

孙源隆, 石广玉. 2011. 利用可见光与近红外大气窗区的组合通道探测陆面上空气溶胶 [J]. 大气科学, 35 (2): 350–360. Sun Yuanlong, Shi Guangyu. 2011. Detecting aerosols over land using combined channels within the visible and near IR atmospheric windows [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 350–360.

利用可见光与近红外大气窗区的组合通道 探测陆面上空气溶胶

孙源隆^{1,2} 石广玉¹

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本文提出了一种利用可见光与近红外大气窗区内的 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.85\ \mu\text{m}$ 双通道的组合, 通过观测地气系统的反射辐射从卫星上遥感陆面上空气溶胶的方法。模拟试验发现, 对于不同类型的气溶胶, 随着气溶胶光学厚度的逐渐增大, $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.85\ \mu\text{m}$ 双通道的反射辐射亮度的差值和比值呈现出明显不同的变化趋势, 据此便可以识别出气溶胶的类型, 并可进一步推算出其光学厚度。另外, 模拟试验还发现, 对于常见的几类地物反射率类型, 该方法都是适用的。

关键词 气溶胶遥感 陆面上空 大气窗区 双通道 卫星

文章编号 1006–9895 (2011) 02–0350–11

中图分类号 P407

文献标识码 A

Detecting Aerosols over Land Using Combined Channels within the Visible and Near IR Atmospheric Windows

SUN Yuanlong^{1,2} and SHI Guangyu¹

¹ *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract A special method is proposed for remote sensing of aerosols over land through analyzing satellite-measured radiances reflected from the earth-atmospheric system at two shortwave atmospheric window channels of 0.5 and 0.85 microns. Sensitivity tests reveal that the behavioral features of the differences (D) and ratios (R) between the reflected radiances at these two channels with increasing aerosol optical depth are much different among different types of aerosols. Analyzing how D and R behave with varying aerosol optical depth can help us qualitatively distinguish aerosol types and quantitatively estimate their optical depth. In addition, it is also found that this method is feasible for the most common ground reflectance types.

Key words aerosol remote sensing, over land, atmospheric windows, bi-channel, satellite

1 引言

目前, 气溶胶对于气候和环境的影响正在受到

人们越来越多的关注。气溶胶与温室气体的一个很大的不同之处在于气溶胶的种类、浓度都有很大的时空变化。要研究气溶胶的气候环境效应, 就必须

首先通过观测确定出其类型、浓度含量随时间、空间的变化情况。

气溶胶的类型,按其来源或成分划分有很多种,如一些大气辐射传输模式(如 6S、SBDART 等)中所规定的乡村型(rural)、城市型(urban)、海洋型(oceanic)、对流层型(tropospheric)、大陆型(continental)、沙尘型(desertic)、生物质燃烧型(biomass burning)等,但仔细分析就会发现,除了海洋型气溶胶主要是由海盐成分构成的以外,内陆地区的气溶胶主要都是由三类基本的化学成分——黑碳、硫酸盐和沙尘(土壤)按不同的百分比混合而成的(许黎等,1998)。因此,对这三类基本化学成分构成的“基本”类型气溶胶进行深入透彻的研究是进行陆面上空(几乎所有种类的)气溶胶遥感探测的基础。本文将探讨对这三类“基本”类型气溶胶进行遥感探测的方法。

要对陆面上空气溶胶进行大范围持续的观测,卫星遥感几乎是唯一可行的手段(毛节泰等,2002)。传统的利用地气系统反射辐射信息进行空中遥感的方法的一个很大的困难就是不易将气溶胶层的反射信息与地表的反射信息区别开来,尤其是在陆面上空,因为陆面地表的反射率通常较高(相对于水面而言,有足够深度的清洁水体通常反射率较低),很多情况下导致地表的反射信号超过气溶胶层的反射信号而将其“淹没”。另外,不同的地表类型其反射率又有较大的差异(水面的情况则较为均匀),这也使得反演计算变得更加复杂和困难(Kaufman et al., 1997, 2000)。本文中提出的利用双通道反射信息的差值和比值探测气溶胶的方法则可以“绕过”地表反射这一不确定性因素的影响。

另外,传统的利用反射辐射观测资料遥感气溶胶的方法,虽然可以反演出气溶胶层的光学厚度(黎洁和毛节泰,1989;邱金桓,1995;邵鸿飞和毛节泰,1999),但很多情况下无法识别出气溶胶的类型。本文提出的利用反射辐射随气溶胶光学厚度的变化而呈现出来的变化趋势这一“动态”监测方法就可以解决气溶胶类型的识别这一难题,而传统的“静态”观测方法则无法解决这一难题。

为了尽可能的减小吸收性气体的影响,本文提出的从卫星平台上遥感气溶胶的方法,将选择可见光与近红外大气窗区内的几个通道“动态”地监测气溶胶层随时间的变化。

关于大气窗区,在太阳辐射光谱范围内(波长小于 $4\text{ }\mu\text{m}$)主要有以下几个:(1)可见光波段($0.4\sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$), (2) $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 窗区, (3) $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 窗区, (4) $1.22\text{ }\mu\text{m}$ 窗区, (5) $1.60\text{ }\mu\text{m}$ 窗区, (6) $2.2\text{ }\mu\text{m}$ 窗区, (7) $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 窗区。本文对于所有这些大气窗区内的波长使用 SBDART (Santa Barbara DIS-ORT Atmospheric Radiative Transfer) 大气辐射传输模式都进行了遥感探测气溶胶的敏感性试验,发现如果将一个较短的波长通道(如 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 等)与一个较长的波长通道(如 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.22\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.60\text{ }\mu\text{m}$ 等)“组合使用”,持续观测这一对“组合通道”处的反射辐射值的差值和比值随气溶胶光学厚度的动态变化,就可以识别出气溶胶的类型,并可推算出其光学厚度,从而解决了传统的利用反射辐射资料反演气溶胶时无法区分气溶胶类别这一难题。具体地,将主要挑选 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 这一对“组合通道”来进行遥感探测的研究。

2 利用“组合通道”遥感气溶胶的方法

利用双通道的组合遥感气溶胶的思路早在 20 世纪 90 年代或更早一些时候就有人提出,例如, Hsu et al. (1996)、Herman et al. (1997) 就利用 TOMS 的两个波段 (331 nm 和 360 nm 组合,或 340 nm 和 380 nm 组合)的辐射比遥感气溶胶,提出了气溶胶指数 (I_A , Aerosol Index) 的概念,其表达式为:

$$I_A = -100 \left(\lg \frac{I_{331,m}}{I_{360,m}} - \lg \frac{I_{331,c}}{I_{360,c}} \right), \quad (1)$$

其中, $I_{331,m}$ 、 $I_{360,m}$ 表示 331 nm 、 360 nm 波段卫星测得的反射辐射量, $I_{331,c}$ 、 $I_{360,c}$ 表示根据大气模式计算得到的无气溶胶存在时的辐射量。(1) 式中等号右边第二项是关于无气溶胶的晴空大气的情况,在遥感气溶胶的反演计算中可作为常量来对待。实际上(1)式中能够反映气溶胶信息的核心部分就是两个通道处的反射辐射量的比值。气溶胶指数(AI 指数)利用的是两个紫外通道,而在本文中我们将主要选择位于可见光区的 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 通道和位于近红外窗区的 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 通道,求取这两个通道的反射辐射的比值和差值。为了使公式在形式上更加简洁,在数学处理上略去了类似(1)式中的求对数运

算。我们定义 D 为两个通道处的反射辐射的差值 (difference), R 为其比值 (ratio):

$$D = I_{0.5} - I_{0.85}, \quad (2)$$

$$R = \frac{I_{0.5}}{I_{0.85}}, \quad (3)$$

其中, $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ 分别为卫星探测器接收到的 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 处的地气系统的反射辐亮度 (Radiance, 单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)。之所以选择 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 这样两个波长通道, 除了因为它们都位于短波大气窗区, 因而气体吸收作用很弱之外, 还因为它们都比较靠近太阳辐射的峰值波长 (约 $0.55 \mu\text{m}$ 左右), 因而能量密度较大, 易于观测。

在下一节的敏感性试验中将会发现, 对于不同类型的气溶胶, 随着其光学厚度的逐渐增大, D 和 R 所表现出来的变化趋势截然不同, 这便为我们提供了一种从空中识别气溶胶类型的方法。

3 敏感性试验及结果分析

3.1 SBDART 模式简介

本文的数值模拟中我们将采用的是 SBDART 大气辐射传输模式。SBDART 是由美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校开发的大气辐射传输模式, 采用离散坐标方法解辐射传输方程, 因此该模式命名为 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)。

SBDART 模式适合于求解紫外、可见光及红外波段的平面平行大气辐射传输问题。它基本上继承了以往辐射传输模式的成果, 比如, 模式中包含的 6 种标准大气模型来自 5S (Tanre et al., 1988); 气体吸收是 LOWTRAN-7 的内容 (Pierluissi and Maragoudakis, 1986); 解辐射传输方程利用了 DISORT 的方法; 太阳光谱有三种模型可供选择, 分别来自 LOWTRAN-7、5S 和 MODTRAN-3 模式; 包含的气溶胶模型来自 5S 和 LOWTRAN-7。它自己还提供了 6 种标准地面反射率模型以及 24 种卫星探测器的滤光片函数可供用户选择。

除了以上提到的标准选择项外, 该模式还可以根据用户的需要灵活定义大气廓线、云参数、气溶胶层高度、气溶胶组成、波段范围、滤光片函数等参数, 因此, 非常适合研究多种类型气溶胶情况下的大气的辐射传输问题。

以下的所有敏感性试验中所取的控制条件 (参

数) 都假定为较为典型的有代表性的北半球中纬度地区冬季大气的情形, 因为通常冬季大气气溶胶的浓度要比夏季的高, 特别是沙尘气溶胶。由于 SBDART 模式本身并不包含黑碳、硫酸盐和沙尘 (土壤) 这三类气溶胶模型, 有关这三类气溶胶的辐射特性参数 (包括单次散射反射率、不对称因子、消光截面等), 我们取自 Longtin et al. (1988) 的资料, 其中的硫酸盐气溶胶为硫酸铵成分。

3.2 均一光谱反射率的情形

均一光谱反射率的情形是一种最简单、最理想的情况, 即假定地表反射率 ρ 在各个光谱波长处均相等。

首先, 取地表反射率 ρ 为一较为典型的有代表性的数值 5%, 对黑碳、硫酸盐和沙尘三类气溶胶模拟计算出的卫星探测器观测到的反射辐亮度绘于图 1。模拟计算中取气溶胶层的光学厚度从 0 逐渐变化到 1.8; 在 $0.4 \mu\text{m}$ 至 $0.75 \mu\text{m}$ 大气窗区内每隔 $0.05 \mu\text{m}$ 取一个光谱波长, 另外, 再取 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.06 \mu\text{m}$ 、 $1.22 \mu\text{m}$ 、 $1.6 \mu\text{m}$ 、 $2.2 \mu\text{m}$ 、 $3.6 \mu\text{m}$ 和 $3.7 \mu\text{m}$, 总共 15 个光谱波长。

从图 1 中可以看出, 在这种较为典型的控制条件 (参数) 的情形下, 三类气溶胶的谱反射情况有着很大的不同。从曲线的总体形状上看, 黑碳气溶胶的存在使得反射辐亮度在所有各个波段上都随着其光学厚度的逐渐增大而逐渐减小 (见图 1a); 硫酸盐气溶胶的情形则正相反, 它的存在使得反射辐亮度在所有各个波段上都随着其含量的逐渐增大而逐渐增大 (见图 1b); 沙尘气溶胶的情形则较为复杂 (见图 1c), 随着其含量的逐渐增加, 某些波段上的反射辐亮度会逐渐增大, 而另一些波段上的反射辐亮度则会逐渐减小。特别需要注意的是图 1c, 即沙尘气溶胶的情况, 图中 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $0.65 \mu\text{m}$ 、 $0.7 \mu\text{m}$ 、 $0.75 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 五个波长通道处的反射曲线“跷起”, 表明沙尘气溶胶层在这五个波长处的反射较强。

之所以选择 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 这一对波长通道的组合来进行研究, 主要有三个原因, 除了如第 2 节中所述的两个原因 (即位于大气窗区, 因而气体吸收弱; 能量密度大, 因而易于观测) 外, 第三个原因便是如图 1c 所显示的沙尘气溶胶所特有的在 $0.85 \mu\text{m}$ 通道处的相对“跷起”特征, 以区别于其它两类气溶胶。研究中也曾经尝试过使用一个波

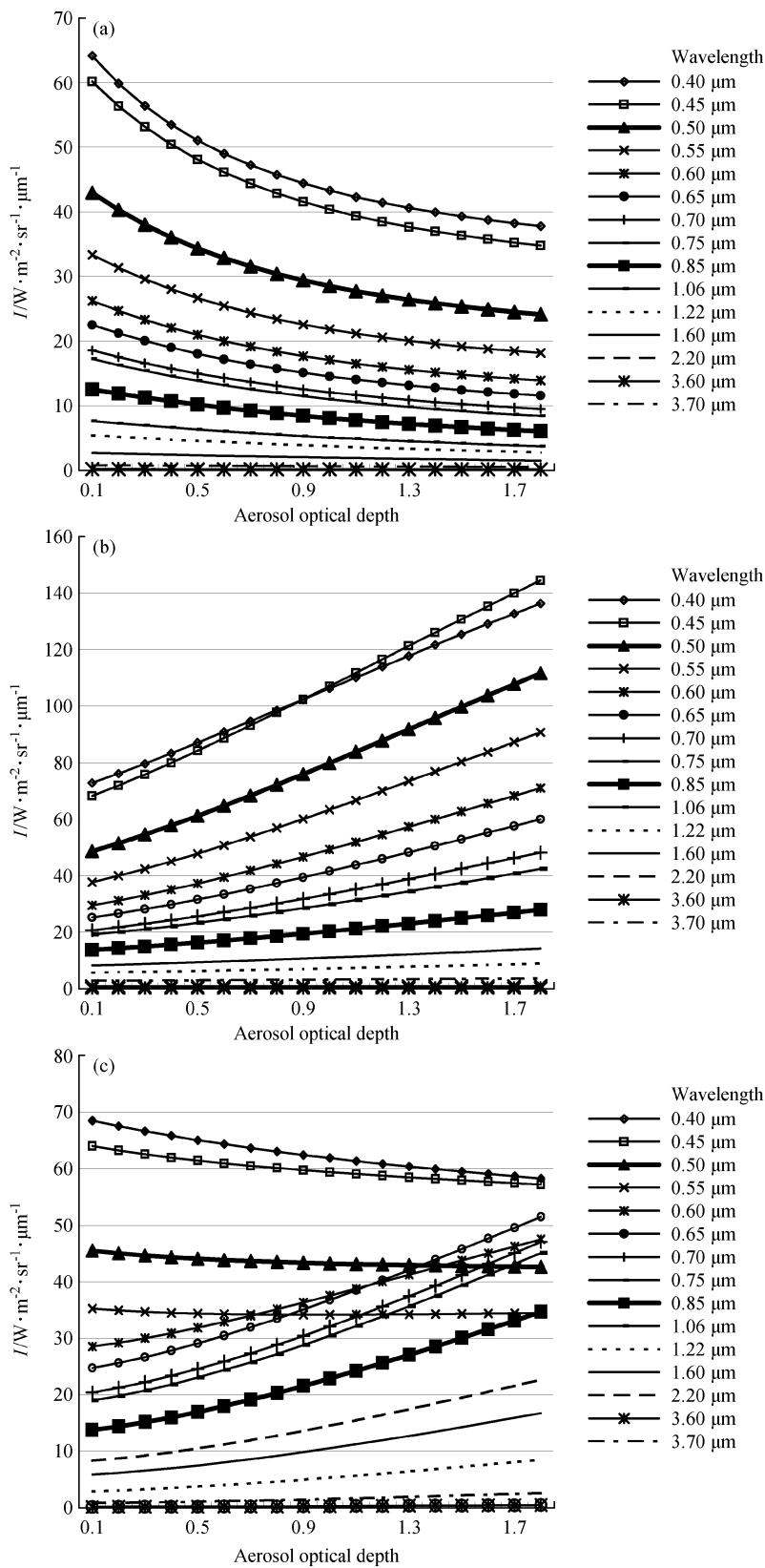


图1 模拟计算的卫星探测到的三类气溶胶的反射辐射度（地表反射率5%）：(a) 黑碳；(b) 硫酸盐；(c) 沙尘

Fig. 1 Simulation of the effects of three types of aerosols on the reflected radiance detected by satellite sensor (surface albedo 5%): (a) Carbonaceous aerosol; (b) sulfate aerosol; (c) dust aerosol

长较长的大气窗区通道, 如 $1.6\ \mu\text{m}$ 、 $2.2\ \mu\text{m}$ 、 $3.7\ \mu\text{m}$ 等通道, 与一个波长较短的通道进行搭配组合, 但由于长波长通道的辐射能量较低, 不便于实际观测, 而且此时计算出的 D 和 R (特别是 R) 的数值很大, 变化也比较剧烈, 在绘图及分析上不太方便, 因此, 综合考虑之后, 比较好的选择还是 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.85\ \mu\text{m}$ 这一对通道的搭配组合。为了明显起见, 图 1 中将 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.85\ \mu\text{m}$ 这一对通道的反射辐亮度曲线用粗黑线画出。

对应于 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.85\ \mu\text{m}$ 这一对通道的反射辐亮度 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$, 利用 (2) 式和 (3) 式计算出三类气溶胶相应的 D 和 R (图 2 至图 4)。

对于硫酸盐气溶胶 (图 3), 随着其光学厚度的逐渐增大, D 和 R 都有明显的上升, 而对于沙尘气

溶胶 (见图 4), D 和 R 却明显的下降。对于黑碳气溶胶, D 有明显的下降, 而在光学厚度约不大于 0.8 的情况下 R 的值变化很小 (见图 2)。

模拟试验还发现, 对于这种均一光谱反射率的情形, 当地表反射率 ρ 的数值位于约 2% 至 20% 之间时, 这三类气溶胶的反射辐亮度, 以及 D 和 R 的曲线的变化特征及形状均保持不变。但是, 如果地表反射率 ρ 更高, 比如, 高于 25% 左右, 图 1 中的曲线则变得趋于平直, 不再明显地呈现出上述的特征 (也就是说, 此时强烈的地表反射也会几乎将气溶胶层的反射信息的特征“淹没”掉了), 此时, 本文中提出的观测方法不再适用。

3.3 实际地表反射率的情形

上一小节中是假定的均一光谱反射率的情形,

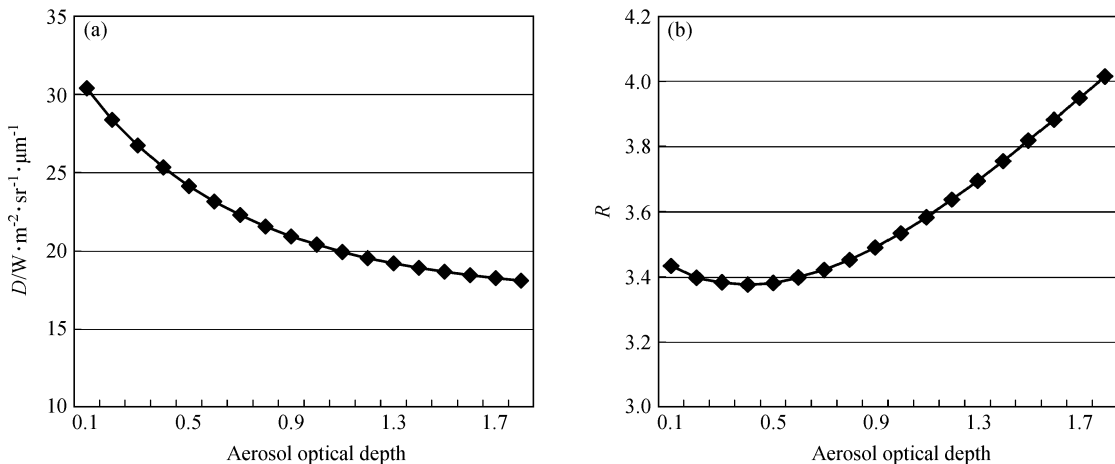


图 2 模拟计算出的黑碳气溶胶的 D 和 R

Fig. 2 Simulation of the effects of carbonaceous aerosol on D and R

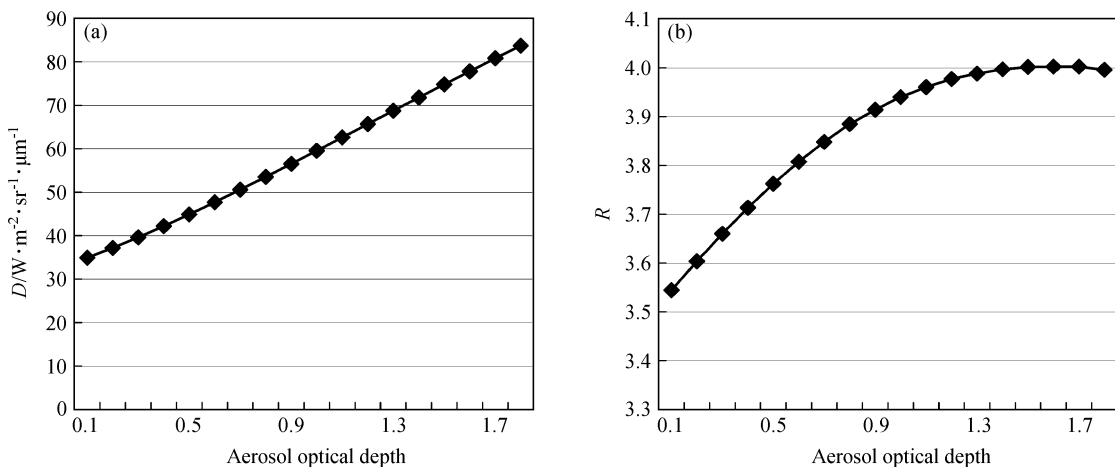
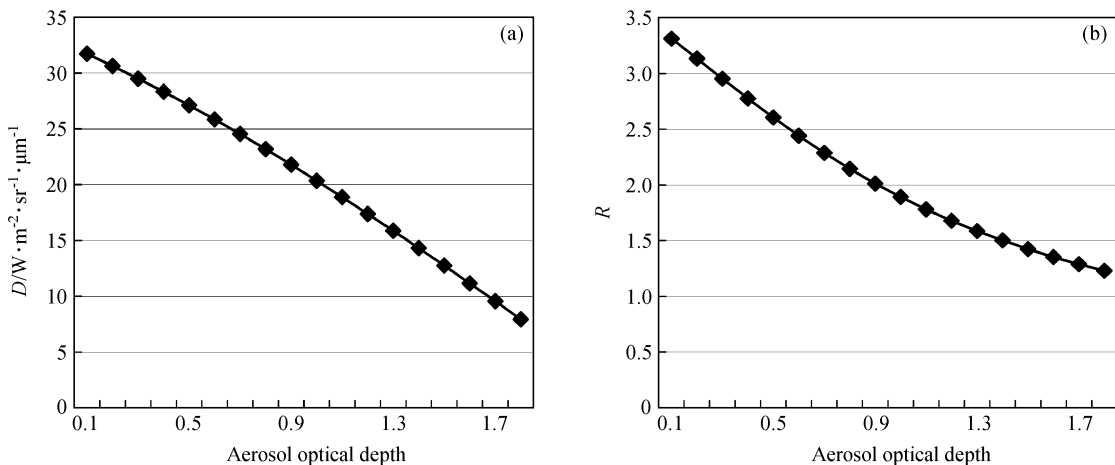


图 3 模拟计算出的硫酸盐气溶胶的 D 和 R

Fig. 3 Simulation of the effects of sulfate aerosol on D and R

图4 模拟计算出的沙尘气溶胶的 D 和 R Fig. 4 Simulation of the effects of dust aerosol on D and R

实际的地表反射情况可能会与此有些差异, 因此在这一小节中我们将地表反射的情况区分得更详细些。在陆地地表上, 地面反射率类型大致可分为土壤(沙地, 即无植被的情形), 有植被覆盖, 以及被雪覆盖三类情形。由于被雪覆盖的情况出现得较少, 我们重点研究前两种, 即无植被和有植被的情况。对黑碳、硫酸盐和沙尘三类气溶胶模拟计算出的 D 和 R 的变化情况分别绘于图 5、图 6 和图 7。除地表反射率类型外, 计算中所取的其它各项控制条件(参数)与 3.2 小节中的均相同。

从图 5~7 中可见, 对于硫酸盐气溶胶, 随着其光学厚度的逐渐增大, D 和 R 都呈现为明显上升的趋势; 对于沙尘气溶胶, D 和 R 则都有明显的下降; 而对于黑碳气溶胶, R 在光学厚度约不大于 1 时变化很小。这些特征与上一小节的均一光谱反射率的情形完全相同。但是对于黑碳气溶胶, D 的变化情况又有所差异, D 在这里表现为上升的趋势, 而不是上一小节中的下降趋势。

由于植被通常在近红外波段有较强的反射, 使得 $I_{0.85}$ 较大, 因而使 D 的值很小(指代数值, 而非绝对值, 见图 5c、图 6c 和图 7c); R 的值也比均一光谱反射地表和无植被地表情形下的值要小(见图 5d、图 6d 和图 7d)。

3.4 太阳、卫星相对几何位置的影响

经过敏感性试验发现, 当卫星的天顶角在从 0° 到约 50° 范围之间变化时, 对于这三类气溶胶, D 和 R 的数值虽然会有所变化, 但其随光学厚度的逐渐增大而呈现出来的相对变化趋势不会改变; 当卫

星的天顶角大于约 50° 时, 情况变得较为复杂, R 随光学厚度的变化不再是单调的, 而是呈现出有些起伏和波动(尤其是黑碳气溶胶)。卫星相对于太阳入射光的方位角, 经试验发现, 在从 0° 到 180° 范围之间变化时, 都不会影响 D 和 R 的变化趋势。太阳的天顶角和方位角的变化也不会影响到 D 和 R 随光学厚度的相对变化趋势(当然, 太阳的高度角也不能太小, 否则就必须考虑到用模式模拟时的平面平行大气的假设条件与实际情形的差异。只要太阳的高度角大于约 10° , 即天顶角小于约 80° , 本文中提出的方法均是可行的)。

3.5 综合分析

综合以上所做的敏感性试验, 可以将结果归纳为: 当卫星的视角(天顶角)小于约 50° , 以及地表反射率 ρ 约小于 20% 的情形下, 黑碳气溶胶的存在使得从 $0.4 \mu\text{m}$ 到 $3.7 \mu\text{m}$ 光谱范围内所有 15 个计算通道上的反射辐亮度减小; 硫酸盐气溶胶则会使反射辐亮度增大; 沙尘气溶胶则在约 $0.6 \mu\text{m}$ 至 $0.85 \mu\text{m}$ 光谱范围内反射较强。随着气溶胶光学厚度的逐渐增大, 硫酸盐气溶胶的存在会使 D 和 R 的值都呈现出明显上升的趋势, 而沙尘气溶胶则会使 D 和 R 的值明显的下降。对于黑碳气溶胶, 当其光学厚度小于约 0.8 时, R 的值几乎不变, 而 D 的变化情况会因不同的地表反射率类型而有所不同。另外, 模拟试验还发现, 改变气溶胶层的高度位置不会影响 D 和 R 的变化趋势。

关于混合气溶胶模型条件下的情况, 研究中除了三类单纯的气溶胶外, 还考虑到了以沙尘成分为

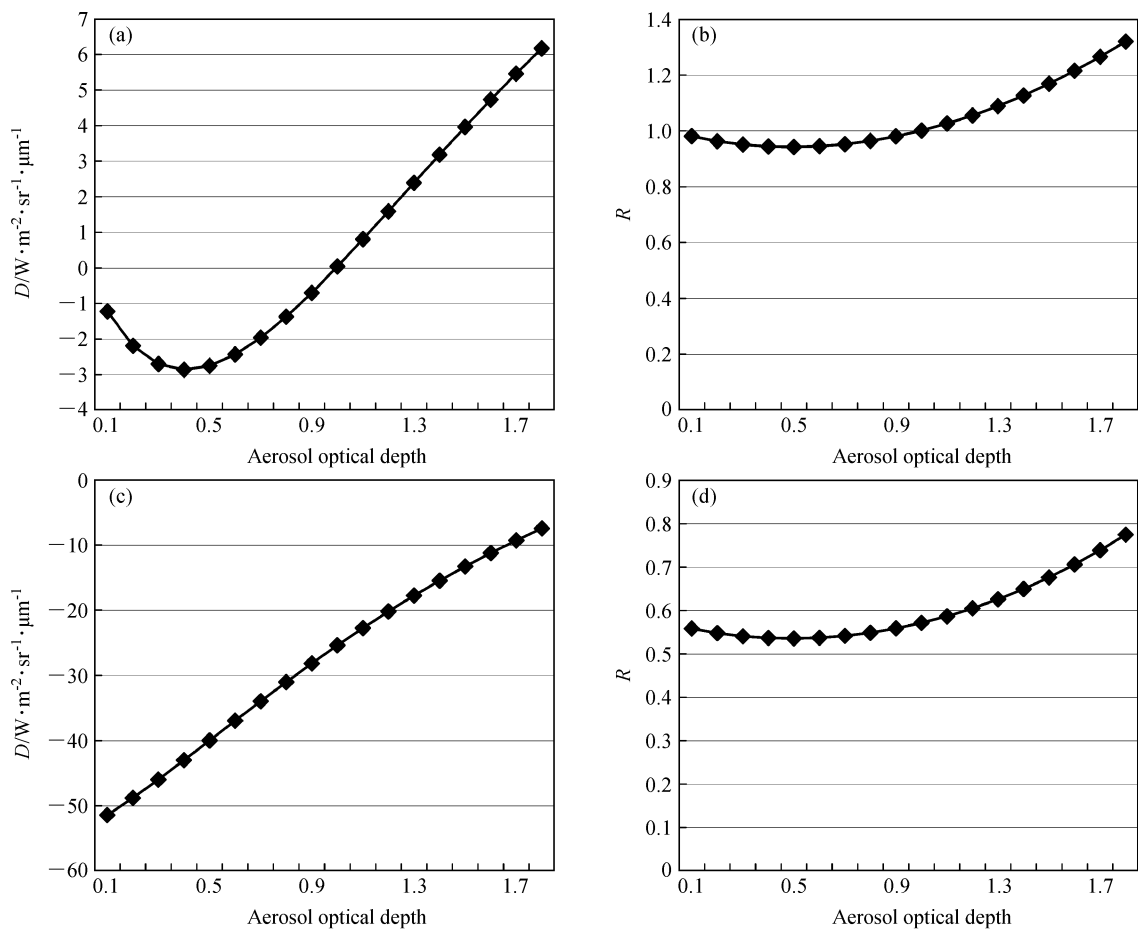


图5 模拟计算出的黑碳气溶胶的 (a、c) D 和 (b、d) R : (a、b) 无植被覆盖的地表; (c、d) 有植被覆盖的地表

Fig. 5 Simulation of the effects of carbonaceous aerosol on (a, c) D and (b, d) R : (a, b) Surface without vegetation; (c, d) surface covered with vegetation

主同时混合了其它两类气溶胶的情形, 其中沙尘气溶胶的权重从最小的 70% 直到最大的 99.99% (即几乎已是纯沙尘成分), 结果表明即使是当沙尘成分只占到 70% 时, D 和 R 的曲线仍能呈现出较为明显的沙尘成分的特征, 即此时仍然能够将其识别出来。

综合考虑均一光谱反射, 无植被以及有植被这三类地表反射率类型的情形, 可以发现, 虽然对于不同的地表反射类型 D 和 R 的具体数值可以有较大的差异, 但其随气溶胶光学厚度的相对变化趋势不会改变。

4 “动态”观测与反演方法

依据上一节中的敏感性试验的结果, 可以提出一种遥感观测气溶胶的方法, 即通过分析卫星探测器观测到的 $0.5 \mu m$ 和 $0.85 \mu m$ 波长通道处的地气

系统的反射辐亮度 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ 的差值 D 和比值 R , 跟踪其随气溶胶光学厚度的逐渐变化而呈现出来的不同的变化趋势, 便可以识别出气溶胶的类型。在具体的实际工作中, 与传统的利用太阳短波反射辐射遥感气溶胶的方法相类似, 也是首先将对 $0.5 \mu m$ 和 $0.85 \mu m$ 波长反射辐射有贡献的所有控制因素, 比如太阳、卫星的天顶角和方位角, 地表反射类型及反射率, 目标地点海拔高度 (或地表气压), …… , 进行汇总, 利用大气辐射传输模式进行计算, 将计算结果汇编成一个查算表 (即 Look-up Table), 当需要进行气溶胶的反演计算时, 根据卫星观测得到的反射辐射资料以及各个控制因素的数值的大小, 到表中查出相应的气溶胶光学厚度的数值。

但是, 一个新的问题随之而来。在上面的敏感性试验中, 是以逐渐变化的光学厚度作为输入值

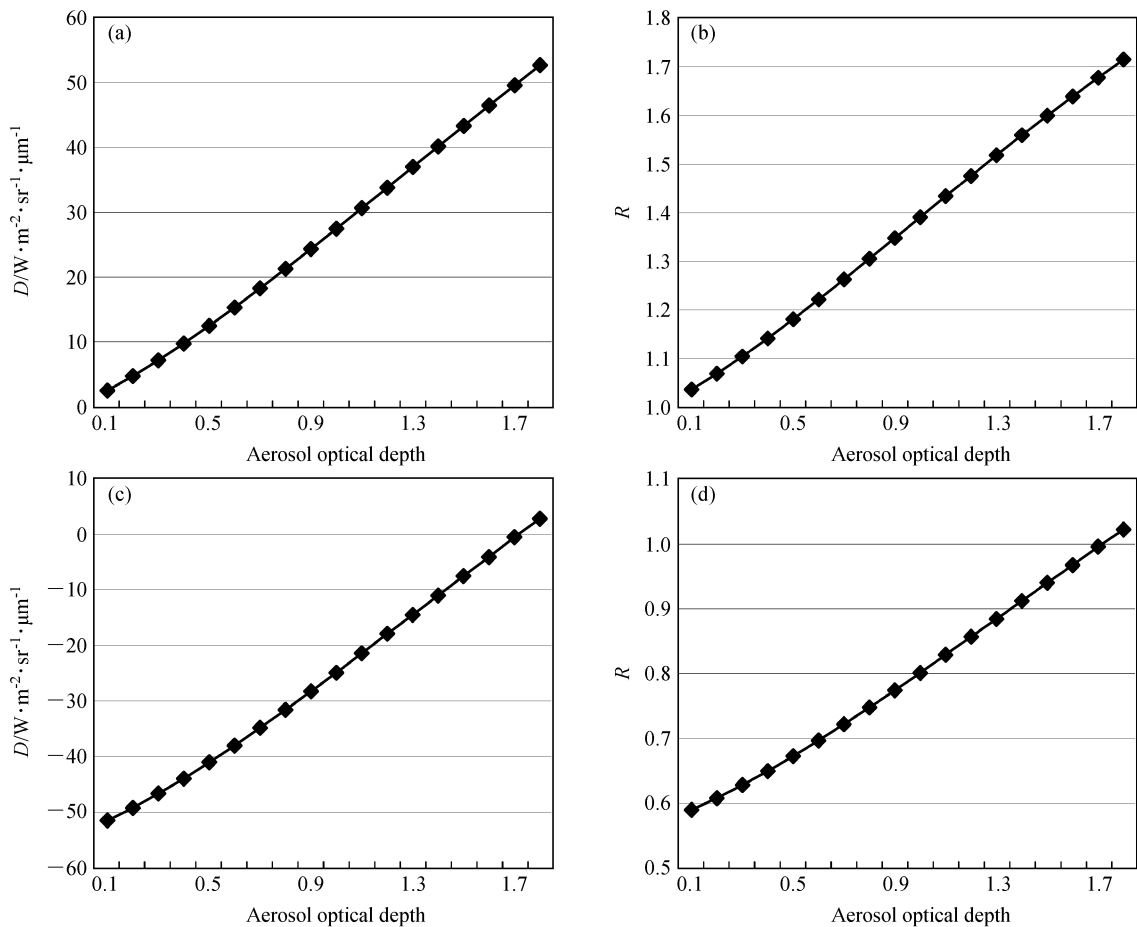


图 6 同图 5，但为硫酸盐气溶胶

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for sulfate aerosol

(实际计算中是以从 0 到 1.8，即逐渐增加的光学厚度作为输入值)，从而发现了这三类不同性质的气溶胶对于 D 和 R 有着不同的影响趋势，但是在实际的大气遥感工作中，在某个特定的观测时刻，气溶胶层的光学厚度的数值是固定的，而并非像上面的敏感性试验中那样呈现出一个理想的变化趋势，没有气溶胶光学厚度的变化趋势，怎么才能区分出气溶胶的类型？

对于这一问题的解决，以沙尘气溶胶为例，可以考虑当沙尘天气发生时的实际情形。事实上，当沙尘天气发生时，特别是当沙尘刚刚来临时，往往在一、二个小时，甚至不到一个小时的时间内，光学厚度从最初的一个很小的数值（比如，接近于 0），在这相对比较短的时间内迅速增加到一个很大的数值，可以通过分析在这相对较短的时间内（即气溶胶光学厚度迅速变化的这一段时间内） D 和 R 的变化趋势的走向，识别出沙尘气溶胶的类型。这

就要求卫星观测必须持续一段时间，而不能是仅仅在某个时刻进行观测，而且在这段观测时段内气溶胶层的光学厚度必须有明显的变化，即对气溶胶层进行一段时间的连续的“动态”观测（而不能仅仅是某个时刻的“静态”观测），获得一系列 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ ，以及 D 和 R 随时间的变化的数据，通过分析 D 和 R 的变化趋势，便可以识别出气溶胶的类型。这一方法还要求在这段观测时间内卫星的相对位置基本保持不变，因为敏感性试验显示卫星的相对位置也会影响观测结果。目前似乎只有地球静止卫星能满足这一要求。除了可以识别气溶胶的类型外，还可以根据 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ 的具体的数值大小，查算表 (Look-up Table) 中查找到对应的气溶胶层的光学厚度。对于其它类型的气溶胶（如硫酸盐、黑碳气溶胶），当其浓度（光学厚度）发生变化时，也可以用类似的方法加以识别。

虽然本文的敏感性试验中将光学厚度取为从 0

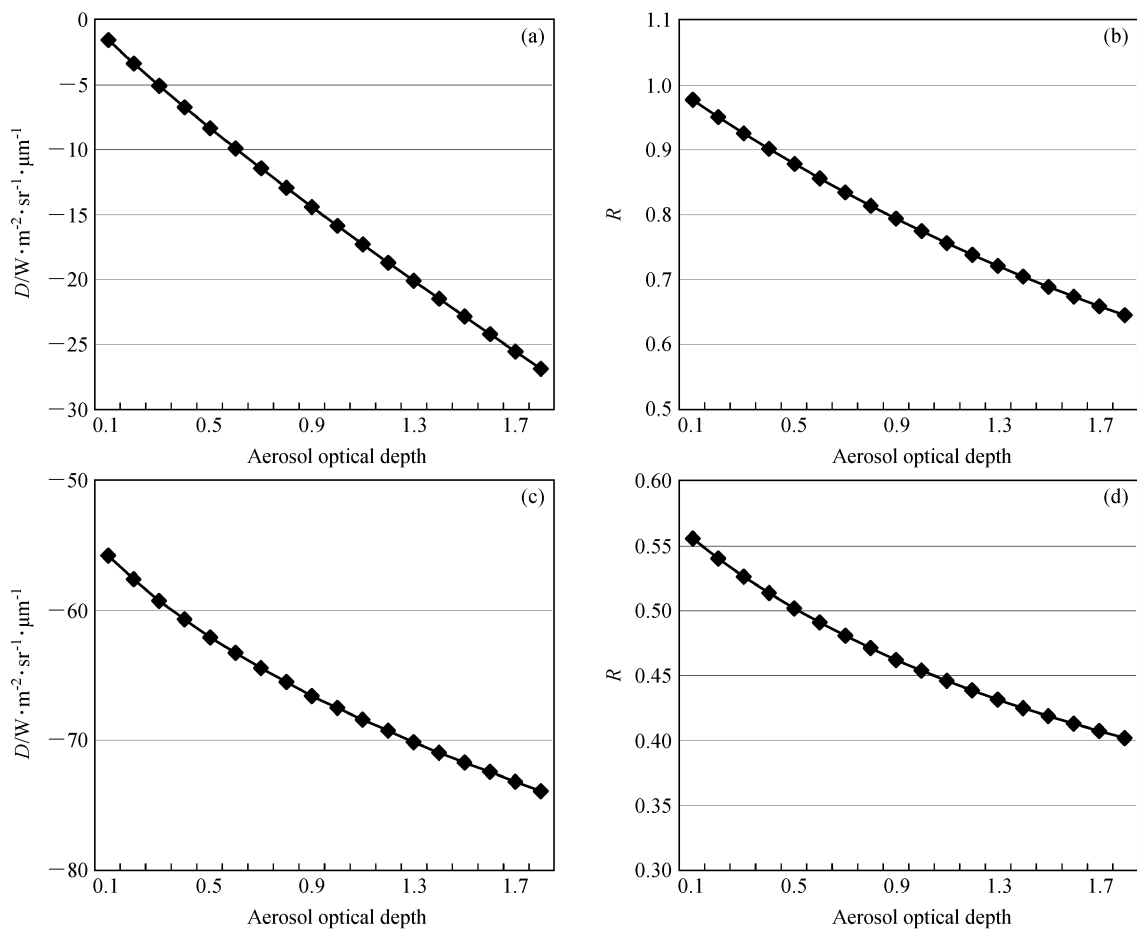


图7 同图5, 但为沙尘气溶胶

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for dust aerosol

逐渐变化到 1.8, 但考虑到实际大气中的情形, 硫酸盐和黑碳气溶胶的光学厚度较少能达到 1.2~1.5 这样一个较大的数值, 而沙尘气溶胶的光学厚度却可以在很多情况下超过 1.5 (如发生沙尘天气或沙尘暴的情况), 虽然它们之间有这样的不同, 从敏感性试验的结果可以看出, 即使光学厚度只发生一个较小的变化 (比如 0.3 左右), 就足以从其所引起的 D 和 R 的变化趋势中识别出气溶胶的类型。这就意味着本文提出的观测方法不仅仅能适用于上面例举的在其生成过程中光学厚度会发生很大变化的强沙尘天气的情形, 即使对于那些在其发生过程中光学厚度变化不太大的情形, 如程度较轻的浮尘、扬沙天气, 以及污染物 (气溶胶) 随气流漂向某地上空的情形等, 仍然可以用此方法识别出其类型, 所以说本文中提出的观测方法可以适用于较为广泛的情形。

需要说明的是, 判断气溶胶的类型需要有光学

厚度的变化, 只要光学厚度发生一定的变化, 从而使 D 和 R 发生变化, 就可以据此识别出气溶胶的类型, 在这一步骤中并不需要知道光学厚度的精确的数值, 只要能粗略地知道在某个地区上空在某个时间段内气溶胶正在发生 (或正在消散), 观察在这一时间段内 D 和 R 的变化趋势就可以判断出气溶胶的类型, 确定了气溶胶的类型之后, 就可以在针对该种气溶胶所做的查算表中查出较为精确的光学厚度的数值, 也就是说, 并非在反演工作的一开始就需要精确确定光学厚度的数值。归纳起来, 可以按以下的步骤进行实际的反演工作: ①粗略得知气溶胶层的光学厚度正在逐渐发生变化, 即某个地区上空气溶胶事件正在逐渐发生或正在逐渐消散, 可以有很多方法做到这一点, 比如, 很多波段的卫星实际观测资料中都能够显示出光学厚度的变化, 甚至可以凭观测者的直观经验发现这一点。②有了光学厚度的粗略的变化趋势, 就可以根据在这一时

间段内 D 和 R 的变化的走势定性地判断出气溶胶的类型。③在确定了气溶胶的类型之后, 再利用与该类气溶胶有关的查算表定量地反演计算出其光学厚度的精确的数值。

5 总结与讨论

本文中提出了一种从空中平台上遥感观测气溶胶的方法, 即通过分析 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 双通道反射辐射 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ 的差值 D 和比值 R 来识别气溶胶的类型, 并可进一步反演计算出其光学厚度, 通过敏感性试验证明了其可行性。

在众多的气溶胶类型当中, 选择了由最基本化学成分组成的三类“基本”气溶胶, 即黑碳气溶胶、硫酸盐气溶胶和沙尘气溶胶进行研究, 因为对它们的详细研究是进行几乎所有种类陆面上空气溶胶遥感的基础, 大部分的内陆气溶胶主要都是由这三类基本成分按不同百分比混合而成的。

在数学处理上, 本文采用了一种与气溶胶指数 (AI 指数) 类似的求两个通道辐射比的方法, 但在形式上更简洁, 略去了取对数运算。另外, 还同时考察了两个通道辐射之差的变化趋势。

传统的利用短波反射辐射遥感陆面上空气溶胶的方法存在着两个主要的缺陷, 一是不易剔除地表反射的影响, 二是虽然可以反演出气溶胶层的光学厚度, 但无法区分出气溶胶的类型。本文提出的利用双通道“动态”观测气溶胶的方法, 由于在处理上对双通道的辐射值 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ 进行了求取差值 D 和比值 R 的运算, 在定性识别气溶胶类型这一问题上便可以“绕过”地表反射率这一不确定性因素的影响。

通过敏感性试验发现, 对于不同类型的气溶胶, 随着其光学厚度的逐渐增大, $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 波长通道处的反射辐射 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ 的差值 D 及比值 R 呈现出截然不同的变化趋势: 对于硫酸盐气溶胶, D 和 R 均有明显的上升; 对于沙尘气溶胶, D 和 R 均有明显的下降; 当光学厚度约小于 $0.8 \sim 1$ 的情况下, 黑碳气溶胶对 R 几乎没有影响。据此便可以将这三类气溶胶彼此区别开来, 理论上还可以通过分析 $I_{0.5}$ 和 $I_{0.85}$ 的值和使用查算表 (Look-up Table) 反演出气溶胶的光学厚度。而且, 无论对于哪一类地表反射率类型 (即无论是均一光谱反射率的地表, 无植被地表亦或是有植被覆盖的地表), 该方法都是适用的, 在识别气溶胶类型的问题上都可

遵循相同的判别准则, 即 D 和 R 随气溶胶光学厚度的变化趋势。虽然对于不同的地表类型, D 和 R 的具体数值会有所不同, 但其相对变化的趋势不会改变。改变气溶胶层的高度位置不会影响 D 和 R 的变化趋势。

本文提出的观测方法要求必须对气溶胶层进行一段时间的连续观测, 在这一时间段内, 气溶胶层的光学厚度必须要有显著的变化, 即进行一段时间的“动态”观测, 而不能是仅仅在某个时刻的“静态”观测, 这就要求卫星的观测必须要能够捕捉到气溶胶光学厚度发生明显变化的那一时间段。另外, 该方法还要求在这一时间段内卫星对于地面目标地点的相对几何位置基本保持不变, 因为卫星的相对位置也会影响观测结果。卫星的视角 (天顶角) 必须小于约 50° , 太阳的天顶角必须小于约 80° , 地表反射率不能高于约 20% 。虽然该方法的实施有以上诸多条件上的限制, 但对于大多数的观测情况而言, 这些条件都是比较容易满足的。地球静止卫星将能满足这些观测条件上的要求。

敏感性试验的结果表明, 即使光学厚度只发生一个较小的变化 (比如 0.3 , 甚至可以小于 0.3), 就足以从其所引起的 D 和 R 的变化趋势中识别出气溶胶的类型。这就意味着该观测方法可以适用于较为广泛的情形。归纳起来, 可以按以下的步骤进行实际的反演工作: ①粗略地得知气溶胶层的光学厚度正在逐渐发生变化, 可以有很多方法做到这一点, 比如, 很多波段的卫星实际观测资料中都能够显示出光学厚度的变化, 甚至可以凭观测者的直观经验发现这一点。②有了光学厚度的粗略的变化趋势, 就可以根据在这一时间段内 D 和 R 的变化的走势定性地判断出气溶胶的类型。③在确定了气溶胶的类型之后, 再利用与该类气溶胶有关的查算表定量地反演计算出其光学厚度的精确数值。

模拟计算还发现, 并非只有 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 这一对波长通道能够将上述三类气溶胶区别开来, 其它如 $0.4 \mu\text{m}$ 或 $0.45 \mu\text{m}$ 与 $1.06 \mu\text{m}$ 、 $1.22 \mu\text{m}$ 或 $1.6 \mu\text{m}$ 通道等的搭配组合也能够使相应的差值 D 及比值 R 对于不同类型的气溶胶显示出不同的变化特征, 但我们仍以 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.85 \mu\text{m}$ 这一对波长通道为主进行研究, 因为这两个波长比较靠近太阳辐射的峰值波长 (约 $0.55 \mu\text{m}$ 左右), 因而能量较大, 易于观测。

参考文献 (References)

- 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.*, 102 (D14): 16911 – 16922, doi: 10.1029/96JD03680.
- Hsu N C, Herman J R, Bhartia P K, et al. 1996. Detection of biomass burning smoke from TOMS measurement [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23: 745 – 748, doi: 10.1029/96GL00455.
- Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. 1997. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 17051 – 17067.
- Kaufman Y J, Karnieli A, Tanre D. 2000. Detection of dust over deserts using satellite data in the solar wavelengths [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (1): 525 – 531.
- 黎洁, 毛节泰. 1989. 光学遥感大气气溶胶特性 [J]. *气象学报*, 47 (4): 450 – 456. Li Jie, Mao Jietai. 1989. Inverse of the property of atmospheric aerosols by optical remote sensing [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 47 (4): 450 – 456.
- Longtin D R, Shettle E P, Hummel J R, et al. 1988. A wind dependent desert aerosol model: Radiative properties [R]. AFGL-TR-88-0112, AD-A201 951.
- 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. Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. 2002. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (5): 625 – 634.
- Pierluissi J H, Maragoudakis C E. 1986. Molecular transmission band models for LOWTRAN [R]. AFGL-TR-86-0272, AD-A180 655.
- 邱金桓. 1995. 从全波段太阳直接辐射确定大气气溶胶光学厚度 I. 理论 [J]. *大气科学*, 19 (4): 385 – 394. Qiu Jinhuan. 1995. A new method of determining atmospheric aerosol optical depth from the whole-spectral solar direct radiation. Part I: Theory [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 19 (4): 385 – 394.
- 邵鸿飞, 毛节泰. 1999. 适于反演陆面大气气溶胶光学厚度的物理量 [J]. *中国科学技术大学学报*, 29 (6): 684 – 690. Shao Hongfei, Mao Jietai. 1999. A new dimensionless parameter suitable for retrieving atmospheric aerosol optical depth on land [J]. *Journal of University of Science and Technology of China* (in Chinese), 29 (6): 684 – 690.
- Tanre D, et al. 1988. Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S) [R]. Laboratoire d'Optique Atmosphérique Université des Sciences et Techniques de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.
- 许黎, 樊小标, 石广玉, 等. 1998. 对流层平流层气溶胶粒子的形态和化学组成 [J]. *气象学报*, 56 (5): 551 – 559. Xu Li, Fan Xiaobiao, Shi Guangyu, et al. 1998. Morphological feature and chemical composition of individual particles in the troposphere and stratosphere [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 56 (5): 551 – 559.