

# 兰州冬季气溶胶光学特性的参数化<sup>\*</sup>

田文寿 陈长和

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

**提 要** 兰州冬季气溶胶的谱分布用双谱模式拟合, 即 Junge 谱加 Deirmendjian 谱; 气溶胶的平均折射率为 1.549–0.1i; 气溶胶浓度随高度的分布根据天气条件取为高斯、均匀、指数分布三种类型。以此为基础, 计算出兰州冬季气溶胶光学厚度的平均值。经实测的气溶胶光学厚度与本文的计算值比较后发现, 我们的参数化方案基本上是成功的。

**关键词** 消光系数 单次散射反照率 光学厚度 烟雾层

## 1 引言

气溶胶从两个方面影响着大气辐射和气候: 一方面太阳辐射被散射回空间, 从而减少了地气系统的能量收支; 另一方面, 气溶胶吸收太阳辐射能而增加了大气直接获得的能量。从这个意义上讲, 我们就需要了解气溶胶的散射和吸收特性。但迄今为止, 由于气溶胶物理和化学特性的复杂性, 现场测量分析方法难以完全满足物理化学分析的需要。这主要原因在于: (1) 特定设备对给定尺度粒子其取样效率的不确定性; (2) 分析之前粒子所产生的物理和化学性质的变化而引起的分析的不确定性<sup>[1]</sup>。

鉴于上述原因, 关于气溶胶光学特性的实测资料并不多, 而这些有限的观测资料不能满足计算其辐射效应和边界层模式等的要求。因此给出一种气溶胶光学特性的参数方案将是非常必要且有着实际的意义。另一方面, 辐射理论迄今已发展得比较成熟, 从而为参数化提供了理论基础, 本文将试图为研究气溶胶的辐射效应及其对边界层发展的影响提供一种光学特性的参数化方案。

## 2 散射、吸收、消光系数及单次散射反照率

单个球形粒子的散射效率因子  $Q_s$  和消光效率因子  $Q_e$ , Mie 理论给出了其严格表达式。在本文中我们避免计算复杂的米系数而用高精度的 Deirmendjian<sup>[2]</sup> 和 Hanel<sup>[3]</sup> 近似关系来计算消光和吸收效率因子  $Q_e$ 、 $Q_a$ 。进而利用下式计算散射效率因子  $Q_s$ 。

$$Q_s = Q_e - Q_a \quad (1)$$

这样在粒子尺度分布一定时, 我们就可以确定粒子样品的消光、散射及吸收系数 (以  $L^{-1}$  为单位)  $\beta_e$ ,  $\beta_s$ ,  $\beta_a$ , 其表达式为

1994-11-08 收到, 1995-03-01 收到修改稿

• 国家自然科学基金资助项目

$$\beta_e = \int_{r_1}^{r_2} Q_e \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr, \quad (2)$$

$$\beta_s = \int_{r_1}^{r_2} Q_s \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr, \quad (3)$$

$$\beta_a = \beta_e - \beta_s. \quad (4)$$

粒子样品的单次散射反照率 $\omega_0$ 定义为

$$\omega_0 = \beta_s / \beta_e. \quad (5)$$

到此,只要气溶胶的折射指数和谱分布确定了,那么气溶胶的上述四个光学特征参数就可得到。

根据我们 1992 年 12 月对兰州气溶胶粒径质量浓度的测量结果,兰州气溶胶的谱分布可用如下形式的双谱模式来代表:

$$\frac{dN(r)}{dr} = \begin{cases} ar^{-\beta}, & (r \leq 1 \mu\text{m} \text{ Junge谱}) \\ cr^2 \exp(-\alpha r^\gamma), & (r > 1 \mu\text{m} \text{ Deirmendjian谱}) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $a, c, \beta, \alpha, \gamma$  为拟合系数。兰州冬季气溶胶的平均折射指数从东亚大气监测网兰州市监测资料对兰州市区的 TSP 两年的监测和成分分析结果计算所得,其代表值为  $n_c = 1.55-0.1i$ , 本文为了了解不同折射指数对光学参量的影响,在短波区取  $n_c = 1.50-0.005i$ (气溶胶弱吸收)和  $n_c = 1.72-0.5i$ (代表碳质气溶胶,有较强的吸收)两种理想情况与兰州的实际情况做比较。

对于(2)和(3)中积分的下限 $r_1$ ,在本文中取为  $0.01 \mu\text{m}^{[4]}$ ;而最活跃的气溶胶粒子的尺度范围在  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$  的区域<sup>[5]</sup>,粒径大于  $50 \mu\text{m}$  的范围可令  $dN(r)/dr = 0^{[6]}$ 。事实上,因为大于  $50 \mu\text{m}$  的粒子很快的沉降,对消光的影响很小。所以计算中 $r_2$ 取  $50 \mu\text{m}$  已经足够。在实际计算过程中也发现当 $r_2$ 大于  $20 \mu\text{m}$  时, $r_2$ 的取值已对 $\beta_e, \beta_s, \beta_a$ 的影响变得很小。

表 1 列出了波长  $0.55 \mu\text{m}$  处 $\beta_s, \beta_e, \beta_a, \omega_0$ 的计算结果。从表可以看出 $\beta_e, \beta_s$ 都随  $k$  的增大而增大,而 $\omega_0$ 随  $k$  的增大而减小, $\beta_s$ 随  $k$  和  $n$  同时变化,但主要与折射指数实部  $n$  有关。

表 1 气溶胶的 $\beta_s, \beta_e, \beta_a, \omega_0$  ( $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ )

| $n$   | $k$   | $\beta_s / \text{km}^{-1}$ | $\beta_e / \text{km}^{-1}$ | $\beta_a / \text{km}^{-1}$ | $\omega_0$ |
|-------|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|
| 1.497 | 0.005 | 0.321                      | 0.335                      | 0.013                      | 0.961      |
| 1.549 | 0.100 | 0.326                      | 0.485                      | 0.159                      | 0.637      |
| 1.721 | 0.500 | 0.402                      | 0.777                      | 0.375                      | 0.517      |

本文计算的在波长为  $0.55 \mu\text{m}$  处兰州冬季气溶胶的消光系数为  $0.48 \text{ km}^{-1}$  (能见度按  $V = 3.91 / \beta_e$  计算为  $8 \text{ km}$ ), 此值比邱金桓等人<sup>[7]</sup>用激光雷达测量的北京晴朗天气条件下的地面消光系数大二倍之多。这一结果在兰州气溶胶污染比北京严重的情况下可认为是合理的。

为了了解不同半径间隔气溶胶粒子对消光的贡献,我们分别计算了粒子半径在

0.01 至  $1\mu\text{m}$  间隔和大于  $1\mu\text{m}$  时消光系数。表 2 列出了在两个半径间隔内的消光系数占总消光的百分数。从表可以看出, 半径在 0.01 到  $1\mu\text{m}$  范围以外的粒子对消光的贡献很小, 不超过 10%, 而小于  $1\mu\text{m}$  的粒子对消光起着重要的作用。

表 2 不同半径间隔气溶胶消光系数及其所占总消光的百分数

| 间 隔                   | $0.01 \leq r \leq 1 \mu\text{m}$ |     | $r > 1 \mu\text{m}$        |     |
|-----------------------|----------------------------------|-----|----------------------------|-----|
| $\beta_e$             | $\beta_e / \text{km}^{-1}$       | 百分数 | $\beta_e / \text{km}^{-1}$ | 百分数 |
| 波长 $0.38 \mu\text{m}$ | 0.583                            | 96% | 0.020                      | 4%  |
| 波长 $0.55 \mu\text{m}$ | 0.462                            | 95% | 0.023                      | 5%  |

计算中还发现气溶胶的单次散射反照率随波长的变化并不显著, 但折射率  $n_c$  的不同将导致  $\omega_0$  的显著不同。在短波区, 对应于兰州气溶胶的折射率  $n_c = 1.549 - 0.1i$  的情况, 单次散射反照率的平均值为 0.687。

### 3 光学厚度

气溶胶的光学厚度主要取决于气溶胶含量, 又随波长变化。在大气气溶胶光学特性的研究中, 普遍采用 Angstrom 公式来描述气溶胶的光学厚度随波长的变化关系:

$$\tau(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (7)$$

式中  $\beta$  为浑浊度系数,  $\alpha$  为波长指数。但 Angstrom 公式的前提是假设气溶胶的粒子谱为 Junge 谱, 而且基本上不适用于气溶胶光学厚度小于 0.1 的洁净大气。本文根据光学厚度的定义, 直接计算气溶胶的光学厚度。光学厚度定义为

$$\tau_\lambda = \int_Z^\infty \beta_{e\lambda}(Z) dZ. \quad (8)$$

从(8)式计算  $\tau_\lambda$  首先需要知道消光系数  $\beta_{e\lambda}(Z)$  随高度的变化规律。我们知道, 气溶胶质量浓度随高度的不同分布将导致气溶胶消光系数的不同分布。如果气溶胶的粒子谱分布和组成成分随高度不变时, 气溶胶消光系数随高度的变化规律将与气溶胶质量浓度随高度的变化规律相同。

过去几十年, 尽管有关气溶胶质量浓度随高度分布的测量工作已做了不少, 却没有得到一个统一的结论。Bach<sup>[8]</sup>测量结果发现气溶胶浓度的垂直变化很小; 王明星<sup>[9]</sup>的测量结果表明气溶胶粒子浓度随高度并不单调下降; 而从我们 1992 年冬季对兰州气溶胶的直接观测情况来看, 由于兰州特殊的地形条件和气候条件, 通常在一定高度  $Z_{\max}$  (平均约为 600 m) 以下烟雾笼罩, 而在  $Z_{\max}$  以上大气却非常清洁。

本文综合考虑上面各种研究结果和观测结果, 对兰州地区来讲, 气溶胶的垂直分布取了三种类型: 第一种为高斯型, 在  $Z_{\max}$  以下高斯分布, 在  $Z_{\max}$  以上认为是自然气溶胶, 取为指数分布。此种分布对应的气象条件为存在着逆温的稳定大气; 第二种分布称为指数型, 在整个高度, 气溶胶浓度随高度指数分布。此种分布可认为对应于午后不稳定的天气条件扩散强而不受阻挡; 第三种称为均匀型, 在  $Z_{\max}$  以下均匀分布, 而  $Z_{\max}$  以上仍取自然气溶胶。此种分布对应于混合层内垂直对流较强, 污染物均匀混合的情

况。与此相应的, 气溶胶消光系数随高度的变化规律可取如下的三种形式:

高斯型

$$\beta_{e\lambda}(Z) = \begin{cases} \beta_1 \exp[-(Z_e - Z)^2 / 2\sigma_e^2], & Z \leq Z_{\max}, \\ \beta_2 \exp(-Z/h), & Z > Z_{\max}; \end{cases} \quad (9)$$

均匀分布型

$$\beta_{e\lambda}(Z) = \begin{cases} \beta_0, & Z \leq Z_{\max}, \\ \beta_0 \exp(-Z/h), & Z > Z_{\max}; \end{cases} \quad (10)$$

指数型

$$\beta_{e\lambda}(Z) = \begin{cases} \beta_0 \exp(-Z/h), & Z \leq Z_{\max}, \\ \beta_0 \exp(-Z_{\max}/h) \cdot \exp(-Z/h), & Z > Z_{\max}; \end{cases} \quad (11)$$

式中  $h$  为气溶胶层的标高, 根据 Bullich<sup>[10]</sup> 的研究取为 1.25 km,  $\sigma_e$  为标准差, 利用兰

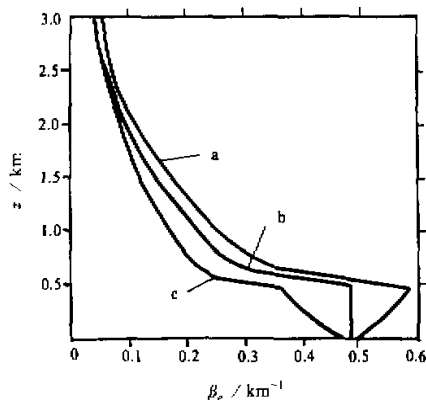


图 1  $\beta_e$  随高度的变化

(a) 高斯型, (b) 均匀型, (c) 指数型

州三个高度气溶胶浓度的实测资料做高斯拟合后发现  $\sigma_e$  取 1 较符合实际。至于  $Z_e$  如果认为气溶胶浓度在烟雾层顶达到最大, 则可取  $Z_e$  等于  $Z_{\max}$ 。  $\beta_0$  为地面消光系数, 由上节计算所得。  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别由下面两式确定:

$$\beta_1 = \beta_0 / \exp(-Z_e^2 / 2\sigma_e^2), \quad (12)$$

$$\beta_2 = \beta_1 \exp[-(Z_e - Z_{\max})^2 / 2\sigma_e^2]. \quad (13)$$

这样, 波长在 0.55  $\mu\text{m}$  处的兰州冬季气溶胶消光系数随高度的分布如图 1 所示。

现在, 气溶胶消光系数随高度为高斯分布时, 气溶胶的垂直总光学厚度可通过下面的积分获得:

$$\begin{aligned} \tau_{\lambda}(0) &= \int_0^{\infty} \beta_{e\lambda}(Z) dZ \\ &= \int_0^{Z_{\max}} \beta_1 \exp[-(Z_e - Z)^2 / 2\sigma_e^2] dZ + \int_{Z_{\max}}^{\infty} \beta_2 \exp(-Z/h) dZ, \end{aligned} \quad (14)$$

上式中第一项的积分不是初等函数, 不能用牛顿-莱布尼兹公式计算这一积分, 但我们可以对此积分做如下的变换:

现令

$$X = (Z_e - Z) / \sqrt{2}\sigma_e,$$

则(14)式中第一项的积分可写成  $\tau_{\lambda_1}$ , 则

$$\tau_{\lambda_1} = \int_0^{Z_{\max}} \beta_1 \exp[-(Z_e - Z)^2 / 2\sigma_e^2] dz = -\sqrt{2}\sigma_e \beta_1 \int_{X_1}^{X_2} e^{-X^2} dX, \quad (15)$$

式中  $X_1 = Z_c / \sqrt{2} \sigma_c$ ,  $X_2 = (Z_c - Z_{\max}) / \sqrt{2} \sigma_c$ , 而  $e^{-X^2}$  有如下的泰勒展式:

$$e^{-X^2} = 1 - X^2 + \frac{X^4}{2!} + \dots + \frac{(-1)^n}{n!} X^{2n} + \frac{1}{(n+1)!} (-1)^{n+1} e^{-\theta X^2} X^{2n+2}, \quad (0 < \theta < 1)$$

于是积分

$$\int_0^1 e^{-X^2} dX = \int_0^1 \left( 1 - X^2 + \frac{X^4}{2!} + \dots + \frac{(-1)^n}{n!} X^{2n} \right) dX,$$

的误差将不超过

$$\int_0^1 \frac{1}{(n+1)!} e^{-\theta X^2} X^{2n+2} dX \leq \frac{1}{(2n+3)(n+1)!}, \quad (16)$$

事实上, 当  $n=4$ , 误差已不超过 0.00064, 由此对(14)式第一项的积分由下面的有理积分代替精度已足够(对  $X_1, X_2 < 1$ ):

$$\tau_{\lambda 1} = -\sqrt{2} \sigma_c \beta_1 \int_{X_1}^{X_2} \left( 1 - X^2 + \frac{X^4}{2!} - \frac{X^6}{3!} + \frac{X^8}{4!} \right) dX, \quad (17)$$

这样当  $\sigma_c = 1$ ,  $Z_{\max} = Z_c = 0.6 \text{ km}$ ,  $h = 1.25 \text{ km}$ ,  $\beta_0 = 0.485 \text{ km}^{-1}$  时,  $\tau_{\lambda 1} = 0.328$ .

(14)式第二项的积分是很容易得到的

$$\tau_{\lambda 2} = \int_{Z_{\max}}^{\infty} \beta_2 \exp(-Z/h) dZ = \beta_2 h \exp(-Z_{\max}/h). \quad (18)$$

同样的, 气溶胶消光系数指数分布时, 气溶胶的总光学厚度为

$$\tau_{\lambda} = \beta_0 h (1 - e^{-Z_{\max}/h} + e^{-2Z_{\max}/h}). \quad (19)$$

在均匀分布下的总光学厚度为

$$\tau_{\lambda} = \beta_0 Z_{\max} + \beta_0 h e^{-Z_{\max}/h}. \quad (20)$$

上面只讨论了气溶胶总光学厚度的求法, 对于其吸收光学厚度或散射光学厚度我们可用同样的方法计算, 只须把上述积分中的  $\beta_{\text{ext}}(Z)$  换成  $\beta_{\text{abs}}(Z)$  或  $\beta_{\text{sca}}(Z)$  即可。

表 3 列出了波长为  $0.55 \mu\text{m}$  时, 气溶胶的浓度随高度高斯分布、均匀分布和指数分

表 3 波长在  $0.55 \mu\text{m}$  处的兰州冬季气溶胶光学厚度

| 分布参数         | $Z_c = 0.6 \text{ km} \quad \sigma_c = 1.0 \quad h = 1.25 \text{ km}$ |                      |                      |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| $n_c$        | $\tau_{0.55}$ (高斯分布)                                                  | $\tau_{0.55}$ (指数分布) | $\tau_{0.55}$ (均匀分布) |
| 1.491-0.005i | 0.536                                                                 | 0.320                | 0.458                |
| 1.549-0.1i   | 0.777                                                                 | 0.463                | 0.666                |
| 1.721-0.5i   | 1.245                                                                 | 0.724                | 1.067                |

布三种情况下的总光学厚度。从表可以看出,  $n_e$  的不同将导致各种气溶胶分布情况下光学厚度的不同。当折射率虚部为 0.5 时, 其光学厚度比折射率虚部为 0.005 时的光学厚度大一倍还多, 可见气溶胶的吸收对消光起非常重要的作用。另一方面, 气溶胶的总光学厚度随其消光系数的不同分布而不同。高斯分布时最大为 0.777, 在指数分布时最小为 0.463。根据前面的分析, 当  $\beta_{ex}$  随高度高斯分布时, 对应的天气条件应该是存在着逆温的稳定大气。这种情况下, 气溶胶不易扩散, 在烟雾层内持续累积, 含量较高, 因此相应的光学厚度也较大; 而  $\beta_{ex}$  随高度指数分布时, 对应的气象条件为不稳定大气, 气溶胶容易扩散, 含量较低, 故光学厚度也较小; 均匀分布的情况, 对应于气溶胶在烟雾层内均匀混合的情况, 它没有在逆温层顶持续累积的效应, 但也不象不稳定天气条件下那样迅速扩散, 因此光学厚度刚好介于两者之间为 0.666。

表 4 列出了烟雾层以上和以下气层的光学厚度。同时根据实测资料, 气溶胶的地面质量浓度为  $498.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。我们可用与计算光学厚度同样的方法计算出单位平方米气柱中气溶胶的质量负载, 一并列入表 4 以做参考。可以看出气溶胶的质量负载与其光学厚度接近正比例关系, 而烟雾层大气的气溶胶光学厚度和质量负载占了整层大气的 40%~50%。这表明 600 m 厚的烟雾层大气气溶胶在整层大气中占有重要地位。

表 4 兰州烟雾层大气及上层大气气溶胶光学厚度( $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ )及其质量负载

| 分布参数                | $Z_e=0.6 \text{ km} \quad \sigma_e=1.0 \quad h=1.25 \text{ km}$ |                        |               |                        |               |                        |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|
| 分布类型                | 高斯分布                                                            |                        | 指数分布          |                        | 均匀分布          |                        |
| $\tau_{0.55}$ 及 $m$ | $\tau_{0.55}$                                                   | $m/\mu\text{g m}^{-2}$ | $\tau_{0.55}$ | $m/\mu\text{g m}^{-2}$ | $\tau_{0.55}$ | $m/\mu\text{g m}^{-2}$ |
| 烟 雾 层               | 0.328                                                           | 332.6                  | 0.213         | 233.7                  | 0.291         | 294.3                  |
| 上层大气                | 0.449                                                           | 453.3                  | 0.232         | 234.6                  | 0.375         | 379.5                  |
| 整层大气                | 0.777                                                           | 785.9                  | 0.463         | 468.3                  | 0.666         | 636.7                  |

1992 年 12 月, 我们在对兰州气溶胶谱采样的同时, 用太阳光度表同步观测了大气浑浊度, 观测位置在城市地面和烟雾层顶部(山顶)。为了验证我们参数化方案的可靠性, 我们用上述大气浑浊度资料计算了兰州整层大气和烟雾层顶以上大气的光学厚度(表 5)在 6 个时次的值(5 天平均)。

表 5 实测的气溶胶光学厚度( $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ )

| 时间(h)               | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| $\tau_a$ (上层大气)     | 0.28 | 0.39 | 0.36 | 0.30 | 0.35 | 0.17 |
| $\tau$ (整层大气)       | 0.74 | 0.87 | 0.75 | 0.60 | 0.48 | 0.30 |
| $\tau-\tau_a$ (烟雾层) | 0.46 | 0.48 | 0.39 | 0.30 | 0.23 | 0.13 |

首先, 以表 5 中光学厚度随时间的变化情况来看, 由于 12 时以前, 兰州冬季逆温层还未消散, 光学厚度较大, 而在 14 时前后混合层得到发展, 气溶胶光学厚度开始变小, 14 小时以后大气处于不稳定状况, 光学厚度最小, 这从一个侧面说明了我们根据天气条件划分气溶胶垂直分布类型的合理性。其次, 如果取 11 和 12 时气溶胶为高斯型分布, 13、14 时为均匀型分布, 15、16 时为指数型分布, 那么以表 4 和表 5 的结果比

较来看, 实测的烟雾层内大气的光学厚度在 11~13 时前三个时次略大于上层大气, 而计算值却是上层大气光学厚度略大于烟雾层大气光学厚度。由于气溶胶质量随高度的时空变化十分复杂, 我们的三种分布的假设仅是理想情况, 若进一步调整分布参数, 计算值与实测值的符合程度还可以改善。

图 2 表示三种不同分布下的气溶胶光学厚度随波长的变化。可以看出, 不同的分布可导致光学厚度的大小不同, 但由于对消光起主要作用的是符合 Junge 分布的小粒子, 光学厚度随波长的变化符合负指数率。

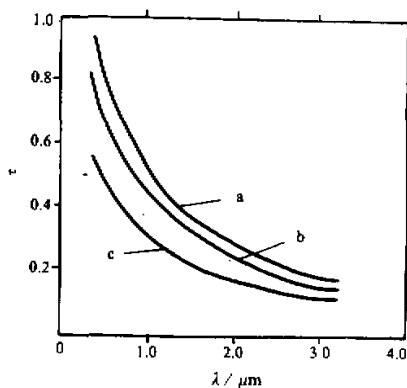


图 2 光学厚度随波长的变化  
(a) 高斯型, (b) 均匀型, (c) 指数型

#### 4 结论

本文从实测分析计算得到的气溶胶谱分布和折射指数出发, 利用 Deirmannjian 和 Hanel 的近似式, 计算了兰州冬季气溶胶的辐射参数, 从参数化计算的光学厚度和实测的光学厚度对比来看, 本文的参数化方案是可行的。

#### 参 考 文 献

- 1 Donald H. Lenschow, 1990, 大气边界层探测, 科学出版社, 70.
- 2 Deirmannjian, D., 1960, Atmospheric extinction of infrared radiation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **86**, 371~381.
- 3 Hanel, G., 1988, Single scattering albedo, asymmetry parameter, apparent refractive index and apparent soot content of dry atmospheric particulates. *Appl. Opt.*, **27**, 2287~2295.
- 4 G. W. 帕尔特里奇等, 1981, 气象学和气候学中的辐射过程, 科学出版社, 150.
- 5 Deluisi, J. J. et al., 1976, Result of a comprehensive atmospheric aerosol radiative experiment in the South-Western U. S., *J. Appl. Meteor.*, **15**, 455~469.
- 6 Owen B. Toon et al., 1976, A global average model of atmospheric aerosols for radiative transfer calculations, *J. Appl. Meteor.*, **15**, 224~245.
- 7 邱金桓等, 1982, 激光探测沙尘过程中的气溶胶消光系数分布, *大气科学*, **8**, 205~210.
- 8 Bach W., 1970, Radiation of solar attenuation with height over an urbanized area, Presented at the 3rd. Annual Meeting of the Air Pollut Control, Ass, st. Louis, Missouri.
- 9 土明星等, 1984, 大气气溶胶的粒度谱分布及其随高度的变化, *大气科学*, **8**, 435~442.
- 10 Bullich, K., 1964, Scattered radiation in the atmosphere and the natural aerosol. *In Advances in Geophysics*, **10**, 201~260.

## Parameterization of Optical Characteristics of Aerosols over Lanzhou City in Winter

Tian Wenshou and Chen Changhe

(Department of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract** The size distribution of aerosols over Lanzhou city in winter was fitted with a bimodal spectrum model, namely, Junge distribution plus Deirmendjian distribution. The average complex refractive index of aerosols is assumed to be  $1.549-0.1i$ , the vertical distributions of the aerosol concentration are divided into three types in accordance with weather conditions: Gaussian, uniform and exponential distribution. Based on this, the average values of the aerosol optical parameters are calculated. Comparison with the observational optical depth shows that the parameterization is reasonable.

**Key words** attenuation coefficient single scattering albedo optical depth smog layer