

联合反演大气气溶胶光学特性 和地面反照率*

赵增亮 毛节泰

(北京大学地球物理系暴雨监测与预报重点实验室, 北京 100871)

摘 要 利用一种直接由天空亮度的相对分布反演气溶胶光学特性的方法。数值试验表明天空亮度相对分布的变化对地面反照率并不敏感, 这样通过地基多个方向天空亮度的测量, 并与模式计算结果相比较, 定出大气气溶胶的光学厚度和相函数。在得到大气气溶胶的相函数和光学厚度的基础上, 用 GMS-5 气象卫星可见光通道的资料求出了北京地区可见光波段的地面反照率。

关键词 光学厚度 天空亮度 地面反照率

1 引言

大气气溶胶是大气中的一种粒子成分, 影响着地气系统的能量交换, 其作为凝结核、冰核直接参与云雾物理过程, 还参与臭氧的非均相反应, 影响着臭氧平衡。气溶胶粒子本身对太阳短波辐射具有散射和吸收作用, 因此它影响着地-气系统的辐射收支平衡。一方面由于它的后向散射作用, 使行星反照率增加, 地-气系统冷却; 另一方面气溶胶的吸收作用又使地-气系统增温。其净作用与气溶胶的消光系数 β 、单次散射反照率 ω_0 、地-气系统反照率 α 有关。大气气溶胶的光学厚度是表征大气浑浊度的一个重要物理量, 是确定气溶胶气候效应的一个关键因子; 大气气溶胶相函数不对称因子 G 是确定天空亮度分布的一个重要参量, 同时也是研究大气层顶向上漫射辐射强度的各向异性, 以和卫星资料相对应不可缺少的参量。

研究辐射传输的另一个重要应用是用于遥感。对于以地表为目标物的遥感来说, 用 NOAA 卫星的 AVHRR 两个可见光通道测量农作物的反照率, 用植被指数进行估产, 以及用飞机对地表进行航空测量, 为提高精度需要扣除大气的影晌, 即要进行大气订正; 对于以大气为目标物的大气遥感来说, 需要扣除下垫面的影响。可见确定大气气溶胶的光学特性、地面反照率有着非常重要的意义。黎洁等^[1]提出了用多波段望远光度计观测太阳直接辐射和太阳所在地平纬圈天空亮度的相对分布值, 同时反演整层大气气溶胶的光学厚度和相函数。本文在此基础上提出了一种全部用相对量的测量反演气溶胶光学厚度和相函数的方法, 通过测量多个天顶角方向的天空亮度分布, 从中直接提取气溶胶的光学厚度和相函数, 避开对仪器的定标工作。在得到气溶胶光学厚度和相函数后用

1997-12-16 收到, 1998-06-29 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49635200

卫星资料确定地面反照率。

数值试验的结果表明, 天空亮度的相对分布对地面反照率不敏感, 这样为我们从地面观测的天空亮度提取气溶胶的光学特性提供了可能。由天空亮度的相对分布同时确定气溶胶的光学厚度和相函数, 采用的方法是: 改变气溶胶的光学厚度和相函数, 用辐射传输模式计算出一组天空亮度分布图, 然后求取它们与实测的天空亮度的标准协方差(相关系数), 最大相关系数处对应的气溶胶的光学厚度和相函数就是实际大气气溶胶的光学厚度和相函数, 数值试验和实测结果表明这种方法是可行的, 结果是可信的。在用实测的天空亮度资料得到气溶胶的光学厚度和相函数后, 用 *GMS-5* 卫星资料得到了地面反照率。

2 观测仪器简介

观测天空亮度所用仪器是北京大学地球物理系 1993 年引进的多通道光谱仪(*OMA4*)。整个系统包括探头、探头电源、探头冷却系统、单色仪、经纬仪、计算机。某一方向的天空散射光通过由经纬仪改装的前置光学系统经过光缆输送到光谱仪的人射狭缝, 经光栅分光后, 光谱信号由二维 *CCD* 列阵转换为电信号, 在 *CCD* 感光面前方有一个机械快门, 曝光时间由计算机控制, 可从 1 ms 到 1 h 任意调节, 光谱仪的响应量与曝光时间成线性关系。光谱仪状态参数(如探头温度、光栅、中心波长等)和数据记录存储都由计算机控制, 也可手动单独调整单色仪。经纬仪视场张角很小, 小于 0.5° 。该光谱仪的探头为 512×512 像元 *CCD* 二维列阵, 可同时进行一段光谱的测量。

3 方案的可行性分析及数值实验

为了利用地面观测的天空亮度反演大气气溶胶的相函数和光学厚度等参数, 需要对其中的一些关键问题作必要的分析, 因为地面测量到的天空亮度是整层大气和下垫面综合作用的结果, 而要利用地面一个高度上的观测数据反演不同层次上大气气溶胶光学特征的变化, 看来是十分困难的, 因此就要考虑这种光学特征随高度的变化会对地面观测到的亮度分布以及大气上界的出射辐射有什么影响? 另外, 在可见光波段, 晴空天空亮度的分布特征主要取决于大气气溶胶的光学特征, 大气气溶胶的变化可以说是很复杂的, 因此我们进行了一系列的数值试验, 首先要搞清楚各层大气相函数的变化对天空亮度分布有什么影响。

3.1 相函数随高度改变时对地面处向下和大气上界向上漫射光强分布的影响

参照 *LOWTRAN-7* 辐射传输模式中的气溶胶模式把整层大气分为四层: (1) 边界层 (0~2 km); (2) 对流层 (2~10 km); (3) 下部平流层 (10~30 km); (4) 上层大气 (30~100 km)。

边界层取城市气溶胶模式, 其组成: 20% 的烟灰类物质加上 80% 的乡村气溶胶组份(乡村气溶胶的组成: 70% 的水溶性物质加上 30% 的尘埃)。谱分布模式由聚集态粒子(小粒子)和粗粒子(大粒子)两个正态分布之和为其分布函数。

对于每层大气, 采用 LOWTRAN-7 模式已有的程序计算出某波长处的散射消光的光学厚度 τ_{si} , 整层大气平均的相函数 $\bar{P}$ 可写为

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^4 \tau_{si} P_i}{\sum_{i=1}^4 \tau_{si}}, \tag{1}$$

为简化起见, 数值实验中采用 Henyey-Greenstein 经验相函数, 各层大气相函数不对称因子 G 取值为: (1) 边界层: $G_1 = 0.8$; (2) 对流层: $G_2 = 0.7$; (3) 下部平流层: $G_3 = 0.6$; (4) 上层大气: $G_4 = 0.5$ 。因为大粒子多在下层, 所以取下层大气相函数不对称因子 G 值较大。检验中取了三个波长, $\lambda = 0.4, 0.55, 1.0 \mu\text{m}$, 大气模式为 1976 年美国标准大气, 地面能见度 VIS 为 23 km, 整层大气平均相函数不对称因子 G 值结果见表 1。

表 1 各层大气散射消光的光学厚度及整层大气平均 G 值 (VIS: 23 km)

波长	光 学 厚 度				平均 G 值
	边界层	对流层	下部平流层	上层大气	
0.40 μm	0.268	0.331	0.102	0.462×10^{-3}	0.72
0.55 μm	0.160	0.150	0.320×10^{-1}	0.141×10^{-2}	0.74
1.00 μm	0.673×10^{-1}	0.452×10^{-1}	0.450×10^{-2}	0.265×10^{-3}	0.75

以太阳所在的垂直平面为例, 整层大气采用一个平均的相函数不对称因子 G 值与大气分层取不同的不对称因子 G 值对散射光强的影响见表 2 和表 3 (表中的角度为光线去向与天顶方向夹角, 180° 表示自天顶垂直向下的辐射, 0° 表示向天顶方向的辐射)。计算时取太阳所在的方位角为 0° , 天顶角为 26.0° , 下垫面设为朗伯反射体, 反射率取值为 0.2。

表 2 大气分层取不同的 G 值与整层大气取一个 $\bar{G}$ 值, 模式计算的地面向下漫射光
强绝对辐射量的区别 $10^{-1} \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$

角度 / ($^\circ$)	25000 cm^{-1} (0.4 μm)			18180 cm^{-1} (0.55 μm)			10000 cm^{-1} (1.0 μm)		
	G_1	G_4	$(G_1 - G_4) / G_4$	G_1	G_4	$(G_1 - G_4) / G_4$	G_1	G_4	$(G_1 - G_4) / G_4$
100	0.1589	0.1510	5.23%	0.1353	0.1314	2.97%	0.0266	0.0264	0.42%
110	0.1954	0.1859	5.11%	0.1392	0.1322	5.30%	0.0223	0.0213	4.66%
120	0.2544	0.2491	2.13%	0.1787	0.1744	2.47%	0.0290	0.0284	2.12%
130	0.3705	0.3581	3.46%	0.2701	0.2580	4.69%	0.0453	0.0432	4.88%
140	0.6347	0.6443	-1.49%	0.5052	0.5068	-0.32%	0.0928	0.0922	0.62%
150	0.9773	1.1220	-12.90%	0.8317	0.9455	-12.04%	0.1650	0.1831	-9.89%
160	0.8852	0.9954	-11.07%	0.7367	0.8242	-10.62%	0.1436	0.1576	-8.88%
170	0.4836	0.4729	2.26%	0.3616	0.3513	2.93%	0.0632	0.0613	3.23%
180	0.2499	0.2413	3.56%	0.1684	0.1623	3.76%	0.0269	0.0261	3.30%

综合表 2、表 3, 发现无论是地面处向下, 还是大气层顶向上的漫射光强对相函数的高度分布不敏感, 尤其是大气层顶向上的漫射光强。在太阳辉光区差别稍大, 并且相对差别由正变负, 这是因为气溶胶多集中在下层, 且相函数 G 值下层比上层要大, 而 G 值越大, 相函数就越尖锐, 前向散射占的比重越大, 所以对于地面处向下的辐射, 整

层大气取一个平均的 $\bar{G}$ 值计算结果，在太阳辉光区偏小，在其他方向偏大。对于大气层顶向上的辐射，整层大气取一个平均的 $\bar{G}$ 值，要比分层取 G 值计算的结果，各方向的漫射光强都要偏小，这可以看出大气层顶向上的漫射光强，受上层大气的影响比较明显，上层大气相函数 G 值较小，说明后向散射占的比重加大， $\bar{G} > G_{\text{上层}}$ ，所以会出现大气层顶向上的漫射光强，当整层大气取一个平均的 $\bar{G}$ 值时，计算的结果要比实际情况偏小。

表 3 大气分层取不同的 G 值与整层大气取一个 $\bar{G}$ 值，模式计算的大气层顶向上漫射光强

角度 / (°)	绝对辐射量的区别 $10^{-1} \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$								
	25000 cm^{-1} (0.4 μm)			18180 cm^{-1} (0.55 μm)			10000 cm^{-1} (1.0 μm)		
	G_1	G_4	$(G_1 - G_4) / G_4$	G_1	G_4	$(G_1 - G_4) / G_4$	G_1	G_4	$(G_1 - G_4) / G_4$
0	0.0761	0.0767	-0.85%	0.0841	0.0847	-0.66%	0.0366	0.0367	-0.35%
10	0.0753	0.0752	-0.15%	0.0827	0.0822	-0.66%	0.0362	0.0360	-0.39%
20	0.0785	0.0791	-0.85%	0.0847	0.0853	-0.68%	0.0366	0.0367	-0.35%
30	0.0789	0.0789	-0.00%	0.0832	0.0827	-0.64%	0.0360	0.0359	-0.39%
40	0.0844	0.0852	-0.94%	0.0856	0.0864	-0.82%	0.0364	0.0365	-0.44%
50	0.0883	0.0887	-0.42%	0.0845	0.0840	-0.52%	0.0356	0.0354	-0.48%
60	0.1013	0.1027	-1.36%	0.0893	0.0904	-1.23%	0.0360	0.0362	-0.72%
70	0.1161	0.1194	-2.76%	0.0908	0.0916	-0.82%	0.0346	0.0344	-0.38%
80	0.1447	0.1538	-5.92%	0.1035	0.1087	-4.78%	0.0357	0.0366	-2.48%

3.2 灵敏度试验

上面的数值试验表明，即使大气散射相函数随高度有变化，地面天空亮度相对分布在反映平均相函数特征方面仍是有一定能力的，而且气溶胶在不同高度的非均匀分布对天空亮度分布的影响也不大。因此有可能利用地面观测的天空亮度相对分布来反演大气层平均相函数和光学厚度等特征。

理论分析可知地基测量的天空亮度相对分布受大气散射相函数、单次散射反照率、整层大气的光学厚度和地面反照率等的影响，因此有必要进行某些数值试验，搞清楚天空亮度相对分布的变化对这些因子的灵敏度，为简单起见，设相函数为 Henyey-Greenstein 分布，其特性完全由对称度因子 G 决定。

3.2.1 地面处向下漫射光强的相对分布对气溶胶相函数、气溶胶光学厚度、单次散射反照率和地面反照率的灵敏度试验

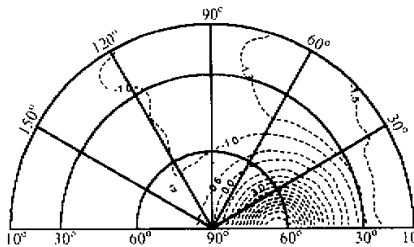
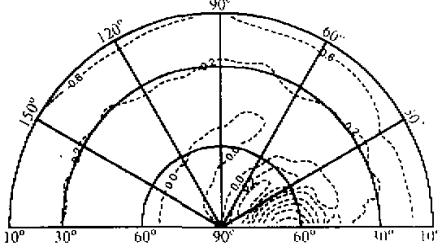
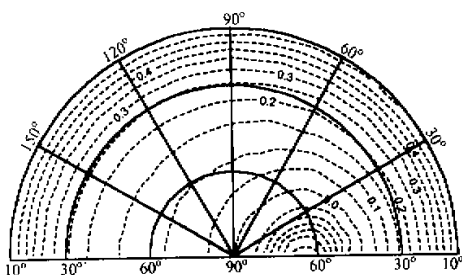
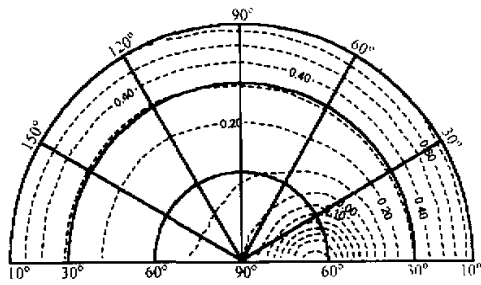
当气溶胶不对称因子 G 、气溶胶光学厚度 τ_a 、地面反照率 A 、单次散射反照率 ω 变化时，不同方向上，地面处向下漫射光强的变化率 $\xi_{G0}(\theta, \varphi)$ 、 $\xi_{\tau_a}(\theta, \varphi)$ 、 $\xi_{A0}(\theta, \varphi)$ 、 $\xi_{\omega0}(\theta, \varphi)$ 分布见图 1~图 4。 θ 表示高度角， φ 表示方位角，图中半圆的中心表示天顶方向。数值试验中取波长 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 、太阳天顶角 25° 、太阳方位角 0° 。

$$\xi_{G0}(\theta, \varphi) = [I(\theta, \varphi, \tau_a, A_0, \omega_0, G_0 + \Delta G) - I(\theta, \varphi, \tau_a, A_0, \omega_0, G_0 - \Delta G)] / 2\Delta G, \quad (2)$$

$$\xi_{\tau_a}(\theta, \varphi) = [I(\theta, \varphi, A_0, G_0, \omega_0, \tau_a + \Delta\tau) - I(\theta, \varphi, A_0, G_0, \omega_0, \tau_a - \Delta\tau)] / 2\Delta\tau, \quad (3)$$

$$\xi_{A0}(\theta, \varphi) = [I(\theta, \varphi, \tau_a, G_0, \omega_0, A_0 + \Delta A) - I(\theta, \varphi, \tau_a, G_0, \omega_0, A_0 - \Delta A)] / 2\Delta A, \quad (4)$$

$$\xi_{\omega0}(\theta, \varphi) = [I(\theta, \varphi, \tau_a, G_0, A_0, \omega_0 + \Delta\omega) - I(\theta, \varphi, \tau_a, G_0, A_0, \omega_0 - \Delta\omega)] / 2\Delta\omega, \quad (5)$$

图 1 ξ_{G_0} 的分布图图 2 ξ_{τ_a} 的分布图图 3 ξ_{A_0} 的分布图图 4 ξ_{ω_0} 的分布图

式中的光强 I 为相对值, 天顶的亮度定为单位 1, $G_0 = 0.65$, $\tau_a = 0.47$, $A_0 = 0.20$, $\omega_0 = 0.85$, $\Delta G = 0.1$, $\Delta \tau = 0.1$, $\Delta A = 0.05$, $\Delta \omega = 0.05$.

从图 1~图 4 可以看出, 随着散射相函数不对称因子 G 值的增大, 天空亮度的分布会更加不均匀, 日周光区的 $\xi_{G_0} > 0$, 且远远大于其他位置的 ξ_{G_0} ; 随着气溶胶光学厚度 τ_a 、地面反射率 A 的增加, 天空亮度的分布会变得趋于均匀, 日周光区的 ξ_{τ_a} 、 ξ_{A_0} 都小于零。另外计算结果表明, 随着单次散射反照率的增加, 地面收到的各方向上的散射光会增强, 但天空亮度的相对分布会更加均匀, ξ_{ω_0} 的分布与 ξ_{A_0} 的分布相类似。从图 1~图 4 可得出: 天空亮度的相对分布对不对称因子 G 、光学厚度 τ_a 敏感, 相对来讲对地面反射率 A 和单次散射反照率 ω 不敏感。从原始数据中可更明显地看出这点, $|\xi_{G_0}|$ 、 $|\xi_{\tau_a}|$ 、 $|\xi_{A_0}|$ 、 $|\xi_{\omega_0}|$ 的极大值分别为 13.0、2.1、0.55、0.75, $|\xi_{A_0}|$ 、 $|\xi_{\omega_0}|$ 的极大值远远小于 $|\xi_{G_0}|$ 和 $|\xi_{\tau_a}|$ 的极大值。

3.2.2 天空亮度的相对分布对气溶胶折射率虚部的敏感性分析

气溶胶折射率虚部分别取 $n_1 = 1.5 - 0i$, $n_2 = 1.5 - 0.05i$, 设大气气溶胶粒子谱分布为 Junge 谱, 其谱参数 $v^* = 3$, 采用 Mie 散射理论计算出气溶胶的散射相函数, 然后对其作 Legendre 多项式展开, 代入 DISORT 模式中进行天空亮度的计算。天空亮度相对分布的变化率为

$$\xi_{n_i}(\theta, \varphi) = [I(\theta, \varphi, n_2) - I(\theta, \varphi, n_1)] / \Delta n_i, \quad (6)$$

见图 5。计算天空亮度时, 太阳的位置、地面反照率、波长等参数同 3.2.1 节。由图中可以看到, 折射率虚部的变化会对天空亮度的相对分布产生影响。对实际大气气溶胶谱分布, 用 Junge 谱拟合, 其谱参数 v^* 值一般在 2 至 4 之间, v^* 值越大, 小粒子含量越多。图 5 同图 1 相比, ξn_i 的值普遍小于 ξG_0 的值, 敏感性要低一些。所以, 本方法较适用于对小粒子含量高的气溶胶谱进行光学特性的反演。

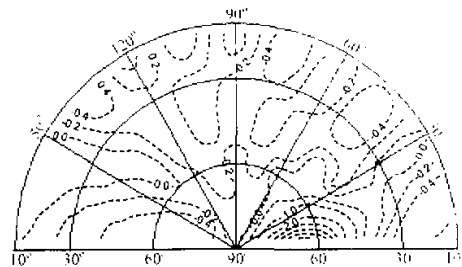


图 5 ξn_i 的分布图

3.2.3 大气层顶出射辐射对地面反照率的敏感性分析

卫星接收的是大气上界的出射辐射能量, 在给定大气模式和气溶胶参数的情况下, 大气上界的出射辐射是否对地面反照率敏感? 针对 GMS-5 气象卫星的可见光通道作数值试验如下:

对大气浑浊度考虑两种情况, 地面能见度 VIS 为 9 km 和 30 km 时, 对应 600 nm 处气溶胶光学厚度为 0.67 和 0.23, 在数值试验中取相函数不对称因子 $G=0.63$ 。计算从 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 到 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ 的积分辐射强度来模拟 GMS-5 气象卫星可见光通道接受的辐射强度。大气上界的出射辐射对地面反照率 A 、气溶胶光学厚度 τ_a 、相函数不对称因子 G 的灵敏度以 η_{a_0} 、 η_{τ_a} 、 η_{G_0} 表示:

$$\eta_{a_0} = [Fu(\tau_a, A_0 + \Delta A, G_0) - Fu(\tau_a, A_0 - \Delta A, G_0)] / 2\Delta A, \tag{7}$$

$$\eta_{\tau_a} = [Fu(A_0, G_0, \tau_a + \Delta\tau) - Fu(A_0, G_0, \tau_a - \Delta\tau)] / 2\Delta\tau, \tag{8}$$

$$\eta_{G_0} = [Fu(\tau_a, A_0, G_0 + \Delta G) - Fu(\tau_a, A_0, G_0 - \Delta G)] / 2\Delta G, \tag{9}$$

其中 $G_0=0.63$, $\tau_a|_{\lambda=600nm}=0.67, 0.23$, $A_0=0.20$, $\Delta G=0.1$, $\Delta\tau=0.1$, $\Delta A=0.02$ 。计算结果见表 4。

表 4 不同条件下大气上界出射辐射对地面反照率、气溶胶光学厚度和相函数的灵敏度

时间	地面能见度 30 km			地面能见度 9 km		
	$\Delta Fu / \Delta A$	$\Delta Fu / \Delta\tau$	$\Delta Fu / \Delta G$	$\Delta Fu / \Delta A$	$\Delta Fu / \Delta\tau$	$\Delta Fu / \Delta G$
10:00	32.5	11.3	-11.6	15.5	1.5	-17.8
12:00	42.5	4.7	-9.4	21.5	-0.4	-16.9
14:00	32.0	1.6	-7.4	15.0	-1.0	-13.7

由表中的数据可以看出, 大气上界的出射辐射对地面反照率最敏感。当大气浑浊度变小时, 大气上界的出射辐射对地面反照率的灵敏度会随之加大; 一天之中, 中午时大气上界的出射辐射对地面反照率的灵敏度最大。气溶胶对大气上界出射辐射的影响不能忽略, 尤其是在大气的浑浊度较大时。从中也可以看出在可见光波段遥感地物, 进行大气订正是必要的。

4 反演方法及误差分析

4.1 地基观测天空亮度反演气溶胶光学特性

仪器定标是一件很困难的工作,由前面的分析可以看到天空亮度的相对分布会随着气溶胶的光学厚度 τ_a 、不对称因子 G 而改变,并且对其他因子不敏感,所以我们考虑对多个方向天空亮度的测量,直接反演出气溶胶的光学厚度 τ_a 和不对称因子 G ,这样可以避开仪器的定标工作。具体作法如下:测量41个方向的辐射量,以天顶向下的辐射量为1,得到一张天空亮度的相对分布图;通过辐射传输模式,调整气溶胶的光学厚度 τ_a 和不对称因子 G 得到一组天空亮度分布图,模式输出所选的方向与实测的方向一致,同样,天顶向下的漫射辐射强度定为1。求出计算所得的各天空亮度相对分布图与实测的天空亮度相对分布图的标准协方差(相关系数),最大相关系数处对应的 τ_a 、 G 就是实际大气气溶胶的光学厚度 τ_a 和不对称因子 G 。天空亮度的计算采用DISORT辐射传输模式,该模式在水平一假设下,对大气进行垂直分层,要求输入各层的光学厚度 τ 、单次散射反照率 ω_0 、相函数 P 的Legendre展开系数等参数。在太阳短波区,除了气溶胶还要考虑分子大气的散射, ω_0 、 P 可表示为

$$\omega_0 = \frac{(\bar{\omega}_a \tau_a + \bar{\omega}_m \tau_m)}{\tau}, \quad (10)$$

$$P = \frac{(\bar{\omega}_a \tau_a P_a + \bar{\omega}_m \tau_m P_m)}{\omega_0 \tau}, \quad (11)$$

式中 τ_a 为气溶胶光学厚度, τ_m 为分子大气光学厚度, $\bar{\omega}_a$ 为气溶胶单次散射反照率, $\bar{\omega}_m$ 为分子大气单次散射反照率, P_a 和 P_m 分别为气溶胶和分子大气的散射相函数。

采用LOWTRAN-7模式中的美国标准大气、城市气溶胶模式、大气上界太阳光谱等求取各输入参数,然后再将各层大气相函数 P 作Legendre展开,一并代入DISORT模式进行天空亮度的计算。气溶胶光学厚度的调整通过改变地面能见度来实现;对气溶胶相函数的调整,采用Henyeey-Greensteina分布相函数,通过改变不对称因子 G 来实现。数值试验考虑了多种情况,计算结果表明相关系数收敛于一极大值点,可同时定出气溶胶光学厚度和相函数。但是当实际气溶胶的光学厚度和相函数不对称因子都较大时,比如沙暴天气,采用这种方法会遇到困难,在真值附近相关系数几乎不随气溶胶光学厚度改变。

数值试验表明,该方法5%的天空亮度观测误差会引起4%的气溶胶光学厚度反演误差,2%的相函数不对称因子反演误差;5%的分子大气散射误差会引起1%的气溶胶光学厚度反演误差,0.4%的相函数不对称因子反演误差。

4.2 用卫星资料反演地面反照率

卫星测得的是地气系统的反照率,在得到大气气溶胶的参数后,可由卫星资料得到地面反照率。卫星资料给出的反照率 A'_0 为

$$A'_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_r(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (12)$$

其中 $F_u(\lambda)$ 为大气上界向 GMS 卫星方向出射的辐射强度, $\pi F_0(\lambda)$ 为大气上界太阳辐射通量密度, $\varphi(\lambda)$ 为 GMS5 卫星可见光通道响应函数, λ_1 、 λ_2 为响应函数的下限和上限。给出一个地面反照率可由辐射传输模式计算出一个卫星可见光通道的反照率值, 计算结果表明两者成线性关系, 这样可用卫星可见光通道的反照率资料反插得到真实的地面反照率。

数值试验表明, 在 GMS5 卫星可见光通道波段, 5% 的分子散射和臭氧吸收不确定性会分别引起 0.5%、0.2% 的地面反照率反演误差。

5 观测结果

5.1 地基观测天空亮度反演气溶胶光学厚度和相函数

由上面所叙述的方法, 通过实测的天空亮度相对分布反演气溶胶的光学厚度和相函数。在用 DISORT 模式计算天空亮度时, 需要输入地面反照率值, 由前面分析可知, 天空亮度的相对分布对地面反照率不敏感, 见文献[2,3]。400 nm、450 nm 处地面反照率为 0.05; 500 nm 处为 0.10; 550 nm、600 nm 处冬天取值为 0.15, 春天植被变绿, 反照率增加, 取值为 0.20。考虑到计算精度和计算效率, 取 16 流; 整层大气分为 16 层。

由实测天空亮度资料反演气溶胶光学厚度与中国科学院大气物理研究所李卫等 1996 年 11 月 15 日在该所北郊新大楼顶进行观测得到的地基紫外光谱仪测量结果做了对比¹⁾。观测使用的仪器由长春光学精密机械研究所研制, 经标准灯绝对定标, 可测量 290~450 nm 的辐射^[4], 其测量方式为: 交替测量总辐射通量 I_G (太阳直射+大气散射) 和大气散射辐射通量 I_F 。由此得到太阳直接辐射通量 I_D ($I_D = I_G - I_F$), 在一定的天气模式、臭氧等吸收气体的假设下, 可得到气溶胶的光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 为

$$\tau_a(\lambda) = \frac{\ln[I_0(\lambda)] - \ln[I_D(\lambda)]}{m - \tau(\lambda) - \tau_r(\lambda)}, \quad (13)$$

其中 $I_0(\lambda)$ 为大气上界太阳光谱, m 为大气质量数, $\tau(\lambda)$ 为臭氧等分子吸收光学厚度, $\tau_r(\lambda)$ 为分子散射光学厚度。图 6 给出 1996 年 11 月 15 日 450 nm 处光学厚度测量结果的对比, 图中虚线为中国科学院大气物理研究所的测量结果。可见两者的测量结果还是比较一致的, 最大绝对偏差为 0.073, 最大相对偏差为 14%。

由于天气的原因, 我们只在 1996 年冬天 11 月 14、15 日取得了整天的资料, 而在

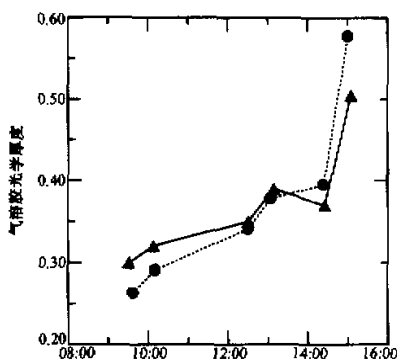


图 6 与中国科学院大气物理研究所测量光学厚度结果的对比 ($\lambda=450\text{nm}$)
 ○—○: 大气物理研究所测量结果,
 ▲—▲: 北京大学测量结果

1) 李卫、吕达仁, 1996, 北京地区气溶胶紫外波段光学厚度及日变化特征, 中层大气与全球环境和气候变化研讨会文集, 119~123.

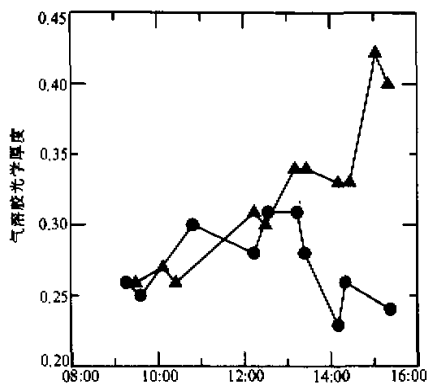


图7 气溶胶光学厚度日变化特征 ($\lambda=500\text{ nm}$)
·-·-: 1996年11月14日,
▲-▲: 1996年11月15日

1997 年春天只取得了几个时段的资料。由实测天空亮度资料反演气溶胶光学厚度结果见图 7。

1996 年 11 月 14 日、15 日，天气非常晴朗，14 日大风天气，气溶胶光学厚度日变化比较均匀，中午时气溶胶光学厚度比上午、下午稍大；15 日无风，气溶胶光学厚度呈上升趋势。从图 7 中可看出气溶胶光学厚度的日变化是比较明显的，在北京用长法对仪器进行定标要慎重选取数据。

反演所得 $\lambda=600\text{ nm}$ 处气溶胶光学厚度 τ 、相函数不对称因子 G 的结果见表 5。从表 5 可看出 1996 年 11 月 14 日、15 日 $\lambda=600\text{ nm}$ 处气溶胶光学厚度变化趋势与图

7 一致，相函数不对称因子基本上在 0.60 到 0.70 之间。从表 6 的数据看出，北京地区春天气溶胶相函数的大小与冬天测得的结果相近。这两天气溶胶的光学厚度和相函数的日变化较大，这可能与这两天的天气状况有关，尤其是在 4 月 11 日，上午逆温层还没有消失时，边界层内明显地有霾，随着太阳升起，逆温层的消失，霾也跟着消散，对应气溶胶的光学厚度减小，而相函数不对称因子加大，表明气溶胶中大粒子占的比重加大。

表 5 1996 年冬天的测量结果

时间	9:00		10:00		11:00		12:00		13:00		14:00		15:00	
	τ	G	τ	G	τ	G	τ	G	τ	G	τ	G	τ	G
1996-11-14	0.16	0.66	—	—	0.26	0.61	0.25	0.62	0.25	0.64	0.18	0.67	0.20	0.71
1996-11-15	—	—	0.23	0.65	—	—	0.24	0.63	0.25	0.64	0.24	0.65	0.30	0.67

表 6 1997 年春天的测量结果

时间	8:00		9:00		10:00		12:00	
	τ	G	τ	G	τ	G	τ	G
1997-04-11	0.42	0.58	0.39	0.62	0.29	0.67	—	—
1997-04-16	0.39	0.58	0.41	0.60	0.41	0.63	0.38	0.66

表 7 气溶胶光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 随波长的变化

时间	1996-11-14				1996-11-15			
波长	9:00	12:00	13:00	14:00	10:00	12:00	13:00	14:00
400 nm	0.35	0.40	0.41	0.38	0.38	0.42	0.42	0.47
450 nm	0.30	0.37	0.38	0.31	0.32	0.35	0.39	0.37
500 nm	0.25	0.31	0.31	0.26	0.27	0.31	0.34	0.33
550 nm	0.19	0.26	0.27	0.20	0.24	0.27	0.30	0.28
600 nm	0.16	0.25	0.25	0.18	0.23	0.24	0.25	0.24

气溶胶光学厚度 τ_a 随波长的变化，用 Angstrom 关系式拟合。

$$\tau_a(\lambda)=\beta\lambda^{-\alpha}, \tag{14}$$

拟合结果见表 8，由表中数据可见气溶胶光学厚度谱满足 Angstrom 关系式。

表 8 气溶胶光学厚度谱参数

时间 参数	1996-11-14				1996-11-15			
	9:00	12:00	13:00	14:00	10:00	12:00	13:00	14:00
β	0.0594	0.1274	0.1263	0.0647	0.1703	0.1185	0.1368	0.1064
α	-1.99	-1.28	-1.31	-1.92	-1.29	-1.37	-1.27	-1.61
相关系数	0.980	0.966	0.976	0.981	0.977	0.997	0.962	0.993
信度 α	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%

5.2 用 GMS-5 卫星资料确定地面反照率

由前面的数值试验可知，中午时大气上界出射辐射对地面反照率最敏感，所以我们用中午的卫星数据和实测的气溶胶数据反演地面反照率。1996 年 11 月 14 日 11:00、12:00、13:00 时， $\lambda=600\text{ nm}$ 处气溶胶的光学厚度分别为 0.26、0.25、0.25，对应 LOWTRAN-7 的城市气溶胶模式地面能见度：27.5、28.5、28.5 km；11 月 15 日 12:00、13:00 时的观测结果对应的地面能见度：30.0、28.5 km；1997 年 4 月 16 日 12:00 时气溶胶的光学厚度测量值对应的地面能见度为 18 km。气溶胶相函数的不对称因子值直接采用表 5、6 中的数据。这样由实时地面观测的气溶胶光学特性参数和 GMS-5 卫星可见光通道的反照率资料确定北京地区可见光波段的反照率。结果见表 9。

表 9 由 GMS-5 卫星资料确定的地面反照率

时间	1996-11-14			1996-11-15		1997-4-16
	11:00	12:00	13:00	12:00	13:00	12:00
卫星资料	10.51	9.6	7.8	9.6	7.8	12.89
地面反照率	18%	18%	17%	19%	17%	20%

从表 9 可见，在可见光波段，北京地区冬天地面反照率平均值为 18%，春天我们只有一组资料，地面反照率为 20%。邱金桓等^[5,6]反演北京地区的地面反照率结果为：冬天时， $\lambda=0.6943\text{ }\mu\text{m}$ 处，地面反照率平均值 $\bar{A}=0.287$ ；秋天时， $\lambda=0.399\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.6943\text{ }\mu\text{m}$ 处，地面反照率平均值分别为 0.101、0.222。居民区的反照率是建筑物、植被等共同作用的结果，根据一般地物光谱反射率的特征，以植被为例^[3]：在 410~500 nm 波长范围内，植被反射率都比较小，多种植被反射率平均值都小于 0.05；550~560 nm 处有一反射率极大值，平均值约为 0.1；从 680 nm 至 740 nm 反射率随波长明显加大。我们测得的地面反照率是 GMS-5 气象卫星整个可见光通道的平均反照率，结果在邱金桓等反演的分光地面反照率 $\lambda=0.399\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.6943\text{ }\mu\text{m}$ 处之间，定性来讲，反演结果是合理的。原则上说城市地区下垫面特征比较稳定，其地面反照率也应该比较稳定，我们的反演结果也表明了这一点，这也从另一方面证明了我们用多通道光谱仪 (OMA4) 对天空亮度的测量，由天空亮度的相对分布同时确定大气气溶胶的相函数和

光学厚度是可行的。

综上所述,我们可以建立这样一个系统,该系统由地基多通道光谱仪(OMA4)、GMS-5 卫星接受设备、辐射传输模式组成。通过地基多通道光谱仪(OMA4)对天空亮度相对分布的测量,反演得到大气气溶胶的光学厚度和相函数,在此基础上,用 GMS-5 气象卫星资料确定地面反照率。在得到各地气溶胶的光学特性参数后,可以用 GMS-5 气象卫星资料得到不同地区的地面反照率特征。当然这种方法本身有它的局限性。一是要求大气满足水平平均一的假设;二是对气溶胶相函数作了简化,采用 Henyey-Greenstein 经验相函数,把相函数简化为用一个参量不对称因子 G 来表示,实际上气溶胶的相函数与很多因素有关,除了和谐型、复折射指数有关外,还受到气溶胶粒子形状的影响;三是采用 LOWTRAN-7 模式中已有的城市气溶胶模式,这与我国的实际情况会有一些的差异,如果有适合我国自己的城市气溶胶模式,那么相信我们的工作会更好一些。希望这次对气溶胶的测量工作以及提出的这种反演方法会对今后建立我国自己的气溶胶模式有所帮助。

参 考 文 献

- 1 黎洁、毛节豪,1989,光学遥感大气气溶胶特性,气象学报,47(4),450~456.
- 2 王永生等,1987,大气物理学,北京:气象出版社,186~187.
- 3 童庆禧等,1990,中国典型地物波谱及其特征分析,北京:科学出版社,66~250.
- 4 吕达仁、李卫,1996,长春地区紫外光谱(UV-A, UV-B)辐射观测和初步分析,大气科学,20(3),343~351.
- 5 Qiu Jinhuan and Zhou Xiuji, 1986, Simultaneous determination of aerosol size distribution and refraction index and surface albedo from radiance, Part I: theory, *Adv. Atmos. Sci.*, 3(2), 162~171.
- 6 Qiu Jinhuan et al., 1986, Simultaneous determination of aerosol size distribution and refraction index and surface albedo from radiance. Part II: application, *Adv. Atmos. Sci.*, 3(3), 341~348.

Simultaneous Retrieval of Optical Characteristics of Atmospheric Aerosol and Surface Albedo

Zhao Zengliang and Mao Jietai

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract We propose a method to retrieve aerosol optical characteristics directly from the distribution of sky brightness. Numerical experiments show that the variation of sky brightness distribution is insensible to surface albedo. One can obtain aerosol optical characteristics by observing multiple-direction sky brightness on the ground and compared with the model calculation. From this basis, using visible channel data of GMS5 to calculate the surface albedo for the Beijing area.

Key words optical depth sky brightness surface albedo