器的地面分辨率有 250 m、500 m 和 1 000 m,扫描宽度为 2 330  $\text{km}^{[14]}$ ,MOD IS 探测器用于气溶胶遥感的通道是 0.620 ~ 0.670  $\mu\text{m}$  的红通道以及 0.459 ~ 0.479  $\mu\text{m}$  的蓝通道。这 2 个通道位于大气可见光窗区,通道宽度窄,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订正。

## 1.2 国内外的气溶胶卫星遥感研究

国际上卫星遥感气溶胶的理论研究始于 20 世纪 70 年代中期,对利用卫星资料反演气溶胶光学厚度有大量的研究。1977 年 NOAA 开始利用 AVHRR 可见光第 1 通道 (0.63 $\mu\text{m}$ ) 进行海洋上空气溶胶光学厚度的遥感<sup>[15]</sup>,目前已经发展到利用双通道进行反演,利用 AVHRR 可见光通道遥感海洋上空气溶胶已作为 NOAA 的业务运行,每周提供 1 次全球海上气溶胶光学厚度分布图;Tanr 等<sup>[16]</sup>的研究则使人们认识到在陆地观测中去除气溶胶浑浊效应的重要意义和可行性,并由此开始了陆地气溶胶的遥感研究;Remer<sup>[17-18]</sup>等提出了利用 MOD IS 资料进行海洋和陆地上空气溶胶光学厚度的反演方法;Chu 等<sup>[19]</sup>利用 NASA 10 km 的 Level 2 气溶胶光学厚度产品研究了 MOD IS 资料在检测全球和局地大气污染方面的应用,证实其存在显著的应用价值;在原有反演方法的基础上,Robert C. Levy 等<sup>[20]</sup>提出一种新的 V5.2 算法,基于卫星的 2 个可见光通道和一个中红外通道的反射率进行反演。新方法考虑了光学厚度小值的情况,使气溶胶光学特性参数反演更加精确,其中反演结果在规定的误差范围内,并通过与 AERONET 观测网 550 nm 处的光学厚度对比后发现,两者满足关系  $y = 1.01x + 0.03$ ,相关系数达到 0.90。全球平均气溶胶光学厚度的反演值从以前的 0.28 减小为 0.21。

国内卫星遥感气溶胶的研究始于 20 世纪 80 年代中期。1986 年赵柏林等<sup>[21]</sup>利用 AVHRR 资料,进行了海上大气气溶胶的遥感研究,对渤海上空一个点进行了遥感反演;张军华<sup>[22]</sup>等研究了利用 GMS - 5 卫星的可见光通道资料遥感湖面上空大气气溶胶光学厚度的可行性,并指出了 GMS - 5 卫星可见光通道资料的优缺点;韩志刚<sup>[23]</sup>利用 ADEOS 上的辐

射偏振探测器 (POLDER)的资料进行了草地上空气溶胶的遥感实验研究;毛节泰等<sup>[24]</sup>将卫星遥感气溶胶光学厚度和地面多波段光度计在北京地区的遥感结果进行对比,证实 MODIS 气溶胶产品达到了一定精度,可以反映气溶胶的区域分布;刘桂青<sup>[25]</sup>等利用长江三角洲地区几个城市的空气污染指数与 MODIS 气溶胶光学厚度进行对比,指出 MODIS 气溶胶光学厚度从某种程度上可以反映地面大气污染状况,并提出一种研究区域空气污染的监测手段;赵秀娟等<sup>[26]</sup>借助 6S 模式对 MODIS 的红、蓝、中红外通道进行了行星反照率对地表反射率和气溶胶光学厚度的敏感性试验,试验结果表明,在兰州周围地区蓝光通道与中红外通道地表反射率之间的关系与 Kaufman 给出的关系比较符合,并且对于兰州周围大范围区域都是适用的;冯建东等<sup>[27]</sup>利用陆地水库上空的多通道 MODIS 遥感信号,通过 6S 模式,建立了类似 Tanr 等的反演查算表,进行反演陆地上空气溶胶粒子尺度分布;黄艇等<sup>[28]</sup>采用对比方法,利用 2 d 的 MODIS 红、蓝和近红外通道表观反射率资料,通过查算表反演了水面上空的气溶胶光学厚度和几何平均质量粒径;近年来随着对地观测的传感器不断增多,不同平台之间的传感器结合利用得到发展。为了克服气溶胶反演中未知参数较多,高亮度地区气溶胶信息难以从卫星信号中分离出来的困难,唐家奎等<sup>[29]</sup>提出了基于 Terra 和 Aqua 双星 MODIS 数据的协同反演算法,用以反演陆地气溶胶的光学厚度。该算法实现了地表反照率和气溶胶光学厚度的同时反演,可以应用于各种地表反照率类型,包括城市等亮地表区域。目前,国内也应用 FY-1C/1D 气象卫星资料进行全球海上气溶胶光学厚度的反演<sup>[30]</sup>,FY-1C/1D 卫星的 1(波长 0.58~0.68),2(波长 0.84~0.89),6(波长 1.58~1.64)3 个通道在洋面受其它信号干扰小,气溶胶信号能明显体现出来,因此这几个通道是反演气溶胶的理想通道,利用 FY-1C/1D 卫星资料进行全球海上反演的初步试验,取得了与国外同类卫星传感器比较一致的反演结果,从 2 颗卫星连续的反演结果分析,可以清晰地发现全球气溶胶主要排放源地和全球海上气溶胶分布的季节变化。

## 2 气溶胶光学厚度遥感反演算法

反演大气气溶胶光学厚度的基本原理见 (1)式:

$$L(a, \mu_s, \mu_v) = L_0(a, \mu_s, \mu_v) + F_d(a, \mu_s) T(a, \mu_v) / [1 - s(a)] \quad (1)$$

其中  $s$  为大气半球反射率,  $T(a, \mu_v)$  为地表反射率,  $T(a, \mu_v)$  为大气吸收所构成的透过率,  $F_d(a, \mu_s)$  为下行的辐射。

(1)式是一般的大气校正原理公式,传感器接收到的辐射  $L(a, \mu_s, \mu_v)$  由大气路径辐射  $L_0(a, \mu_s, \mu_v)$  和地表反射辐射  $F_d(a, \mu_s) T(a, \mu_v) / [1 - s(a)]$  组成,这 2 部分都可用于反演气溶胶光学厚度。

对于大气路径辐射项,它只是大气气溶胶光学厚度和几何参数的函数,假如地表反射辐射比较小或为零,就可以通过大气路径辐射项来反演获得气溶胶光学厚度,对于 (1)式等号右边第 2 项是气溶胶光学厚度的函数,如果消去路径辐射信息,便可以通过它来反演气溶胶光学厚度。这 2 部分构成了现在的气溶胶参数反演的基本方面。

对于气溶胶光学厚度反演算法而言,比较有代表性的算法主要有通过路径辐射项来求取光学厚度的 DDV (Dense Dark Vegetation) 方法和通过透过率求取光学厚度的 CR (Contrast Reduction) 算法<sup>[31]</sup>,此外还有对比方法,结构函数法。

### 2.1 暗像元法

地表物体的多样性会造成反射率的复杂多变,这就使得从遥感图像的辐射值中分离出路径辐射项很困难。如果想用辐射项来获得气溶胶信息,就必须使地表辐射值可以忽略或者有辐射但很小,并且能够较精确的确定,这样可以尽量消除地表反射率的不确定性对光学厚度的影响。对于浓密植被,它们的反射率都很低(约 0.01~0.02),因此许多植被浓密的地方可以用此方法获得气溶胶信息,并由此进行大气校正,这种方法即 Dense Dark Vegetation 方法<sup>[32]</sup>,它是 Kaufman 和 Tanr 等从 1988 到 1997 年逐渐发展成熟起来的算法。

Kaufman 等<sup>[33]</sup>利用大多数陆面在红 (0.60~0.68  $\mu\text{m}$ ) 和蓝 (0.40~0.48  $\mu\text{m}$ ) 波段反射率低的特性,以植被指数 NDVI 或中红外通道 (2.12  $\mu\text{m}$ ) 反射率将森林判识为暗像元,并假定这些暗像元红、蓝通道的地表反射率,用于反演气溶胶光学厚度。

最初确定暗像元是利用植被指数和近红外通道表观反射率加以识别的,使得这种方法只能应用于预先知道有稠密植被的地区,为了使方法的适用性更好,Holben 和 Kaufman 用中红外波段 (2.1  $\mu\text{m}$  或 3.8  $\mu\text{m}$ ) 来寻找暗像元<sup>[34]</sup>。Kaufman 等通过大量的

资料,考虑多种地表覆盖,拟合得到红 ( $0.66 \mu\text{m}$ )、蓝 ( $0.47 \mu\text{m}$ )和中红外通道 ( $2.1 \mu\text{m}$ )地表反射率的关系  $\rho_{0.47} = \rho_{2.1}^* / 4$ ,  $\rho_{0.66} = \rho_{2.1}^* / 2^{[35]}$ ,并把这种关系应用到业务中。当确定了相应的可见光通道的地表反照率,并且合理假定气溶胶模型,就可以由卫星观测表观反射率来获取气溶胶光学厚度。

为了使这一方法能够适用于其它地表反射率较大的地区,Kaufman等在 MODIS 半年报告<sup>[36]</sup>中给出了陆地气溶胶光学厚度反演的验证,表明利用暗像元方法能够得到陆地较“暗”地表的气溶胶光学厚度,在较“亮”地表,他们扩展了暗像元方法,主要思路是:在星下点,暗像元方法可用于中红外波段地表反射率  $\rho_{2.1} = 0.4$  的情况;在非星下点,则可以扩展到中红外波段地表反射率  $\rho_{2.1} = 0.25 [0.5 \times (1/\mu_v + 1/\mu_s)]$  的地表(其中  $\mu_v$  为卫星天顶角的余弦, $\mu_s$  为太阳天顶角的余弦),而可见光  $0.66 \mu\text{m}$  和  $0.47 \mu\text{m}$  波段的地表反射率仍可利用  $\rho_{0.66} = \rho_{2.1}^* / 2$  和  $\rho_{0.47} = \rho_{2.1}^* / 4$  得到。

利用这种方法反演的气溶胶光学厚度的精度会受到所选取的黑体目标物的反射率的不确定性和气溶胶模式(如粒子大小、折射指数、单次散射反照率及球形近似度)的影响。

## 2.2 大气透过率方法

对于卫星传感器获取的遥感图像,包括了地表辐射和大气辐射 2 部分信息,以及仪器自身所带来的误差:  $I = f(s, a, m, o)$  (其中  $s$  为地表信息,  $a, m, o$  为大气信息)。从大气透过率获取气溶胶光学厚度是以多幅图像的透过率的比率为基础的,称为 Contrast Reduction。透过率的变化是由距离一个特定像素特定距离内的像素来决定的,根据上面公式可知,2 个相邻像素 ( $i, j$ ) 和 ( $i, j+1$ ) 的辐射值变化量与实际的地表反射率变化率相关:

$$L_{i,j}^* (a, \mu_s, \mu_v) = \frac{T(a, \mu_v) F_d(a, \mu_s)}{1 - \rho_s(a)^*} \quad (2)$$

(2) 式中  $\rho_s$  是 2 个像素的平均反射率。如果这个方法应用于一组图像,其中包括了一张比较清晰的图像,那么就可以通过这幅图像估计出光学厚度,之后计算实际的  $\rho_{i,j}$ ,最后根据公式计算出每一幅图像的光学厚度,这时的光学厚度是独立于散射相位函数而依赖于单次散射反照率和气溶胶非对称参数的。

## 2.3 对比方法

对比方法是早期研究陆地污染气溶胶采用的卫

星遥感方法,它采用可见光、红、蓝波段卫星数据,在同一地区,假定在一段时间内地表反射率不变,用清洁日大气作为污染日大气的参考反演气溶胶光学厚度。

几何平均质量粒径的反演是参考 Kaufman 在 1990 年提出的一种方法<sup>[37]</sup>。暗地表的向上辐射随波长的变化情况中包含气溶胶的粒子谱信息,Kaufman 认为当气溶胶增多时,“污染日”的光学厚度比“清洁日”的大得多,当污染产生主要是由一种物理或化学机制造成时,2 d 气溶胶含量的差就可以用一单模态来描述。

Kaufman 等在 1990 年提出了一种利用卫星观测的可见光和近红外通道辐射同时确定气溶胶光学厚度、几何平均质量粒径和单次散射反照率的方法。方法是基于“清洁日”和“污染日”卫星观测到的向上辐射差反演气溶胶特性,他们用这种方法反演了森林火灾产生的烟尘的特性<sup>[38]</sup>。可以用相类似的方法由 2 d (“清洁日”和“污染日”) 的红、蓝和近红外通道的表观反射率差来同时反演几何平均质量粒径和光学厚度。

## 2.4 结构函数法

暗像元方法在反演类似 6 S 模式定义的城市型或沙尘型气溶胶时存在一定的问题,对于暗地表较少的区域不适用,因此提出了结构函数法。该方法最初是由 Tanré 提出的,是基于气溶胶散射造成的临近效应对气溶胶光学厚度进行反演。他们利用这种方法用 TM 的资料反演了撒哈拉沙漠沙尘气溶胶的光学厚度<sup>[39]</sup>。Tanré<sup>[40]</sup>和 Holben 在采用对比方法反演气溶胶时,引入结构函数用于气溶胶光学厚度反演,避免了确定地表反射率时的困难,以表观反射率的地表贡献项为主,基于大气总透过率进行反演。结构函数法为在暗像元法不适用的干旱、半干旱地区和城市等亮地表区域上空的气溶胶光学厚度反演提供了一条途径。

对于以上提到的几种方法,各有优缺点。暗像元法 (DDV) 的适用的条件是短波长、暗地表,并且蓝通道比红通道更适合于采用暗像元法进行反演,因为对比红、蓝光,大气成分对蓝光的强散射作用和地表对蓝光的低反射作用增强了蓝通道卫星信号中路径辐射的信息。这种方法可以应用于那些预先知道有浓密植被的遥感图像,可以通过地理坐标和季节来确定在影像上的位置,这样就可以估计那些有浓密植被的最小反射率像素,之后假设这些像素的

分布便可以用来估计整幅图像的气溶胶分布;对于结构函数法,如果针对强吸收性气溶胶,红、蓝通道对气溶胶光学特性的敏感性一致,在合理假定气溶胶模型的前提下,它们都可以得到很好的反演结果,但是对于弱吸收性气溶胶,红通道则可以反演出较好的结果,这是因为大气成分对红光的强吸收作用和地表对红光的高反射作用增强了红通道卫星信号中路径辐射的信息。因此,红通道比蓝通道更适合于结构函数法反演,它可以体现实际气溶胶的光学特性,并且适应广泛的气溶胶模型。

### 3 存在的问题与展望

大气气溶胶的时空变化比较大,加上气溶胶的一些关键参数(例如单次散射反照率)的定量化探测技术并未很好地解决,因此,气溶胶辐射特性定量化的卫星与地基遥感方法及其应用将是今后重要的前沿研究课题。另外,由于陆地的不均匀性很强,对太阳短波辐射的反射值随地表的不同差异很大,到目前为止,利用卫星遥感陆地上空的气溶胶还存在许多问题。

随着近年来各种高分辨率和高定标精度探测器的出现,气溶胶遥感已形成是一个非常丰富的体系。卫星遥感产品也从反演气溶胶光学厚度,发展到了反演气溶胶粒子谱分布、折射率指数及气溶胶类型。这对全面、深入地研究气溶胶提供了丰富的信息。未来的目标是实现最大程度的地基遥感与空基遥感相结合,探测更大范围的气溶胶光学特性。同时,比较分析不同的气溶胶遥感方法和结果,配合地面同步观测,为卫星反演提供评价和检验依据。随着更先进的传感器投入使用,将会提供更多的地表和大气的信息,将有助于地表反射率和气溶胶光学厚度的联合反演,同时在高反射率地区(如我国西北地区)的气溶胶光学厚度反演中发挥重要作用。

#### 参考文献:

- [1] Schwarta S E, Coauthors. Group report: Connection between aerosol and properties and forcing of climate [A]. In: Charlson R J, Heintzenberg J. *Aerosol Forcing of Climate* [M]. 1995. 251 - 280.
- [2] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102 (D6): 6831.
- [3] 王明星. 气溶胶与气候 [J]. *气候与环境研究*, 2000, 5 (1): 1 - 5.
- [4] 付培健, 王世红, 陈长和. 探讨气候变化的新热点: 大气气溶胶的气候效应 [J]. *地球科学进展*, 1998, 13 (4): 387 - 393.
- [5] 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.
- [6] 张军华. 地面和卫星遥感中国地区气溶胶光学特性 [D]. 北京大学博士学位论文, 2000.
- [7] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23 (5): 632 - 653.
- [8] 邱金桓, 孙金辉, 夏其林, 等. 北京大气气溶胶的综合遥感和分析 [J]. *气象学报*, 1988, 46 (1): 49 - 58.
- [9] 王晓宾, 胡欢陵, 李琛, 等. Raman - Mie激光雷达探测对流层气溶胶波长指数 [J]. *量子电子学报*, 2006, 23 (3): 341 - 345.
- [10] 夏俊荣, 张镭. Mie散射激光雷达探测大气气溶胶的进展 [J]. *干旱气象*, 2006, 24 (4): 68 - 72.
- [11] 邱金桓. 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度: 理论 [J]. *大气科学*, 1995, 19 (4): 385 - 394.
- [12] 邱金桓, 潘继东, 杨理权, 等. 中国 10 个地方大气气溶胶光学厚度 1980 - 1994 年间变化特征研究 [J]. *大气科学*, 1997, 21 (6): 725 - 733.
- [13] Deuz é L, Br éon FM, Deschamps P Y, et al. Analysis of the POLDER (Polarization and Directionality of Earth's Reflectance) airborne instrument observations over land surfaces [J]. *Remote Sens of Environ*, 1993, 45: 137 - 154.
- [14] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS遥感信息处理原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] Rao, P. K 等编, 许健民等译. 气象卫星——系统、资料及其在环境中的应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1994. 409 - 411.
- [16] Tanré D, Heman M, Deschamps P Y, et al. Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectance including bi-directional properties [J]. *Appl Optics*, 1979, 18: 3587 - 3594.
- [17] Chu D A, Kaufman Y J, Chouk C, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. *J Geophys Res*, 2002, 29 (12): 1617 - 1621.
- [18] Remer L A, Tanre D, Kaufman Y J, et al. Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29 (12): 1 - 4.
- [19] Chu D A, Kaufman Y J, Zibordi G, et al. Global monitoring of air pollution over land from Earth Observing System - Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 (D21): 4664 - 4679.
- [20] 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*, July 2006.
- [21] 赵柏林, 余小鼎. 海上大气气溶胶的卫星遥感研究 [J]. *科学通报*, 1986, 31: 1645 - 1649.
- [22] 张军华, 斯召俊, 毛节泰, 等. GMS卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度 [J]. *大气科学*, 2003, 27 (1): 23 - 25.
- [23] 韩志刚. 草地上空对流层气溶胶特性的卫星偏振遥感正问题模式系统反演初步实验 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2000.
- [24] 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 (特): 127 - 135.
- [25] 刘桂青, 李成才, 朱爱华, 等. 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 (增): 58 - 63.

- [26] 赵秀娟,陈长和,张武,等. 利用 MODIS 资料反演兰州地区气溶胶光学厚度 [J]. 高原气象, 2005, 24(1): 97 - 103.
- [27] 冯建东,黄艇,陈长和,等. 利用 MODIS 资料遥感水体上空气溶胶粒子尺度的数值试验 [J]. 高原气象, 2006, 26(1): 110 - 115.
- [28] 黄艇,陈长和,陈勇航,等. 利用 MODIS 卫星资料对比反演兰州地区气溶胶光学厚度 [J]. 高原气象, 2006, 25(5): 886 - 892.
- [29] 唐家奎,薛勇,虞统,等. MODIS 陆地气溶胶遥感反演 - 利用 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 数据协同反演算法 [J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2005, 35(5): 474 - 481.
- [30] 胡秀清,卢乃锰,邱红. FY-1C/1D 全球海上气溶胶业务反演算法研究 [J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 56 - 65.
- [31] Tanré D, Deschamps P Y, Devaux C, et al. Estimation of Saharan Aerosol Optical Thickness From Blurring Effects in Thematic Data [J]. J Geophys Res, 1998, 93(12): 15955 - 15964.
- [32] Holben B, Vermote E, Kaufman Y J, et al. Aerosol retrieval over land from AVHRR data - application for atmospheric correction [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1992, 30(2): 212 - 222.
- [33] Kaufman Y J, Sendra C. A algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near - IR satellite imagery [J]. Int J Remote Sens, 1988, 9(8): 1357 - 1381.
- [34] Holben B, Vermote E, Kaufman Y J, et al. Aerosols Retrieval over Land from AVHRR Data - application for Atmospheric Correction [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1992, 30(2): 212 - 222.
- [35] Kaufman Y J, Andrew E, Wald A Lorraine, et al. The MODIS 2.1 -  $\mu\text{m}$  Channel - Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol [J]. IEEE Trans Geos Remote Sensing, 1997, 35(5): 1286 - 1298.
- [36] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L, et al. MODIS semi - annual Report [R]. 2002.
- [37] Kaufman Y J, Fraser R S, Ferrare R A. Satellite measurements of large - scale air pollution - Methods [J]. J Geophys Res, 1990, 95(D7): 9895 - 9909.
- [38] Ferrare, Richard A, Robert S Fraser, et al. Satellite Measurements of Large - Scale Air Pollution: Measurements of Forest Fire Smoke [J]. J Geophys Res, 1990, 95(D7): 9911 - 9925.
- [39] Tanré D, Deschamps P Y, Devaux C D, et al. Estimation of Saharan Aerosol Optical Thickness From Blurring Effects in Thematic Data [J]. J Geophys Res, 1998, 93(12): 15955 - 15964.
- [40] Tanré D, Devaux C, Herman M, et al. Radiative properties of desert aerosols by optical ground - based measurements at solar wavelengths [J]. J Geophys Res, 1988, 93(20): 14223 - 14231.

## A Review of Remote Sensing for Aerosol Optical Depth

SONG Wei, ZHANG Lei

(College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** Atmospheric aerosol is one of the most important factors which has influence on climate change. It can gain not only the aerosol distribution information but also the aerosol optical property parameters through the methods of remote sensing. The status in quo of aerosol remote sensing research home and abroad was introduced briefly in the paper, and several kinds of methods for aerosol optical depth retrieval and validation were stated in detail, and at last some prospect for aerosol optical depth retrieval was suggested.

**Key words:** atmospheric aerosol; remote sensing; retrieval; aerosol optical depth