

文章编号: 1007-4619 (2003) 04-0321-07

北京市污染气溶胶散射特征实验及其数值模拟

邓孺孺^{1,2}, 田国良¹, 孙 荃³, 张力军⁴, 支毅乔¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所重点实验室, 北京 100101; 2. 中山大学遥感应用中心, 广州 510275;

3. 地质装备总公司, 北京 100027; 4. 国家气象局, 北京 100101)

摘 要: 用地基遥感方法对北京市主要大气污染类型的气溶胶散射进行多角度观测实验, 对比分析不同污染类型, 及在不同观测角度下污染气溶胶的散射特征; 并建立对各类型污染气溶胶散射率进行了数值模拟的数学模型。在此基础上求出观测时污染气溶胶的混浊度。为污染气溶胶的卫星遥感打下基础。

关键词: 大气污染; 人为气溶胶; 遥感; 散射率

中图分类号: TP79/P407 **文献标识码:** A

1 引 言

气溶胶是影响太阳辐射能量收支平衡的重要因素, 也是造成大气污染的主要成分之一。用遥感技术进行探测将是对区域气溶胶浓度和分布情况进行调查、监测和预测的有效手段。但定量遥感气溶胶必须解决两方面的基础问题。一是气溶胶的散射特征问题, 二是气溶胶类型、浓度的反演。20世纪80年代以来, 气溶胶的研究受到高度重视。赵柏林等^[1] (1983) 用七波段光度计对北京地区气溶胶进行了一年的地基遥感观测并反演了粒子谱, 毛节泰等^[2] 分析了这次遥感得到的气溶胶光学厚度特征, 变化规律及与气象条件的关系。吕达仁、邱金桓等^[3,4] 提出并应用了直接消光和小角度散射确定气溶胶光学厚度和光谱分布的方法。D. Tanre⁵, Y. J. Kaufman, Teruyuki Nakajima 等^[5,6] 对地面太阳光谱和天空散射光的关系进行了深入研究, 提出了计算气溶胶粒子谱的计算方法, 并对各种典型气溶胶的粒子谱进行了计算。气溶胶粒子谱分布在这些研究中已经得到了较深入研究。在此基础上, Y. J. Kaufman 等根据分布于世界各地的三十多个观测站的观测资料, 综合出了一般气溶胶散射相函数的经验分布^[7], 并给出了气溶胶光学厚度与路径散射关系的经验公式^[8], 为用遥感数据反演区域气溶胶参数奠定了基础。但以上这些研究均是针对较大尺度

的平均气溶胶性质, 在测试时均避开当地大气污染源的影响。不同类型的大气污染的光学特征互不相同, 这一特性是进一步用遥感技术提取较高分辨率的各类型大气污染信息的关键, 但这方面的研究目前尚进行得不多。针对这一点, 本项研究通过用 ASD 光谱仪的对空的观测实验, 研究北京市主要污染类型的气溶胶从紫外到近红外波段的下行路径散射特征, 然后导出由路径散射率计算整层大气气溶胶混浊度的数学模型, 为进一步用遥感数据定量提取污染气溶胶浓度信息打下基础。本文中的污染气溶胶(也称人为气溶胶)专指对流层中由于人为因素产生的煤烟、沙尘和 SO₂、NO_x 分子等转化而成的水溶性粒子。自然成因的气溶胶和上升到平流层的人为成因气溶胶在水平方向上变化缓慢, 在数十公里尺度上可认为是不变的, 可当作背景气溶胶。

2 实验方法

2.1 所用仪器

为获取连续波段的气溶胶散射特征, 采用 ASD 连续光谱仪进行测试, 并采用 8° 视场和绝对辐射量测量模式。观测波段为 350nm 至 2500nm, 波段步长为 1nm。观测积分时间为 136ms, 各个数据用 10 个采样点平均。仪器对绝对辐射量的最大测量误差为 10% 左右, 但仪器相对测量误差极小。本文的散射

收稿日期: 2002-01-24; 修订日期: 2002-04-23

基金项目: 国家重大基金项目(49899270), 国家基础研究发展规划项目(G200007990), 中科院知识创新工程项目资助。

作者简介: 邓孺孺(1963—), 男, 副教授, 硕士毕业于中国地质大学(武汉), 现为中科院遥感应用研究所在职博士, 主要从事环境遥感和 GIS 应用等方面的研究, 已发表论文二十余篇。

比结果均采用比值方法求得, 误差取决于仪器相对误差, 最大误差小于 1%。

2.2 观测方法

天空散射光的观测是将探头固定在直立观测面的角度转盘上直接观测, 角度误差在 1°左右。太阳入射光的测量由于仪器观测角度偏大和光强超出响应范围两方面的原因, 不能直接观测, 故通过测量阳光下和阴影下的标准板的反射强度, 然后通过计算获得。计算方法为:

$$F = (I_l - I_s) \frac{2\pi}{R_0}$$

I_l 、 I_s ——分别为阳光下和阴影中的反射亮度, R_0 ——为标准板反射率。入射辐射通量是标准板反射光在半球范围内的积分, 又因探测范围完全落在标准板内, 故需乘以 2π 。

我们根据地面上接收到的太阳辐射通量和方向天空散射光通量来计算整层大气气溶胶的下行散射反射率(下称散射率)。实验方法如图 1 所示, 每个点的观测都是在短时间内用上述测量方法观测太阳入射通量 F 、太阳主平面上和垂直太阳主平面上不同角度的天空散射光亮度 L 。太阳入射光辐射通量为:

$$F = F_0 T_0 (\mu_0) \tag{1}$$

其中: F_0 为大气层外太阳的入射辐射通量, μ_0 为太阳天顶角的余弦, T_0 为整层大气透过率, 可表示为: $T_0 = \exp(-\tau_0 / \mu_0)$, τ_0 为整层大气垂直光学厚度。

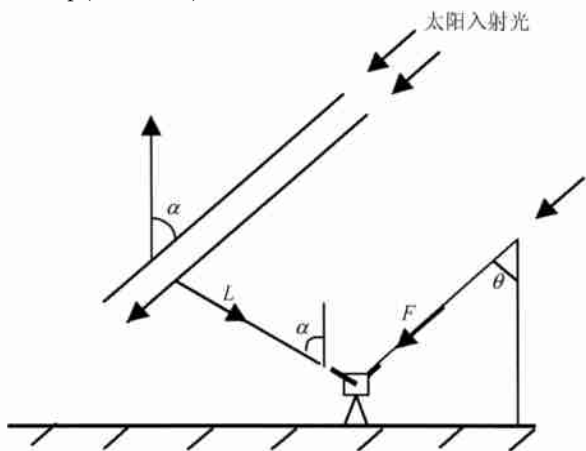


图 1 地基大气路径下行散射和太阳辐射观测示意图
 α —观测天顶角, θ —太阳天顶角, L —天空散射光, F —太阳入射光
Fig. 1 Sketch map of ground based observation for atmospheric downward path scattering and sun radiance
 α —observational zenith angle, θ —solar zenith angle, L —sky diffusing light, F —incident sunlight

某一方向的天空散射光亮度为:

$$L = F_0 \omega(\mu, \Theta) T(\mu_0, \mu, \tau_0) \tag{2}$$

其中: μ 为和观测角的余弦, Θ 散射角。 ω 为整层大气在观测方向的下行路径散射率, 为该观测方向上的路径散射通量与入射光辐射通量之比, 由于将整个大气层作为一个整体来考虑, ω 实际上包含了大气中粒子一次散射和多次散射的贡献。可表示为:

$$\omega = \omega_0 P(\Theta) / (4\pi \mu) \tag{3}$$

ω_0 为整层大气垂直散射反照率, $P(\Theta)$ 为散射相函数。大气散射由气溶胶散射和分子散射组成。 T 为大气透过率, 可表示为:

$$T = \int_0^1 \exp\left[-\tau_0 \left(\frac{x}{\mu} + \frac{1-x}{\mu_0}\right)\right] dx \tag{4}$$

由(1)和(2)式有:

$$\frac{L}{F} = \frac{\omega T(\mu_0, \mu, \tau_0)}{T_0} \tag{5}$$

3 不同类型污染气溶胶散射特征的观测

3.1 综合散射率的获取

为避免观测角不同所导致的复杂变化, 取与太阳天顶角相等的观测角, 且为使相同散射角的向上散射接近垂直, 观测天顶角取 60°, 散射角为 120°左右。由于观测条件限制, 实际观测角在 40°—60°之间, 下节将证明, 观测角稍小所引起的误差很小。由于观测天顶角与太阳天顶角相同, $\mu_0 = \mu$ 。由(4)式得

$$T = \exp(-\tau_0 / \mu_0) = T_0$$

由(5)式得:

$$\omega = \frac{L}{F} \tag{6}$$

由此可方便地由观测数据求得整层大气的综合散射率。

3.2 背景气溶胶和分子散射的扣除

大气散射由气溶胶散射和分子散射组成, 故 ω 又可表示为: $\omega = \omega_{qp} + \omega_{ab} + \omega_m$, 其中 ω_{qp} 、 ω_{ab} 和 ω_m 分别为污染气溶胶、背景气溶胶和分子的路径散射反射率。需从 ω 扣除背景气溶胶和分子散射的影响才能获得我们所需要的污染气溶胶散射率 ω_{qp} 。背景气溶胶主要为自然成因的非沙尘气溶胶和上升到平流层的人为成因气溶胶组成, 其在水平方向上变化缓慢, 在数十公里尺度上可认为是不变的。为减去其影响, 每次测量过程中均在逆风方向, 距城区 30km 左右, 且远离工厂和主要公路的乡村地区用上

述方法测量大气散射率。由于这些地方污染气溶胶近于 0, 测得的散射率为:

$$\omega' = \omega_{ab} + \omega_m$$

将城区测算得的 ω 中减去 ω' 即可得到污染气溶胶的散射反射率 ω_{ap} 。

3.3 不同类型污染的散射率测算结果及曲线特征分析

所测试的污染类型包括城近郊低污染区、城中低污染区、公路交通枢纽、以煤为燃料的大型工厂附近以及该类大型工厂烟道下等 5 种污染类型共 13 个样点, 所得气溶胶散射曲线见图 2。

研究表明^[9,10], 城市污染气溶胶由煤烟、水溶性粒子和沙尘三种成因、特征不同的粒子组成。由于其粒度和折射率等特征不同, 对阳光的吸收和散射各有差异。其中对散射影响最大的是粒度分布。标准辐射大气(SRA)气溶胶模型的对数正态分布参数如表 1 所示。

表 1 标准辐射大气(SRA)气溶胶模型对数正态分布参数

Table 1 Normal Distribution Parameters of Standard Radiation Atmosphere

成分	水溶性	沙尘性	煤烟
R/μ_m	0.005	0.50	0.0118
σ	2.99	2.99	2.00

可见光—近红外波段, 水溶性粒子和煤烟尺度参数均小于 0.1, 其散射以瑞利散射为主, 短波部分的散射率远大于长波部分。沙尘性粒子则由于粒度较粗, 以米氏散射为主, 虽短波部分的散射率仍大于长波部分, 但较之水溶性粒子和煤烟, 其曲线变化的曲率大为减小。对于每一种污染类型, 其所产生的气溶胶一般均包含了该三种类型, 只是三种类型的含量比例不同。

图 2 中, 曲线 yz 为北京市南郊亦庄测点的气溶胶下行散射率曲线, 其特点除散射率值较低外, 在短波部分散射率值快速增加, 曲线曲率最大, 反映市郊人为气溶胶以水溶性粒子和煤烟为主。曲线 yyc 为亚运村奥体中心的下行散射率曲线。该点位于市区内, 但离大型工厂较远, 离主要公路也有数百米距离。曲线的值较亦庄的稍大, 但曲率略小, 反映市区低污染区与市郊接近, 惟污染浓度略大, 气溶胶的粗粒成分稍多。gcl 为首都钢铁厂东侧, 距工厂烟道约 2km 的古城路观测的气溶胶下行散射率曲线, 观测时为和缓的南风, 代表了厂区周围非烟道区的污染气溶胶特征。曲线的特点是散射率值明显大于正常市区的 yyc, 但曲率并未明显减小, 反映厂区周围非烟道区的

污染程度明显大于市区, 但气溶胶的颗粒并不明显增大。曲线 syq 为三元桥的散射率曲线。该点为市内车流量最大的公路交通枢纽之一。曲线特点是散射率值明显较前三条曲线为高, 曲线和曲率也明显的小。反映公路交通的污染也非常大, 污染气溶胶中粉尘和煤烟的量均较大。曲线 sgd 的测点位置为首钢东门, 观测时该点正位于工厂的烟道内。曲线的特征是散射率值最大, 曲率也最小, 反映以煤为燃料的工厂污染为最严重, 污染物除煤烟外, 粉尘的量也非常大。

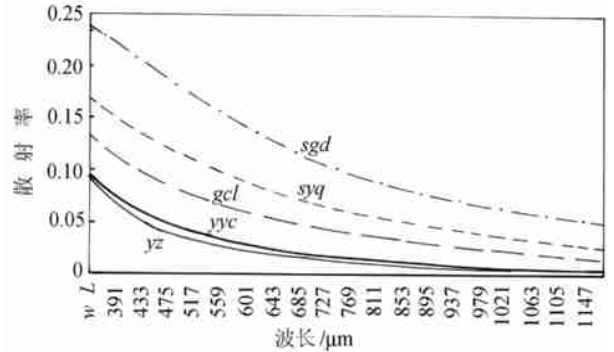


图 2 北京市五种不同污染类型气溶胶下行散射率曲线
Fig. 2 Curves of downward path scattering coefficient of five air pollution types in Beijing City

4 观测角度与污染气溶胶散射率关系的实验

实验方法是分别在太阳主平面和垂直太阳主平面上以不同的观测天顶角进行观测, 并用上述相同的方法进行计算。定义太阳主平面上, 偏向太阳相反方向的观测天顶角为正, 反之为负; 垂直太阳主平面上, 偏北方向为正, 偏南方向为负; 并称此时用上述方法算得的值为视气溶胶散射率, 其值为:

$$\omega_{ap}' = \frac{L}{F} = \frac{\omega_{ap} T(\mu_0, \mu', \tau_0)}{T_0} \quad (7)$$

4.1 观测角在太阳主平面上变化的影响

在主平面上, (7) 式可写成:

$$\omega_{ap}' = \frac{\omega_0 P(\alpha + \theta) T(\alpha)}{4\pi T_0 \cos \alpha} \quad (8)$$

图 3 为中科院遥感所前草坪测点用太阳主平面上不同观测角所测算的视气溶胶散射率曲线。观测时太阳天顶角为 45°。图中曲线断开部分是由于水吸收带影响和仪器性能的限制, 数据不可用所致, 下同。从该图可看出, 散射率随观测天顶角 α 的增大而减小。但随观测角的增大, 散射率减小的速率快速降低。当 α 大于 20° 时, 所测得的散射率即与 $\alpha=$

60°时的散射率极为接近,即 $\omega_{sp}' = P(\alpha + \theta) T(\alpha)$ 接近为一常数。图 4 为三元桥上在太阳主平面上不同观测天顶角所测的视气溶胶散射率曲线。观测时太阳天顶角为 30°。图中可看出,散射率也随 α 的增大

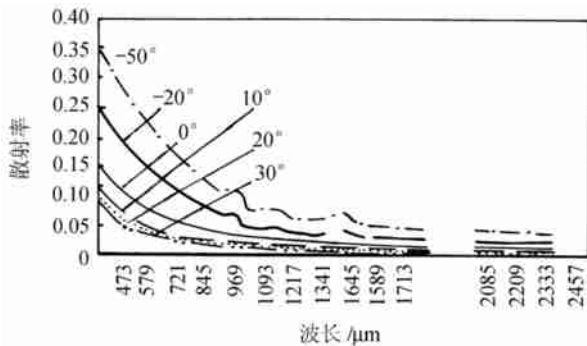


图 3 遥感所草坪太阳主平面上不同观测天顶角测算的视散射率曲线 (图中数字为观测天顶角,下同)

Fig. 3 Apparent Scattering coefficient curves of different observational zenith angles on solar principle plane on the lawn before Remote Sensing Institute (Numbers in the figure are the zenith angles of observation, and it's the same in following)

而减小。较之遥感所观测点,其减小的幅度更大。在 $\alpha > 30^\circ$ 后,所测得的散射率也与 $\alpha = 60^\circ$ 时的散射率接近。表 2 和表 3 为该两个观测点不同观测角度下的观测散射率与 $\alpha = 50^\circ$ 时的散射率之间,在波长 350—1000 μm 的误差统计。可见在太阳天顶角较大,且观测天顶角大于 40° 时,相对误差均小于 0.004, $P(\alpha + \theta) T(\alpha) / \cos \alpha$ 接近为一常数,观测天顶角的变化对散射率的计算结果影响不大。

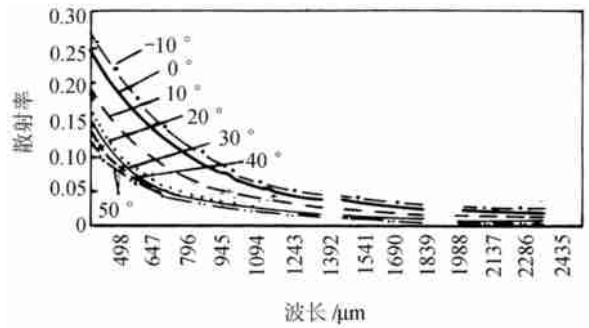


图 4 三元桥太阳主平面上不同观测天顶角测算的视散射率曲线

Fig. 4 Apparent Scattering coefficient curves on principle plane but under different zenith angles on the point of Shan Yuan Bridge

表 2 遥感所草坪太阳主平面上不同观测天顶角与 50° 太阳天顶角所测视散射率误差对比

Table 2 The Compare of Apparent Scattering coefficient Errors of aerosol under 50° sunlight zenith angle and different observational zenith angles

观测角/(°)	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	60
平均绝对误差	0.125	0.074	0.03	0.02	0.011	0.004	0.001	0	-0.001
平均相对误差	2.77	1.535	0.72	0.67	0.625	0.21	0.06	0.001	-0.001

表 3 三元桥太阳主平面上不同观测天顶角与 50° 观测天顶角下所测散射率偏差对比

Table 3 Apparent scattering coefficient errors of aerosol on principle plane but under different zenith angles on the point of Shan Yuan Bridge

观测角/(°)	-10	0	10	20	30	40
平均绝对误差	0.073	0.06	0.031	0.013	0.004	0.001
平均相对误差	1.557	0.967	0.766	0.099	0.028	0.0034

4.2 观测角在垂直太阳主平面上变化的影响

在垂直太阳主平面上,观测天顶角在正负方向上所引起的散射率变化是对称的。图 5 和图 6 分别为中科院遥感所前草坪上和三元桥上,在垂直太阳主平面上不同观测角所测的气溶胶视散射率曲线。观测时太阳天顶角仍分别为 45° 和 30°。图中可看出,散射率仍有随观测天顶角增大而减小的趋势,且

也是气溶胶粒度较粗的三元桥的变化趋势更明显。但较之沿太阳主平面的观测,散射率随观测角变化的幅度大为减小。原因是观测天顶角变化角度相同时,散射角沿垂直太阳主平面的变化比沿太阳主平面的变化小。这也说明散射角的变化是引起散射率变化的主要因素。

5 污染气溶胶路径散射模拟及气溶胶混浊度的反演

5.1 人为气溶胶的光学特征及其数值模拟

5.1.1 气溶胶的光学厚度与气溶胶含量的关系

为表示大气气溶胶的数量和尺度特点,Ångstrom 提出气溶胶的光学厚度为:

$$\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha} \tag{9}$$

其中 β 为 Ångstrom 大气混浊度参数,表示整层大气

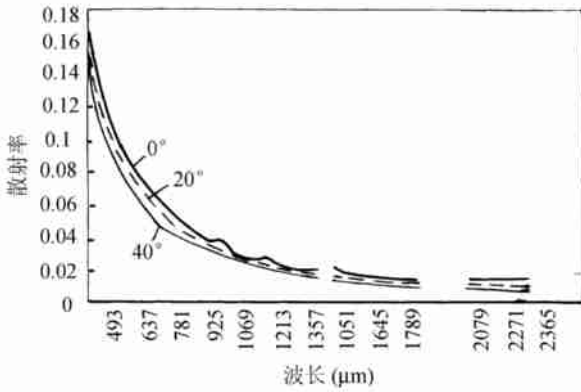


图 5 遥感所前草坪在垂直太阳主平面上不同观测角所测的视气溶胶散射率曲线

Fig. 5 Apparent scattering coefficient curves measured at different zenith angles perpendicular to the solar principle plane on the lawn before Remote Sensing Institute

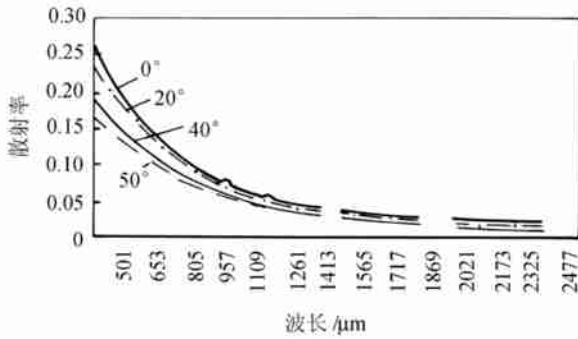


图 6 三元桥垂直太阳主平面上不同观测角所测的视气溶胶散射率曲线

Fig. 6 Apparent scattering coefficient curves measured on Shan Yuan Bridge, under different observational zenith angles perpendicular to the solar principle plane

中气溶胶的数量。α 为波长指数, 与气溶胶粒子平均半径 \bar{r} 有关。根据观测, 波长指数 α 与气溶胶平均半径的统计关系如表 4^[10]。

表 4 波长指数 α 与大气气溶胶平均半径 \bar{r} 的统计关系(引自 W. Schüpp, 1949)

Table 4 Statistics Relation between Wavelength Index α and the average radius of aerosol \bar{r} (Derived from W. Schüpp, 1949)

波长指数	0	1.3	1.5	2.0
$\bar{r}/\mu\text{m}$	> 2.0	0.6	0.5	0.22—0.25
波长指数	2.25	3.0	3.8—4.0	
$\bar{r}/\mu\text{m}$	0.15	0.062—0.1	≤ 0.02	

(9) 式可以写成:

$$\tau_a = C m_a \lambda^{-\alpha}$$

C—常数, m_a —单位气柱所含气溶胶的质量。

5.1.2 污染气溶胶的综合光学厚度

由于污染气溶胶由煤烟、水溶性和沙尘性三种类型组成, 有:

$$\tau_a = \tau_{a1} + \tau_{a2} + \tau_{a3}$$

即: $\tau_a = \beta_1 \lambda^{-\alpha_1} + \beta_2 \lambda^{-\alpha_2} + \beta_3 \lambda^{-\alpha_3}$ (10)

τ_{a1} 、 τ_{a2} 、 τ_{a3} 分别为煤烟、水溶性和沙尘性气溶胶的光学度; β_1 、 β_2 、 β_3 和 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为三种气溶胶的气溶胶混浊度和波长指数。根据表 1 和表 4, 煤烟、水溶性粒子的波长指数约为 3.8, 沙尘性粒子为 1.5。将三种气溶胶所对应的波长指数代入(10)式得:

$$\tau_a = (\beta_1 + \beta_2) \lambda^{-3.8} + \beta_3 \lambda^{-1.5}$$
 (11)

5.1.3 光学厚度和路径散射的关系

气溶胶光学厚度取决于大气中气溶胶的数量、路径散射率和吸收率, 故与路径散射强度存在一定的函数关系。该关系可根据米散射理论推导出来, 但由于米散射理论气溶胶粒子为球型的假设与实际相去甚远, 可导致较大误差^[7,9], 相比之下根据观测数据得出的经验公式具有更高的精度, 因其隐含了尚不为人知的所有特征。Yoram J. Kaufman 等^[8]根据分布于全球的三十多个观测站, 航天和地面的同步观测数据得出了气溶胶在观测角和太阳天顶角均为 60° 时的气溶胶路径散射与光学厚度的经验公式。由于大气分子散射的影响, 不同波段的经验公式略有差异。我们取波段较长、因而受分子散射影响较小的 872nm 波长的公式如下:

$$\omega = 0.008 + 0.169 \tau_a - 0.041 \tau_a^2$$

ω 为气溶胶下行散射率。理论上, $\tau_a = 0$ 时, 气溶胶粒子数等于 0, 故 $\omega = 0$ 。式中常数 0.008 是受分子散射影响所至。当已扣除分子散射影响时, 应去掉该常数, 即:

$$\omega = 0.169 \tau_a - 0.041 \tau_a^2$$
 (12)

5.2 气溶胶混浊度的反演

ω 是波长的函数, 理论上只要两个波段的 ω 值: $\omega(\lambda_1)$ 、 $\omega(\lambda_2)$ 已知, 就可通过(11)和(12)式求出 $\beta_1 + \beta_2$ 、 β_3 , 作出散射率 $\omega(\lambda)$ 随波长的分布曲线。当用多组数据进行计算时, 将模拟计算所得曲线与根据观测值计算得到的曲线对比, 当拟合得最好时, 所取的 $\beta_1 + \beta_2$ 、 β_3 值即为观测时三模态气溶胶的混浊度, 其反映单位立柱气溶胶含量。使模拟计算曲

线与实验值计算曲线较好拟合需具备两个条件。一是计算模型正确,二是求出三种模态气溶胶的混浊度与实际相同或相近。图 7 为北京市六个观测点的气溶胶散射率实测数据计算曲线和模拟计算曲线。六个点中四个污染程度中等或较轻的点实测值计算曲线与模拟计算曲线极为接近,亦庄和奥体中心的实测计算曲线和模拟计算曲线几乎完全重合。污染程度较重的三元桥和首钢东门两个点误差相对较大。观测值与计算值对比误差情况见表 5:

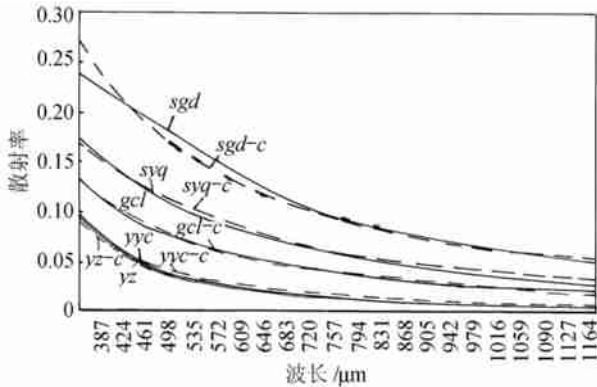


图 7 北京市六个观测点的气溶胶散射率的观测数据计算曲线与模拟计算曲线

yz、*yys*、*gcl*、*syq* 和 *sgd* 分别为亦庄、奥体中心、古城路、三元桥和首钢东门的气溶胶实测散射率曲线。*yz-c*、*yys-c*、*gcl-c*、*syq-c*、和 *sgd-c* 为亦庄、奥体中心、古城路、三元桥和首钢东门的气溶胶计算散射率曲线。

Fig. 7 Calculated and Measured Scattering Coefficient Curves of Aerosol on Six Observational Points of Beijing City

yz、*yys*、*gcl*、*syq* and *sgd* denote the measured scattering coefficient curves of aerosol on the points of Yizuan, Olympic Center, Gucheng Road, Shanyuan Bridge and Capital Steel Plant respectively; *yz-c*、*yys-c*、*gcl-c*、*sgd-c* and *sgl-c* denote the calculated scattering coefficient curves of aerosol on the points of Yizuan, Olympic Center, Gucheng

Road, Shanyuan Bridge and Capital Steel Plant respectively.

表 5 北京市六个观测点的污染气溶胶混浊度计算误差

Table 5 Calculated Errors of Synthetic Aerosol Turbidities on Six Observational Points in Beijing City

观测点	奥体中心	古城路	亦庄	遥感所	三元桥	首钢
$\beta_1 + \beta_2$	0.0023	0.0117	0.0241	0.0233	0.0043	0.0057
β_3	0.1760	0.4909	0.1297	0.1297	0.7782	1.2227
$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3$	0.1782	0.5026	0.1538	0.1530	0.7826	1.2286
最大绝对误差	0.0050	0.0062	0.0029	0.0030	0.0070	0.0385
平均绝对误差	0.0014	0.0021	0.0006	0.0006	0.0033	0.0057
平均相对误差	0.1280	0.0598	0.0847	0.0818	0.0637	0.0432

从表 5 中可看出,模拟计算值与根据观测数据计算值非常接近。随光学厚度的增大,计算值与观测值的误差有增大的趋势,显示多次散射的影响结果。但总精度在可以接受的范围。

6 问题与结论

本文旨在初步建立气溶胶混浊度与其路径散射的关系。为简单起见,主要考虑一次散射的影响,在气溶胶混浊度较大时不可避免地会导致一定的误差。多次散射对于城市污染的光学特性有不可忽视的影响,是一个有待进一步研究的问题。在一般情况下,气溶胶光学厚度与其路径散射的关系以及上行路径散射与下行路径散射的关系非常复杂,除了与太阳天顶角和观测角有关外,还与气溶胶的类型、粒度谱分布、吸收率等有关。本文采用 Y. J. Kaufman 等建立的经验公式,其精度取决于研究区与建立经验公式实验区气溶胶特性的相似程度。本文得到的气溶胶波长指数等参数只适于北京市大气污染的情况,应用于其它地区可能会造成一定的误差。另外,为获得散射率在整个可见光至近红外波段的连续变化特征,本项研究采用 ASD 连续光谱仪以小角度工作模式进行对空观测,由于条件所限,未能将其结果与太阳光度计等标准对空观测仪器的观测结果进行对比,故其绝对精度还有待于作进一步的验证,但并不妨碍我们得到定性的结果。从上述结果可得到以下结论:

(1) 污染气溶胶的组成可以从其散射率随波长的变化曲线得到反映。煤烟型和水溶性粒子为主的污染气溶胶散射率曲线随波长而减的曲率大,以沙尘性粒子为主的污染气溶胶散射率曲线的曲率小。散射率大小则反映气溶胶的数量。

(2) 城市中低污染区和城郊的污染气溶胶以水溶性粒子和煤烟为主,公路交通和以煤为燃料的工

厂的污染气溶胶则是煤烟型和沙尘型粒子含量均较高。

(3) 观测天顶角沿垂直太阳主平面的变化对散射率观测值的影响远比沿太阳主平面的变化的影响小。

(4) 用多波段的散射率数据可以对污染气溶胶的混浊度进行反演。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Belin, Wang qiang, Mao Jietai, Qing Yu. Study on Optic Remote Sensing for aerosol and moisture in the Atmosphere[J]. *Chinese Science (B)* 1983, **10**: 951—962. [赵柏林, 王强, 毛节泰, 秦瑜. 光学遥感大气气溶胶和水汽的研究[J]. *中国科学(B)* 1983, **10**: 951—962.]
- [2] Mao Jietai, Wang qiang, Zhao Belin. Observation of penetrate spectrum and turbidity of atmosphere[J]. *Meteorologic Journal*, 1983, **41**(3): 322—331. [毛节泰, 王强, 赵柏林. 大气透明度光谱和浑浊度的观测[J]. *气象学报*, 1983, **41**(3): 322—331.]
- [3] Lu Dayin, Zhou Xiuji, Qiu JingHuan. The Theory and Numeric Experiment of Extinction and small Angle Scattering Remote Sensing for the distribution of Aerosol[J]. *Chinese Science*, 1981, **12**: 1516—1523. [吕达仁, 周秀骥, 邱金桓. 消光—小角度散射综合遥感气溶胶分布的原理与数值试验[J]. *中国科学*, 1981, **12**: 1516—1523.]
- [4] Quo JingHuan, Wang Hongqi, Zhou Xiuji, Lu Dayin. The Numeric Experiment of Extinction and small Angle Scattering Remote Sensing for the distribution of Aerosol[J]. *Atmospheric Science*, 1983, **7**(1): 33—41. [邱金桓, 汪宏七, 周秀骥, 吕达仁. 消光—小角度散射法遥感气溶胶分布的实验研究[J]. *大气科学*, 1983, **7**(1): 33—41.]
- [5] D. Tanre', M. Herman and Y.J. Kaufman. Information on aerosol single distribution contained in solar reflected spectral radiances[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996. **101**(14): 19043—19060.
- [6] Tenyuki Nakajima, Gbuto Tonna, Ruizhong Rao, Daofu Boi et al. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions[J]. *Applied Optics*, 1996. **35**(15): 2672—2686.
- [7] Y.J. Kaufman, A. Gitelson, A. Kameli, E. Gan or et al.. Size distribution and scattering phase function of aerosol particles retrieved from sky brightness measurements[J]. *Journal of Geophysical Research* 1994. **99**(5): 10341—10356.
- [8] Yoram, J. Kaufman. Aerosol Optical Thickness and Atmospheric Path Radiance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(2): 2677—2692.
- [9] Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. Tutorial of Atmospheric Aerosol [M]. Meteorologic Press, 1995. 6. [章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M], 气象出版社, 1995. 6.]
- [10] Yi Hong. Base of Atmospheric Radiation[M]. Meteorologic Press, 1993. 10. [尹宏. 大气辐射学基础[M]. 气象出版社, 1993. 10.]

Experiment and Numeric Simulation for the Scattering Characteristics of Pollute Aerosol in Beijing City

DENG Ru-ru^{1,2}, TIAN Guo-liang², SUN Quan³, ZHANG Li-jun⁴, ZHI Yi-qiao²

(1. Center for Remote Sensing Application, Zhong Shan University, Guangzhou 510275, China;

2. LARSIS, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Parent Company of Geological Equipment, Beijing 100027, China;

4. National Meteorologic Bureau, Beijing 100101, China)

Abstract: Using ground based remote sensing, multiple angle observational experiment for the scattering of synthetic aerosol of the main types of air pollution in Beijing was carried out. The scattering characteristics of synthetic aerosol in different air pollution types, and under different observational angle, are compared and analyzed, and then draw to the conclusions that: (1) the composition of synthetic aerosol can be reflected by its scattering coefficient curve. To the pollution type whose synthetic aerosol is mainly composed of coal smoke and soluble particles, the curvature of scattering coefficient curve changing with wavelength are obviously larger than that of the pollution type whose synthetic is mainly composed of sand and dust. The amount of synthetic aerosol is reflected by the value of scattering coefficient. (2) Synthetic aerosol on slightly polluted urban area are mainly composed of coal smoke and soluble particles, and in the composition of the synthetic aerosol on the area near large plants or on traffic line, both of coal smoke and dust are very high. (3) When zenith angles of sunlit and observation are larger than 40° , the change of observation angle only have slight influence to the result of observation. The change of zenith angle on the direction perpendicular to solar principle plane has far smaller influence on the result of scattering coefficient observation.

Base on the result of experiment, the numeric model for simulating synthetic aerosol scattering is built, laying a base for the space-borne remote sensing of synthetic aerosol.

Key words: air pollution; synthetic aerosol; scattering coefficient; remote sensing