

利用 NOAA 卫星资料估算陆地沙尘量的方法研究

郑新江¹ 陈渭民² 鞠洪波³ 方翔¹ 罗敬宁¹ 董旭辉⁴

¹ 国气象局国家卫星气象中心

² 南京信息工程大学

³ 中国林业科学研究院

⁴ 国家环境保护总局

摘要:

本工作提出一种利用 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。在可见光波段, 卫星的测量包含由大气和地表两部分的反射辐射, 由于陆地上各点的反照率差异较大, 直接由卫星测量的可见光辐射反演沙尘暴难度较大。该方法考虑到固定地区在短时间内地面反射率变化较小, 因此可以利用沙尘暴发生时和晴空时两个不同时刻卫星测量到的这一象点区的辐射值来消除地面反射率的影响, 由此估算陆地上空沙尘暴的光学厚度。结果表明, 在 2002 年 4 月 6 日沙尘暴期间, 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 值在趋势上是一致的。

关键词: 气象卫星、光学厚度、沙尘量

引言

沙尘天气是一种重要的天气现象, 大气中的沙尘污染大气环境, 对人类的生存环境有严重影响; 同时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, 是影响气候变迁的一个重要因素。因此研究大气中沙尘有重要意义, 但是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。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, 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。上一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。进入二十一世纪后, 卫星探测技术迅速提高、卫星资料处理不断改进, 定量提取沙尘含量的空间分布成为可能。但是由于受地面反射率的影响, 目前国外由卫星资料定量提取沙尘量的方法主要限于洋面, 这是由于洋面比较均匀, 下表面反射率的影响小, 有以下几种: (1) 查表法, 由于卫星观测与沙尘间的关系不是简单的关系, 而是复杂的函数关系, 为此该方法是利用辐射传输方程或计算模式建立沙尘的光学厚度与卫星观测的辐射率及其它参数的关系以列表的方法给出, 然后在求算沙尘时采用实时观测值根据已建立的查表算表确定。(2) 近似法, 该方法将辐射传输

方程进行简化处理, 获取直接计算沙尘含量的计算公式, 然后由卫星观测值代入该公式计算沙尘含量。(3) 统计法, 该方法是根据卫星观测和地面观测沙尘的数据建立统计拟合关系, 然后求取沙尘含量。但对于陆地, 上述方法均有较大的局限性。

对于陆地, 为了减少地面反射率的影响, 国内外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, 河流和湖泊很少, 利用水面与陆地区相比较这一方法难以实行, 为此本工作提出一种新的估算沙尘量的方法, 即利用沙尘暴发生时和晴空时两个不同时刻卫星测量到的同一象点区的辐射值来消除地面反射率对估算沙尘量的影响。与地面观测资料推算的结果比较表明, 该方法是可行的, 对于监测研究我国沙尘暴的发生和活动有重要的意义。

1. 基本原理

卫星某一时刻观测到的辐射是来自其视场内大气和地面各目标辐射的总和, 某时刻的视场构成卫星云图上的象点, 在一个象点内的物象是无法区分的。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, 入射至大气顶层的大气辐射为 F_0 , a 和 T_a 为大气层的反射函数和透射(直接 + 漫透射)函数, 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

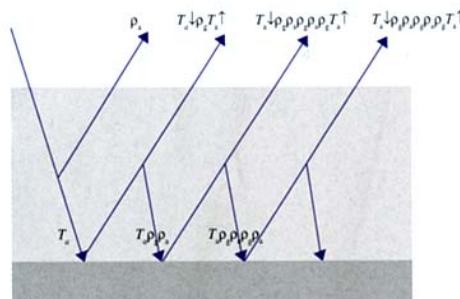


图 1 大气和地面多次反射太阳辐射到达大气顶的辐射

$$\begin{aligned} P_{Sat} &= P_a + T_a \downarrow p_g T_a \uparrow + T_a \downarrow p_g p_a p_g p_a p_g T_a \uparrow + T_a \downarrow p_g p_a p_g p_a p_g T_a \uparrow \dots \\ &= P_a + T_a \downarrow p_g T_a \uparrow [1 + p_g p_a + (p_g p_a)^2 + \dots] \\ &= P_a + T_a \downarrow p_g T_a \uparrow (1 - p_a p_g)^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

由于假定大气各向同性，其向上的透射函数和向下的透射函数相等，此时 $T_{\text{a}} = T_{\text{a}^2} = T_{\text{a}}$ ，且考虑到辐射量与时间的关系，因此地面和大气对太阳辐射的多次反射至大气顶的方向反射率为

$$\rho_{\text{sat}}(t) = \rho_a(t) + \rho_s(t) T_a^2(t) [1 - \rho_a(t) \rho_s(t)]^{-1} \quad (2)$$

本方法采用对卫星图片上象点逐个计算的方法，对于同一象点地区相对于两时刻 t_1 、 t_2 的象点卫星测量的方向反射率为

$$\rho_{\text{sat}}(t_1) = \rho_a(t_1) + \rho_s(t_1) T_a^2(t_1) [1 - \rho_a(t_1) \rho_s(t_1)]^{-1} \quad (3a)$$

$$\rho_{\text{sat}}(t_2) = \rho_a(t_2) + \rho_s(t_2) T_a^2(t_2) [1 - \rho_a(t_2) \rho_s(t_2)]^{-1} \quad (3b)$$

就是

$$[\rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_a(t_1)] [1 - \rho_a(t_1) \rho_s(t_1)] = \rho_s(t_1) T_a^2(t_1) \quad (4a)$$

$$[\rho_{\text{sat}}(t_2) - \rho_a(t_2)] [1 - \rho_a(t_2) \rho_s(t_2)] = \rho_s(t_2) T_a^2(t_2) \quad (4b)$$

整理得

$$\rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_a(t_1) = \rho_s(t_1) [T_a^2(t_1) + \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_a(t_1) - \rho_a^2(t_1)] \quad (5a)$$

$$\rho_{\text{sat}}(t_2) - \rho_a(t_2) = [T_a^2(t_2) + \rho_{\text{sat}}(t_2) \rho_a(t_2) - \rho_a^2(t_2)] \quad (5b)$$

由(5a)和(5b)消去 ρ_s 得

$$[\rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_a(t_1)] [T_a^2(t_2) + \rho_{\text{sat}}(t_2) \rho_a(t_2) - \rho_a^2(t_2)] = [\rho_{\text{sat}}(t_2) - \rho_a(t_2)] [T_a^2(t_1) + \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_a(t_1) - \rho_a^2(t_1)] \quad (6)$$

2. 沙尘的光学厚度与载沙量

晴天大气的透过率写为

$$T_{\text{free}} = \exp(-\tau_{\text{free}}/1) \quad (7)$$

式中 τ_{free} 为晴空大气的光学厚度

$$\tau_{\text{free}} = \tau(\text{Rayl}) + \tau(\text{H}_2\text{O}) + \tau(\text{O}_2) + \tau(\text{O}_3) \quad (8)$$

$\tau(\text{Rayl})$ 、 $\tau(\text{H}_2\text{O})$ 、 $\tau(\text{O}_2)$ 、 $\tau(\text{O}_3)$

分别为瑞利散射以及水汽、氧气、臭氧吸收的光学厚度。

有沙尘暴发生时大气的透过率为

$$T_{\text{total}} = T_{\text{free}} \cdot T_{\text{sand}} = \exp(-\tau_{\text{free}}/1) \exp(-\tau_{\text{sand}}/1) \quad (9)$$

式中 T_{sand} 为沙尘气溶胶的光学厚度为

$$\tau_{\text{sand}} = \tau_{\text{total}} - \tau_{\text{free}} \quad (10)$$

垂直方向的光学厚度为

$$\tau_{\text{sand}}(0) = \tau_{\text{sand}}(\mu_{\text{sand}} + \mu_{\text{sat}}) \quad (11)$$

由 Alexander Ignatov and Larry Stowe (2001) 工作，对于中纬度冬季，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 D. Tanré, Y. J. Kaufman et al 工作，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 为晴天大气的时间， t_2 为沙尘暴发生的时间，在可见光波段，此时，与沙尘暴发生时的大气相比较，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，据 D. Tanré, Y. J. Kaufman et al，波长 $0.64 \mu\text{m}$ 处的单次反照率为 0.96 (Banzibuu)，因此可以假定沙尘气溶胶的吸收很小，即有 $\rho_a(t_2) \approx 1 - T_a(t_2)$ 。则由(6)式简化得

$$\rho_{\text{sat}}(t_1) [\rho_{\text{sat}}(t_2) (1 - T_a(t_2)) + 2 T_a(t_2) - 1] = \rho_{\text{sat}}(t_2) - 1 + T_a(t_2) \quad (12)$$

$$T_a(t_2) = [\rho_{\text{sat}}(t_2) \rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_{\text{sat}}(t_2) - 1] / [2 \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_{\text{sat}}(t_2) - 1] \quad (13)$$

就是

$$T_a(t_2) = [\rho_{\text{sat}}(t_2) + \rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_{\text{sat}}(t_2) - 1] / [2 \rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_{\text{sat}}(t_2) - 1] \quad (14)$$

则由(9)式得光学厚度为

$$\tau_{\text{sand}} = -\mu \ln [\rho_{\text{sat}}(t_2) + \rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_{\text{sat}}(t_2) - 1] / [2 \rho_{\text{sat}}(t_1) - \rho_{\text{sat}}(t_1) \rho_{\text{sat}}(t_2) - 1] \quad (15)$$

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，上式近似为

$$\tau_{\text{sand}} \approx -\mu \ln [\rho_{\text{sat}}(t_2) + \rho_{\text{sat}}(t_1) - 1] / [2 \rho_{\text{sat}}(t_1) - 1] \quad (16)$$

$$\text{由光学厚度计算含沙量 (M)} \quad (17)$$

$$\text{式中 } f_d = 1.43 (1 - r.h)^{0.7} \quad 0.4 \leq r.h \leq 0.9$$

(r.h) 为当日北京时间 08 点地面相对湿度，为单次反照率，约为 0.96)

3. 具体方法：

(1) 从 NOAA 历史可见光卫星资料寻求沙尘发生季节晴空象点（这些象点应是反照率最小，一般从常规资料取能见度大于 10 公里的天气），并构成一幅晴空地表图，见图 2；

(2) 求出晴空区的卫星辐射值；

(3) 利用《气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究》中的方法判识沙尘区并求出实时卫星图沙尘发生区卫星接收的辐射值；

(4) 利用精定位级数对象点对准处理，确定同一地区所对应的象点值；

(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。



图 2 NOAA-16 (通道 1) 2002 年 4 月 1 日 14:16 (北京时间) 晴空图

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、华北北部与东北部分地区出现了沙尘天气，图 3 是地面测站的观测数据。从图 3 可以看出为一次以沙尘暴为主的大范围沙尘天气。

图 4 为 NOAA-16 卫星 4 月 6 日 13 时（下同）的沙尘暴监测图，图中橘红色的区域为沙尘区，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（图 5、6）。从图 5 的标尺上可以分析出：沙尘区的光学厚度在 1.0~3.0 之间（兰色~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。从图 6 上可以分析出，在每气柱内沙尘含量在 20t~30t，其中黄色区域在 50t~80t 之间，与光学厚度最大区域一致。

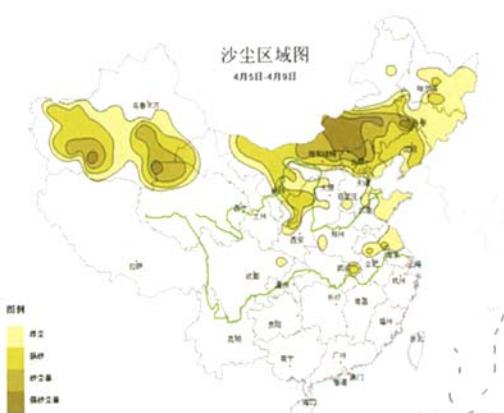


图3 沙尘区范围图

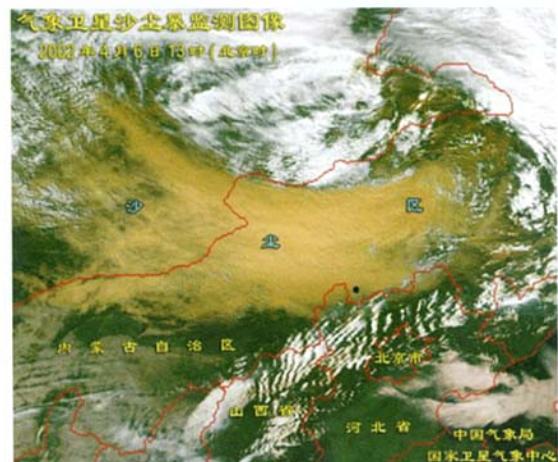


图4 气象卫星沙尘监测图像

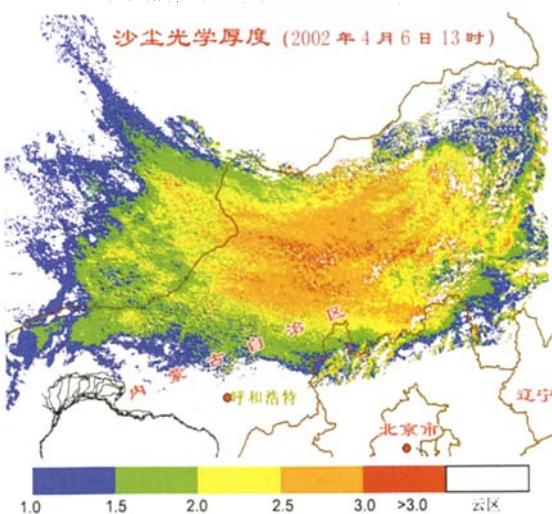
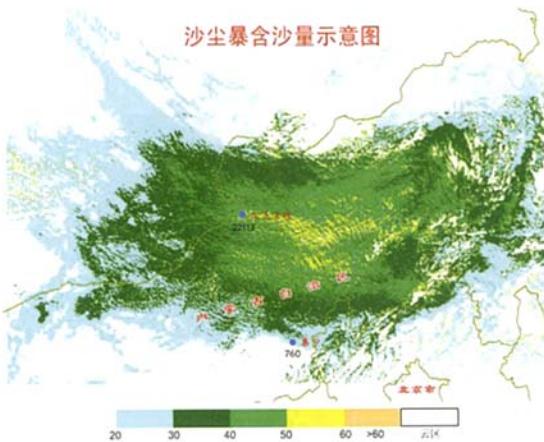


图5 沙尘光学厚度图

图6 沙尘含量示意图 (单位: t/km² 气柱, 时间同图5)

利用国家环保总局提供的大气颗粒物测定仪 (DDM-LD-3K) 测定的同时刻 (4月6日12时~14时平均值) 二连浩特与集宁市二地的TSP值 (总悬浮颗粒浓度) (见图6), 可以分析出, 二连浩特的TSP值为 $22113\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 正好位于沙尘含量最大的地区边缘 (图6中黄色区域), 而集宁市的TSP值为 $760\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 正好位于图5中沙尘含量最小的地区边缘 (图6中浅兰色区域), 同时二者相差约30倍。因此, 可以认为, 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, 证明上述的研究工作是有实际意义的。

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, 对于中纬度地区NOAA-16大气分子的光学厚度为0.0944左右, 相对沙尘暴的光学厚度要小大约二个数量级, 一般轻度沙尘的光学厚度在0.8到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, 需要进一步的对比分析。(3) 本工作假定对于固定地点在短期内反照率不会改变, 但是当植被发生变化或一次降水后, 地面反照率均可能发生变化, 也将对计算结果产生较大误差, 因此需要对陆面反照率做系统的观测。(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误差。因此, 需要建立沙尘暴多发地区的晴空数据库, 以备使用。

6、小结

利用沙尘暴发生时与晴空时两个不同时刻的卫星测量到的同一象点区的辐射值来消除地面反射率的影响, 在计算陆地上空沙尘暴的光学厚度时是一种可行的方法。

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

感谢邱康睦研究员提出宝贵意见。

(参考文献略)