

利用 NOAA 卫星资料估算陆地沙尘量的方法

郑新江¹, 陈渭民², 方翔¹, 罗敬宁¹

(1. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 提出一种利用 NOAA 卫星可见光通道估算北方干旱陆地上空沙尘含量的方法。该方法考虑到在短时间内某一固定区域的地面反射率变化较小, 因此可以利用沙尘暴发生和晴空 2 个不同时刻卫星测量到的这一像素区的辐射值来消除地面反射率的影响, 估算陆地上空沙尘暴的光学厚度。在 2002 年 4 月 6 日左右沙尘暴发生期间, 利用该方法计算的沙尘光学厚度与载沙量的结果和同步观测的 TSP 值与地面气象数据在趋势与分布上是一致的。

关键词: 气象卫星; 光学厚度; 沙尘量

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2008)02-0035-04

0 引言

沙尘暴对人类的生存环境有严重影响。沙尘与太阳和大气辐射相互作用, 改变了大气中能量分布, 影响着全球气候。由于沙尘的时空变化大, 沙尘的源地多是人烟稀少的沙漠地区, 观测资料少, 因此, 通常将气溶胶的光学厚度或浑浊度作为大气中尘埃多少的一个指标^[1], 沙尘量的估算可归结为气溶胶的光学厚度或浑浊度的估算。20 世纪气象卫星的出现, 为监测大范围沙尘暴天气提供了有利条件, 从卫星云图上可以清楚地观测到沙尘暴的源地、路径和浓度。进入 21 世纪后, 卫星探测技术迅速提高, 卫星资料处理方法不断改进, 定量提取沙尘含量的空间分布成为可能。但受地面反射率的影响, 目前由卫星资料定量提取沙尘量的方法主要限于洋面, 这是因为洋面比较均一, 下垫面反射率影响小。主要方法有查表法、近似法及统计法 3 种^[1-9]。但对于陆地, 这 3 种方法均有较大的局限性。

为了减少地面反射率的影响, 国内外有关研

究者提出了利用湖泊或河流与陆地相对比的方法, 将水面的反射率作为参照, 从而获取沙尘量。但是, 对于我国沙尘暴频繁发生的北方地区, 由于河流和湖泊很少, 这一方法难以实行。为此, 本文提出一种新的沙尘量估算方法, 即利用沙尘暴发生和晴空 2 个不同时刻卫星测量到的同一像素区的辐射值来消除地面反射率对估算沙尘量的影响, 其估算结果与地面观测资料推算的结果较为一致。

1 基本原理

卫星在某一时刻观测到的辐射是来自仪器视场内大气和地面各目标辐射的总和。如图 1 所示, 假定视场内考虑到大气是水平均匀各向同性的, 入射至大气层顶的大气辐射为 F_0 ; ρ_a 和 T_a 为大气层的反射函数和透射(直接 + 漫透射)函数(T_a^\uparrow 和 T_a^\downarrow 分别为向上和向下透射函数); ρ_g 为地面的方向反射函数, 则到达卫星的方向反射率表示为

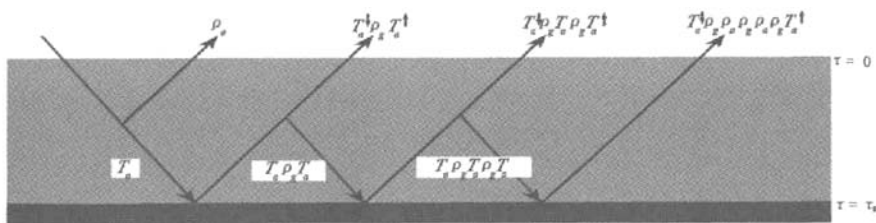


图 1 经大气和地面多次反射到达大气顶的辐射

收稿日期: 2007-09-10; 修订日期: 2008-01-11

基金项目: 中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象科学研究基金资助项目, 南京信息工程大学江苏省开放实验室资助项目。

$$\rho_{\text{Sat}} = \rho_a + T_a^{\downarrow} \rho_g T_a^{\uparrow} + T_a^{\downarrow} \rho_g \rho_a \rho_g T_a^{\uparrow} + T_a^{\downarrow} \rho_g \rho_a \rho_g \rho_a \rho_g T_a^{\uparrow} + \dots = \rho_a + T_a^{\downarrow} \rho_g T_a^{\uparrow} (1 - \rho_a \rho_g)^{-1} \quad (1)$$

由于假定大气各向同性,在沙尘暴发生期间的且考虑到辐射量与时间的关系,对于同一像素相对向上和向下透射函数近似相等,即 $T_a^{\downarrow} \approx T_a^{\uparrow} \approx T_a$, 于时刻 t_1, t_2 的卫星测量方向反射率为

$$\begin{cases} \rho_{\text{Sat}}(t_1) = \rho_a(t_1) + \rho_g(t_1) T_a^2(t_1) [1 - \rho_a(t_1) \rho_g]^{-1} \\ \rho_{\text{Sat}}(t_2) = \rho_a(t_2) + \rho_g(t_2) T_a^2(t_2) [1 - \rho_a(t_2) \rho_g]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

假设 t_1 至 t_2 期间 ρ_g 不变,式(2)整理得

$$\begin{cases} \rho_{\text{Sat}}(t_1) - \rho_a(t_1) = \rho_g [T_a^2(t_1) + \rho_{\text{Sat}}(t_1) \rho_a(t_1) - \rho_a^2(t_1)] \\ \rho_{\text{Sat}}(t_2) - \rho_a(t_2) = \rho_g [T_a^2(t_2) + \rho_{\text{Sat}}(t_2) \rho_a(t_2) - \rho_a^2(t_2)] \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)消去 ρ_g 得

$$\begin{aligned} [\rho_{\text{Sat}}(t_1) - \rho_a(t_1)] [T_a^2(t_2) + \rho_{\text{Sat}}(t_2) \rho_a(t_2) - \rho_a^2(t_2)] = \\ [\rho_{\text{Sat}}(t_2) - \rho_a(t_2)] [T_a^2(t_1) + \rho_{\text{Sat}}(t_1) \rho_a(t_1) - \rho_a^2(t_1)] \end{aligned} \quad (4)$$

2 沙尘光学厚度与载沙量的计算

晴天大气的透过率 T_{clear} 为

$$T_{\text{clear}} = \exp(-\tau_{\text{clear}}/\mu) \quad (5)$$

式中, τ_{clear} 为晴空大气的光学厚度; μ 为散射角的余弦,且

$$\tau_{\text{clear}} = \tau(\text{Rayl}) + \tau(\text{H}_2\text{O}) + \tau(\text{O}_2) + \tau(\text{O}_3) \quad (6)$$

式中, $\tau(\text{Rayl})$ 、 $\tau(\text{H}_2\text{O})$ 、 $\tau(\text{O}_2)$ 及 $\tau(\text{O}_3)$ 分别为瑞利散射以及水汽、氧气及臭氧吸收的光学厚度。

有沙尘暴发生时,大气的透过率 T_{total} 为

$$T_{\text{total}} = T_{\text{clear}} \cdot T_{\text{sand}} = \exp[-(\tau_{\text{clear}} + \tau_{\text{sand}})/\mu] \quad (7)$$

式中, T_{sand} 为沙尘大气的透过率; τ_{sand} 为沙尘气溶胶的光学厚度,计算方法为

$$\tau_{\text{sand}} = \tau_{\text{total}} - \tau_{\text{clear}} \quad (8)$$

$$\rho_{\text{Sat}}(t_1) \{ \rho_{\text{Sat}}(t_2) [1 - T_a(t_2)] + 2T_a(t_2) - 1 \} = \rho_{\text{Sat}}(t_2) - 1 + T_a(t_2) \quad (10)$$

即

$$T_a(t_2) = [\rho_{\text{Sat}}(t_2) + \rho_{\text{Sat}}(t_1) - \rho_{\text{Sat}}(t_1) \rho_{\text{Sat}}(t_2) - 1] [2\rho_{\text{Sat}}(t_1) - \rho_{\text{Sat}}(t_1) \rho_{\text{Sat}}(t_2) - 1]^{-1} \quad (11)$$

由式(7)得光学厚度为

$$\tau_{\text{sand}} = -\mu \ln [\rho_{\text{Sat}}(t_2) + \rho_{\text{Sat}}(t_1) - \rho_{\text{Sat}}(t_1) \rho_{\text{Sat}}(t_2) - 1] [2\rho_{\text{Sat}}(t_1) - \rho_{\text{Sat}}(t_1) \rho_{\text{Sat}}(t_2) - 1]^{-1} \quad (12)$$

由于 $\rho_{\text{Sat}}(t_1)$ 和 $\rho_{\text{Sat}}(t_2)$ 小于 1, 其乘积较 $\rho_{\text{Sat}}(t_2)$ 或 $\rho_{\text{Sat}}(t_1)$ 小 1~2 个数量级, 因此, 式(12)近似为

$$\tau_{\text{sand}} \approx -\mu \ln [\rho_{\text{Sat}}(t_2) + \rho_{\text{Sat}}(t_1) - 1] [2\rho_{\text{Sat}}(t_1) - 1]^{-1} \quad (13)$$

由光学厚度计算含沙量 (M , 单位为 g/m^2)^[2],

即

$$M = 0.04 f_d \omega_0 \tau_{\text{sand}} \quad (14)$$

垂直方向的光学厚度 $\tau_{\text{sand}}(0)$ 为

$$\tau_{\text{sand}}(0) = \tau_{\text{sand}}(\mu_{\text{sun}} + \mu_{\text{sat}}) \quad (9)$$

式中, μ_{sun} 和 μ_{sat} 分别为太阳、卫星天顶角的余弦。根据文献[11], 对于中纬度冬季的 NOAA-16 卫星可见光波段: $\tau(\text{Rayl}) = 0.0568$; $\tau(\text{H}_2\text{O}) = 0.0031$; $\tau(\text{O}_2) = 0.0007$; $\tau(\text{O}_3) = 0.0342$ 。而对于沙尘暴发生期间, 据文献[12], 在 1987 年 3 月 3 日用太阳光电计测量, 波长 $0.64 \mu\text{m}$ 处, 轻度沙尘的 $\tau_{\text{sand}}(0.64 \mu\text{m}) = 0.8$; 1987 年 4 月 17 日, $\tau_{\text{sand}}(0.64 \mu\text{m}) = 2.4$ 。

假定 t_1 为晴天大气的时刻, t_2 为沙尘暴发生的时刻, 在可见光波段, 与沙尘暴发生时的大气相比较, 在可见光区晴天大气的反射率 $\rho_a(t_1) \approx 0$, 晴天大气的透射率 $T_a(t_1) \approx 1$ 。另外, 相对于沙尘暴发生时的大气, 根据文献[12]知, 波长 $0.64 \mu\text{m}$ 处的单次反照率为 0.96 (Banizombuu)。因此, 可以假定沙尘气溶胶的吸收很小, 即 $\rho_a(t_2) \approx 1 - T_a(t_2)$, 则由式(4)简化得

式中, $f_d = 1.43(1 - r \cdot h)^{0.7}$, $r \cdot h$ 为当日北京时间早 8 点的地面相对湿度, 且 $0.4 \leq r \cdot h \leq 0.9$ 。
 $\omega_0 \approx 0.96$, 为单次反照率。

3 具体步骤

(1)从 NOAA 可见光卫星资料上寻求沙尘发生季节的晴空像素(这些像素应是反照率最小,一般从常规资料取能见度大于 10 km 的天气),并构成一幅晴空地表图;

(2)求出晴空区的卫星辐射值;

(3)利用文献[13,14]中方法判识沙尘区,求出实时卫星图沙尘发生区卫星接收的辐射值;

(4)利用精定位级数对像素进行对准处理,确定同一地区所对应的像素值;

(5)由卫星测量值计算沙尘光学厚度;

(6)由光学厚度计算含沙量。

4 实验结果分析

受蒙古气旋的影响,2002 年 4 月 5~9 日,蒙古国中东部,我国西北部分地区、华北大部与东北部分地区出现了一次以沙尘暴为主的大范围沙尘天气。

插页彩片 19 为 NOAA-16 卫星 4 月 6 日 13 时(北京时间,下同)的沙尘暴监测图,图中土黄色的区域为沙尘区。可以分析出,蒙古国中东部,内蒙古中东部以及河北北部等地区均受到了沙尘的影响。利用本文方法对此时刻的沙尘光学厚度与载沙量进行了计算(插页彩片 20,21)。从插页彩片 20 的标尺上可以分析出,沙尘区的光学厚度在 1.0~3.0 之间(蓝色~橘黄色之间),其中深红色的区域光学厚度大于 3.0,主要位于内蒙古的二连浩特和浑善达克沙地一带。从插页彩片 21 上分析,沙尘含量为 20~30 t/km² 气柱,其中黄色区域在 50~80 t/km² 气柱之间,与光学厚度最大区域一致。

大气颗粒物测定仪(DDM-LD-3K)可用来测定大气气溶胶的质量浓度。根据国家环保总局测定的同时刻(4 月 6 日 12 时~14 时平均值)二连浩特与集宁市两地的 TSP 值(总悬浮颗粒浓度)(插页彩片 21),可以分析出,二连浩特 TSP=22 113 μg/m³,正好位于沙尘含量最大的地区边缘,而集宁市的 TSP=760 μg/m³,正好位于插页彩片 21 中沙尘含量最小的地区边缘(蓝色区域),二者相差约 30 倍。因此认为,卫星反演的沙尘含量值的大小与地面仪器观测结果的多少在分布趋势上是一致的。图 2 是相近时刻地面气象观测数据,从图上也可分析出,地面纪录的沙尘暴、强沙尘暴区域与遥感光学厚度最大和含沙量最多的区域相一致。



图 2 2002 年 4 月 6 日 14 时地面观测图

5 误差讨论

由于本工作涉及到大气与陆表两方面的参数,因此产生误差的原因可能有:

(1)在求取沙尘暴光学厚度中,略去了大气分子的光学厚度,有可能造成一定计算误差,但根据有关工作^[12],对于中纬度地区 NOAA-16 大气分子的光学厚度为 0.094 4 左右,相对沙尘暴的光学厚度要小大约 2 个数量级,一般轻度沙尘的光学厚度在 0.8~2.0 之间,而重度沙尘暴在 2.0 以上,相比影响误差不明显。

(2)本文引用的有关大气参数均来自美国的研究结果,是否符合我国情况,需要进一步对比分析。

(3)本工作假定一定区域在短期内反照率不会改变,但是当植被发生变化或经历一次降水后,地面反照率均可能发生变化。

(4)当所选择的晴空区内有少量云存在时,需要对云进行剔除,并用周围地表反照率进行内插,也将会对计算结果产生影响。因此,需要建立沙尘暴多发地区的晴空数据库,以备使用。

6 结论

利用沙尘暴发生与晴空 2 个不同时刻卫星测量到的同一像素区辐射值来消除地面反射率影响,在计算陆地上空沙尘暴的光学厚度中是一种可行的方法。

但由于沙尘属于一种比较特殊的气溶胶,在粒子尺度、化学成分及其构成等方面与普通的气溶胶存在一定差别,对它的定量计算仍处在研究阶段,没有成熟的计算方法可以供参考,同时缺少同步沙尘量的实例数据,造成验证困难。这些都是在今后工作中需要解决的问题。

参考文献:

- [1] Fraser R S, Kaufman Y J. The Relative Importance of Aerosol Scattering and Absorption in Remote Sensing[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 1985, 23(5): 625-633.
- [2] Kaufman Y J. Satellite Sensing of Aerosol Absorption[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(D4): 4307-4317.
- [3] Kaufman Y J, Fraser R S. Light Extinction by Aerosol During Summer Air Pollution[J]. Journal of Applied Meteorology, 1983, 22(10): 1694-1706.
- [4] Kaufman Y J, Fraser R S, Ferrare R A. Satellite Measurements of Large-scale Air Pollution: Method[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(D7): 9895-9909.
- [5] Holben B, Vermote E, Kaufman Y J, et al. Aerosol Retrieval Over Land From AVHRR Data Application for Atmospheric Correction[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 1992, 30(2): 212-222.
- [6] Martonchik J V, Diner D J. Retrieval of Aerosol Optical Properties From Multi-angle Satellite Imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 1992, 30(2): 223-231.
- [7] Kokhanovsky A. Variability of the Phase Function of Atmospheric Aerosols at Large Scattering Angles[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1998, 55(3): 314-320.
- [8] Guoyong W, Tsay Si - Chee, Cahalan R. Path Radiance Technique for Retrieval Aerosols Optical Thickness Over Land[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(D24): 31321-31332.
- [9] Nakajima T, Higurashi A. AVHRR Remote Sensing of Aerosol Optical Properties in the Persian Gulf Region, Summer 1991[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 16935-16946.
- [10] Alexander Lgnatov, Larry Stowe. Aerosol Retrievals from Individual AVHRR Channels, Part I: Retrieval Algorithm and Transition from Dave to 6S Radiative Transfer Model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59(3): 313-334.
- [11] Tanre D, Kaufman Y J, Holben B N, et al. Climatology of Dust Aerosol Size Distribution and Optical Properties Derived from Remotely Sensed Data in the Solar Spectrum[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D17): 18205-18217.
- [12] Tanre D, Kaufman Y J, Herman M, et al. Remote Sensing of Aerosol Properties over Oceans Using the MODIS/EOS Spectral Radiances[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 16971-16988.
- [13] 郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究[J]. 遥感学报, 2001, (4): 300-305.
- [14] 吴晓京, 陆均天, 张晓虎. 2001年春季沙尘天气分析[J]. 国土资源遥感, 2001, (3): 51-55.

A METHOD FOR ESTIMATING THE AMOUNT OF AIR BORNE SAND OVER THE LAND

ZHENG Xin - jiang¹, CHEN Wei - min², FANG Xiang¹, LUO Jing - ning¹

(1. National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China; 2. Nanjing University of Sciences and Technology, Nanjing 210044, China)

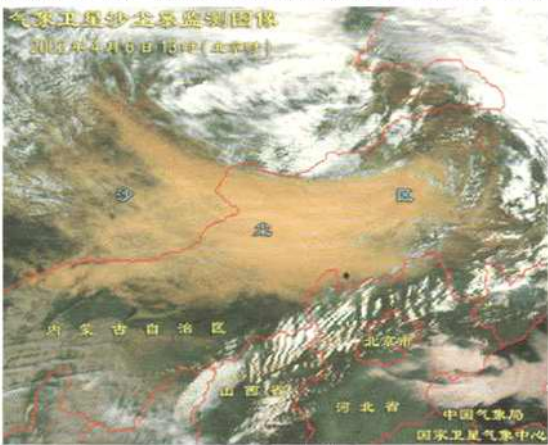
Abstract: Using visible channels of NOAA satellites, the authors developed a new method to estimate the amount of airborne sand over the arid area in northern China. Due to the great difference in reflectance on the land, it is rather difficult to directly retrieve the dust storm from the visible radiance obtained from the satellite. Considering that the change of the land reflectance is very small during a short time in a fixed place, we can make a comparison between the radiance of the clear sky and that of the dust sky. In this way, we can estimate the optical depth of the dust storm over the land. Test results indicate that, during the dust storm on April 16, 2002, the optical depth of dust storm and the airborne sand amount calculated by this method were in agreement with the trend of the synchronous TSP observation.

Key words: Meteorological satellite; Optical depth; Amount of air borne sand

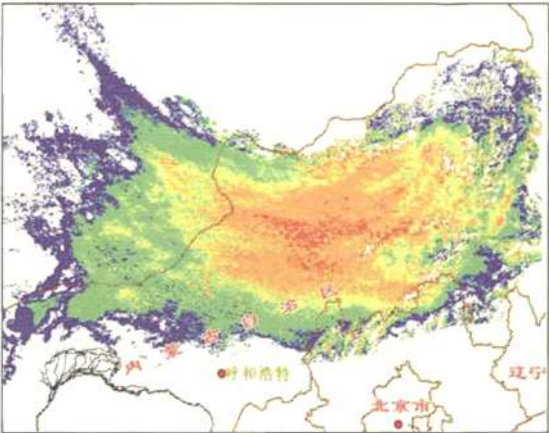
第一作者简介: 郑新江(1945 -),男,正研级高工,主要从事气象卫星资料在天气、环境及海洋领域中的应用研究。

(责任编辑:刁淑娟)

郑新江, 等：利用NOAA卫星资料估算陆地沙尘量的方法



影片19 气象卫星沙尘监测图像
(北京时间2002年4月6日13时)



1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 >3.0 云区
影片20 沙尘光学厚度图(时间同影片19,下同)



20 30 40 50 60 >60 云区
影片21 沙尘含量示意图(单位: t/km^2 气柱)
(22 113与760分别为所在位置的总悬浮颗粒物浓度 单位: $\mu m/m^3$)



影片22 研究区高分辨率航空影像



影片23 HH(R), VV(G), HV(B) 彩色合成图像



影片24 决策树分类结果

(影片22见张峰一文; 影片23、24见李新武一文)