

相对湿度对大气气溶胶粒子短波 辐射特性的影响^{*}

杨 军

李子华

黄世鸿

(南京气象学院, 南京 210044)

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要 利用 Mie 散射原理和重庆实测气溶胶资料, 详细计算了边界层内单个气溶胶粒子的光学特性参量, 气溶胶粒子群体的散射、吸收、消光系数及不对称因子、散射比、光学厚度; 进而采用二流近似和累加法计算了边界层内太阳短波辐射增温率。目的在于研究相对湿度对以上各特性参量的影响。结果表明, 相对湿度在 65%~95% 之间变化时, 对气溶胶粒子群体光学特性参数和太阳增温率的影响在量级上可与气溶胶粒子浓度成倍变化的影响相比拟。

关键词 大气气溶胶 Mie 散射 辐射传输 相对湿度

1 引言

气溶胶在大气科学和环境科学领域受到日益广泛的关注, 特别是气候变化研究方面, 气溶胶的辐射特性被认为是十分重要的关键因子。太阳短波辐射是地气系统的能量来源, 气溶胶通过对太阳辐射的吸收和散射直接影响天气和气候。为此需要了解实际大气气溶胶粒子的短波光学特性。

研究表明, 当有水汽在气溶胶粒子上发生凝结时, 气溶胶粒子的物理、化学特性会发生很大的改变^[1,2]。文献[2]曾对气溶胶物理特性随相对湿度的变化进行了理论研究和实际测量, 得到粒子尺度、谱分布、平均密度、折射指数与相对湿度之间的函数关系。在此基础上, 孙景群^[3]从激光大气探测的角度, 计算了单波长下湿气溶胶粒子的消光特性。

考虑到相对湿度和粒子数密度的改变, 必然会影响气溶胶大气中太阳短波辐射的传输过程, 利用重庆实测资料计算并分析了气溶胶粒子的短波辐射特性与相对湿度及粒子数密度的关系。

2 大气气溶胶模型

研究气溶胶的辐射效应, 必须首先确定气溶胶的物理特性, 其中最基本的是气溶胶粒子谱分布和折射指数, 以及它们受大气环境状况的影响。本文主要考虑相对湿度的作

1997-07-03 收到, 1997-11-13 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 49675250, 并得到中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室资助

用。气溶胶粒子的形状采用球形近似, 因此, 可以利用 Mie 散射理论近似处理气溶胶粒子光学问题。

2.1 气溶胶粒子谱分布

采用 1990 年末~1991 年初重庆的实测资料, 气溶胶粒子平均数密度为 252.7 个/ cm^3 , 积聚模态和粗模态粒子谱分布分别用修正 Γ 函数分布和 Junge 分布拟合为

$$\frac{dN}{dD} = 694110.9 D^2 \exp(-12.25 D^{1/2}), \quad (0.1 \mu\text{m} < D \leq 2.0 \mu\text{m}) \quad (1)$$

$$\frac{dN}{d \lg D} = 2.866 D^{-2.950}, \quad (2.0 \mu\text{m} < D \leq 20.0 \mu\text{m}) \quad (2)$$

并将修正 Γ 函数分布外推到核模态粒子 ($D \leq 0.1 \mu\text{m}$) 的分布, 其中 D 为粒子直径。

相对湿度 H_r 对谱分布的影响可通过湿气溶胶粒子半径 $r(H_r)$ 与干气溶胶粒子半径 r_0 的关系得到^[4]:

$$\frac{r(H_r)}{r_0} = (1 - H_r)^{-(1/d)} - (1 - 60\%)^{-(1/d)} + 1. \quad (3)$$

上式适用范围为: $60\% \leq H_r \leq 95\%$, 常数 d 取 3.5。

气溶胶数密度随高度的分布倾向于遵循一个长期分布型式: 在 5 km 以下粒子数密度随高度增加呈指数减小, 而谱分布在这一高度内改变不大。考虑到白天近地层混合比较均匀, 将高度 z 处的气溶胶数密度 (个/ cm^3) 表示为

$$N(z) = \begin{cases} N_0, & z \leq 150 \text{ m} \\ N_0 \exp[-(z - 150)/H_p], & z > 150 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

N_0 为地面粒子数密度, H_p 为气溶胶标高, 取 1200 m。为了解气溶胶数密度改变对短波辐射的影响, 计算中另外使用了两种高度分布: 气溶胶粒子数密度在 (4) 式基础上减小一半和增大 3 倍。

2.2 气溶胶粒子折射指数

气溶胶粒子的化学成分, 在气溶胶辐射效应中的作用主要反映在对折射指数 $m = m_r - im_i$ 的影响上。根据对重庆市区大气气溶胶化学成分的分析, 约有一半以上是吸湿性硫酸盐, 因此干粒子的折射指数采用 75% 的 H_2SO_4 和煤烟进行加权平均, 其中 H_2SO_4 占 60%, 煤烟占 40%。参考 Twitty 等^[5]和其他一些研究者的结果, 烟煤的折射指数取为 $1.8 - 0.05i$ 。

湿气溶胶粒子的折射指数是由干粒子和凝结的液水共同决定的, 常用等效的均匀球形粒子的折射指数 $m_e = m_{re} - im_{ie}$ 表示。Hanel^[2]在大量实验和理论研究工作的基础上, 得出大气中气溶胶的物理特性与相对湿度之间的函数关系, 将等效折射指数的实部 m_{re} 和虚部 m_{ie} 表示为

$$m_{re} = m_{rw} + (m_{r0} - m_{rw})[r(H_r)/r_0]^{-3}, \quad (5)$$

$$\frac{m_{ie}}{m_{re}^2 + 2} = \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2 + 2} + \left(\frac{m_{i0}}{m_{r0}^2 + 2} - \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2 + 2} \right) \left[\frac{r(H_r)}{r_0} \right]^{-3}, \quad (6)$$

其中下标 w 和 0 分别表示水和干气溶胶粒子。可见, 随相对湿度增加, 粒子吸湿增长并几乎变成纯水物质, 其折射指数也将接近于水的折射指数。因此, 相对湿度对气溶胶折射指数的影响决定于干物质与水的折射指数大小的比较。图 1 可以定性代表自然界中大部分大气气溶胶粒子相对纯水的折射指数特性。

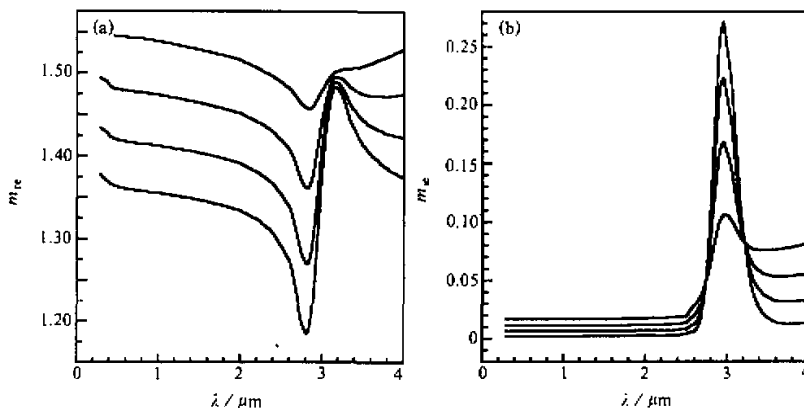


图 1 湿气溶胶粒子等效折射指数与相对湿度的关系

(a) 中以及 (b) 中 3 μm 处线条从下到上分别表示 65%、75%、85% 和 95%

3 短波辐射计算方案

在独立散射的假设下, 利用 Mie 散射原理, 可由粒子谱分布和折射指数确定粒子群体的体消光系数 β_e 、体散射系数 β_s 、体吸收系数 β_a (量纲: L^{-1}), 以及散射比 ω 、不对称因子 g 。根据光学厚度的定义 $\tau = \int_z^{z_{top}} \beta dz$, 可得到气溶胶散射光学厚度 $\tau_\lambda^{(s,m)}$ 和吸收光学厚度 $\tau_\lambda^{(a,m)}$ 。对于辐射传输计算, 大气层某高度以上给定波长 λ (μm) 处总的光学厚度可表示为

$$\tau_\lambda = \tau_\lambda^{(s,r)} + \tau_\lambda^{(s,m)} + \tau_\lambda^{(a,m)} + \tau_\lambda^{(a)}, \quad (7)$$

式中 $\tau_\lambda^{(s,r)}$ 为空气分子 Rayleigh 散射光学厚度; $\tau_\lambda^{(a)}$ 表示大气中各种气体的吸收光学厚度。其中吸收气体分为三部分来考虑: O_3 、 H_2O 和均匀混合气体, 并采用 Iqbal^[6]建议的方法计算。由于本文详细计算边界层 (取 1600 m 以下) 气溶胶粒子的短波辐射特性, 对于 1600 m 以上的气溶胶粒子总光学厚度采用 Moon 提出的经验公式^[6]计算。

1600 m 以下, 垂直坐标网格间距在近地层较密, 上层略疏, 共取 26 个相对均匀的光学薄层。1600 m 以上, 利用 AFGL 的 LOWTRAN-7 计算程序 (1990 年) 中给出的大气顶太阳辐射光谱资料和上述简化处理方法, 可得到 1600 m 处太阳光谱辐射通量密度。

多次散射的辐射传输方程, 本文采用二流近似和累加法求解^[7]。首先把薄层 $\Delta\tau$ 外没有散射光进入作为边界条件, 由混合修正 δ -Eddington 二流近似方法求出薄层对直接

太阳辐射的后向散射率 R' 和前向散射率 T' 。对薄层 $\Delta\tau$ 外射入的散射光 $F^i(0) = F_0$ ，可相应得到薄层对 F_0 的后向散射率 R 和前向散射率 T 。

按照多次散射原理，考虑到上边界条件和下边界条件： $D_0 = 0$ 和 $U_n = \alpha[D_n + S_{i\lambda}\mu_0 \exp(-\tau_n/\mu_0)]$ ，即 1600 m 处没有向下入射的散射辐射，地面向上的反射辐射是地面反照率乘以总辐射， μ_0 为太阳天顶角的余弦。本文在文献[7]的基础上将多次散射的传输方程写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -T_1 & & & \\ 0 & 1 & -R_1 & 0 & & \\ 0 & -R_2 & 1 & 0 & \cdots & \\ & -T_2 & 0 & 1 & \cdots & \cdots \\ & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & \cdots & \cdots & 1 & 0 & \cdots \\ & & & & \cdots & 0 & 1 & \cdots & \cdots \\ & & & & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & & & & \cdots & \cdots & 1 & -\alpha T_n \\ & & & & & & & \cdots & 0 & 1 - \alpha R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ D_1 \\ U_1 \\ D_2 \\ \cdots \\ U_j \\ D_k \\ \cdots \\ U_m \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{10} \\ F_{01} \\ F_{21} \\ F_{12} \\ \cdots \\ F_{kj} \\ F_{jk} \\ \cdots \\ F_{nm} + T_n \alpha S_{i\lambda} \mu_0 \exp(-\frac{\tau_n}{\mu_0}) \\ F_{mn} + R_n \alpha S_{i\lambda} \mu_0 \exp(-\frac{\tau_n}{\mu_0}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

很明显，该方程系数矩阵为特殊的五对角矩阵，可用追赶法求解，计算本质与传统的累加法是一致的。其中地面反照率 α 参考重庆的实测结果，取中等湿度的土壤。

在求出所有高度的向上与向下的散射通量密度 U_j 、 D_j 后，可得到给定高度处的向上和向下的总通量密度 $F_j^{\uparrow} = U_j$ 和 $F_j^{\downarrow} = D_j + \mu_0 F_0 \exp(-\tau/\mu_0)$ 。于是给定高度上的净通量密度为 $F_{\text{net},j} = F_j^{\uparrow} - F_j^{\downarrow}$ 。由于吸收作用，净通量密度由高层向低层逐渐减小，其损耗必然用于加热气层。因此，该气层内太阳短波辐射加热率为

$$\left(\frac{\delta T}{\delta t}\right) = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F_{\text{net}}}{\partial z}, \quad (9)$$

式中 ρ 、 c_p 分别为空气密度和定压比热。

4 气溶胶短波辐射特性

利用 2.1~2.2 中气溶胶粒子的谱分布、数密度随高度的分布及折射指数，研究了气溶胶粒子的短波辐射特性和太阳增温率，重点讨论了相对湿度的影响。

4.1 单个粒子 Mie 散射特性

单个粒子 Mie 散射特性参量由尺度参数 x 和折射指数 m 决定，在本文研究范围内 x 最大值为 216.7 ($a = 10 \mu\text{m}$; $\lambda = 0.29 \mu\text{m}$)。下面图中给出了 $0.5 \mu\text{m}$ 波长 Mie 散射参量随 x 变化较明显的部分。由于相对湿度对粒子的折射指数和谱分布有明显影响，从而导致各个参量均会因相对湿度的改变而发生变化。

0.5 μm 处, 吸收效率 Q_a 与相对湿度具有明显的负相关关系 (图 2a)。这是由于相对湿度对粒子折射指数虚部的影响造成的。而且, 相对湿度愈大, 相对湿度改变量导致的吸收效率改变量愈大, 这又有别于相对湿度对折射指数虚部 M_{ie} 的影响 (图 1b)。但是, 图 1b 中 3.0 μm 附近, 相对湿度与 m_{ie} 为正相关, 计算结果表明, 这种关系将导致 Q_a 与相对湿度的正相关。因此, 相对湿度改变对气溶胶粒子光学特性的不同影响是由于气溶胶粒子和水的光学特性参数的相对大小决定的。

图 2b 给出了气溶胶粒子消光效率与相对湿度的关系。可见, 相对湿度在 65%~95% 之间对 Q_e 的最大影响达 1.5 以上。 Q_e 的主振荡位相随相对湿度的增大而逐渐滞后, 随 x 增大 Q_e 逐渐趋向于 2.0。而且, 相对湿度愈大, Q_e 的振荡愈明显。这样就造成了相对湿度对 Q_e 的影响在不同 x 范围的不一致, 因此在 Mie 散射范围随着 x 的变化, Q_e 与相对湿度没有一致相关关系。散射效率 Q_s 为 Q_e 与 Q_a 之差, 从图 2a 和图 2b 可以看出, 吸收效率占消光效率的比例很小, 因此相对湿度对 Q_s 的作用基本类似于相

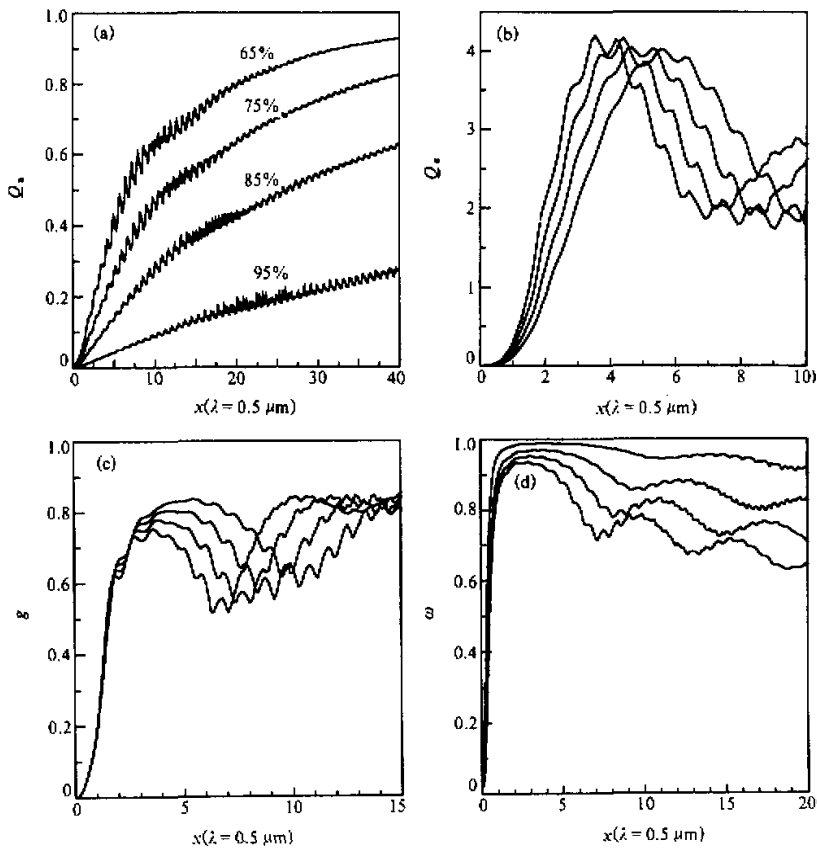


图 2 吸收效率 (a)、消光效率 (b)、不对称因子 (c)、散射比 (d) 与相对湿度的关系
(b)、(c) 中 $x=6$ 处及 (d) 中的线条从下到上分别表示 65%、75%、85% 和 95%

对湿度对消光效率的作用。

相对湿度对不对称因子 g 的影响 (图 2c) 也明显存在主振荡位向滞后的现象。对于 $x \ll 1$ 时, g 趋向于 0, 代表了 Rayleigh 散射的情形。由于 Q_s 和 Q_e 随 x 变化受到相对湿度影响, 从而相对湿度对散射比 ω 也将产生影响 (图 2d), 随着相对湿度增大, 散射比也跟着增大, 相对湿度愈大, 这种影响愈明显。

4.2 气溶胶群体光学特性

直接影响大气中辐射传输的不是单个气溶胶粒子的光学特性, 而是由具有一定尺度谱分布的气溶胶的群体光学特性。利用第 2 节给出的气溶胶模型, 计算了用于求解辐射传输方程的一些主要特性参数。

4.2.1 吸收、散射、消光系数

对照图 3a 与图 1b 可明显看出, 吸收系数 β_a 随波长的变化主要决定于折射指数虚部 m_{ie} 随波长的变化。对于所取大气气溶胶模型, 相对湿度对 β_a 有明显影响: β_a 随相对湿度的增大而增大, 相对湿度愈大, β_a 增大愈明显, 这种一致影响不同于相对湿度对 m_{ie} 的影响 (图 1b)。这说明, 对本文气溶胶粒子群体的 β_a 来说, 相对湿度通过改变谱分布使吸收系数增大的作用大于相对湿度改变折射指数虚部产生的相反作用。同时, 相对湿度对 β_a 的影响程度随波长变化: 对于占太阳辐射能主要部分的 $0.5 \mu\text{m}$ 波长附近, 气溶胶粒子的吸收是很显著的。当相对湿度在 65%~85% 范围内变化时, $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 波长范围内的吸收系数的变化很小, 这一情形在接近饱和时才略有改变 ($H_r = 95\%$)。对于 $2.6 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 波长范围, β_a 无论随相对湿度变化还是随波长变化, 均在此出现峰值, 这是由于此处 H_2O 的折射指数虚部起了主导作用。

相对湿度对散射系数的影响也同样很显著。对整个短波波段, 两者之间均为正相关关系。消光系数 β_e (图 3b) 为 β_a 和 β_s 之和。相对湿度对 β_e 的影响类似于对 β_a 和 β_s 的影响: 相对湿度愈大, 消光系数愈大。这一作用对于高相对湿度明显大于低相对湿度。这一结论可以很好地解释能见距离随相对湿度增大而减小的关系。

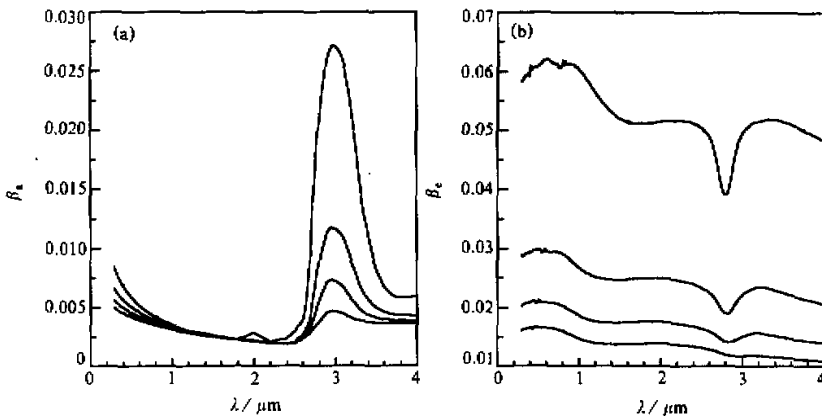


图3 吸收系数 (a) 和消光系数 (b) 与相对湿度的关系
图中线条从下到上分别表示 65%、75%、85% 和 95%

在不考虑相对湿度影响时, β_e 与粒子浓度存在明显的线性关系。对于吸收系数和散射系数也得到类似结果。对于相对湿度的改变 (65%~95%) 所引起吸收、散射、消光系数的变化在数值上与气溶胶粒子浓度的成倍改变所引起的变化相当, 这说明在用 Mie 散射理论处理大气气溶胶粒子的辐射特性时, 相对湿度效应是必须充分考虑的。

4.2.2 不对称因子、散射比和光学厚度

相对湿度对粒子群体不对称因子 g 的影响, 除了接近饱和的个别波段外, 基本上是相对湿度愈大, 不对称因子愈大。这一作用决定于气溶胶粒子尺度分布与相对湿度的关系。在太阳辐射能最集中的可见光波段, 在相对湿度为 65%~95% 的范围内对 g 最大影响达 0.1 左右。

相对湿度影响粒子群体散射比的图像大致类似于图 1b 上下颠倒所得图像, 即折射指数虚部和气溶胶粒子群散射比与波长和相对湿度的关系相反。除了 H_2O 的强吸收区以外, 相对湿度愈大, 散射比愈大; H_2O 的强吸收区与之相反, 而且, 相对湿度愈大, 散射比随相对湿度的变化愈小。出现这些现象的原因是, 散射比决定于 β_s 和 β_e 的比值, 即 $1 - \beta_a / \beta_e$, 气溶胶粒子折射指数虚部愈大, 吸收系数愈大, 散射比愈小。

气溶胶粒子光学厚度 τ 为消光系数对高度的积分, 比较图 4a 和图 3b 可见, τ 与 β_e 随波长和相对湿度的变化, 在趋势上是一致的, 在太阳辐射能量峰值区域出现极大值, 相对湿度愈大, τ 的变化量愈大。而且对于本文所取的气溶胶模型, 两者在数值上也很接近。光学厚度与气溶胶粒子数密度的关系 (图 4b) 也类似于消光系数与粒子数密度的关系。

气溶胶吸收光学厚度 τ_a 直接决定着辐射变温率。 τ_a 与相对湿度正相关, 在紫外、可见光波段大体上随波长增加而减小, 而且随相对湿度的变化, τ_a 的改变量明显大于吸收系数的改变量。

4.3 气溶胶大气太阳短波辐射增温率

本文以上所有气溶胶光学特性的计算, 目的在于计算气溶胶在边界层中的太阳辐射

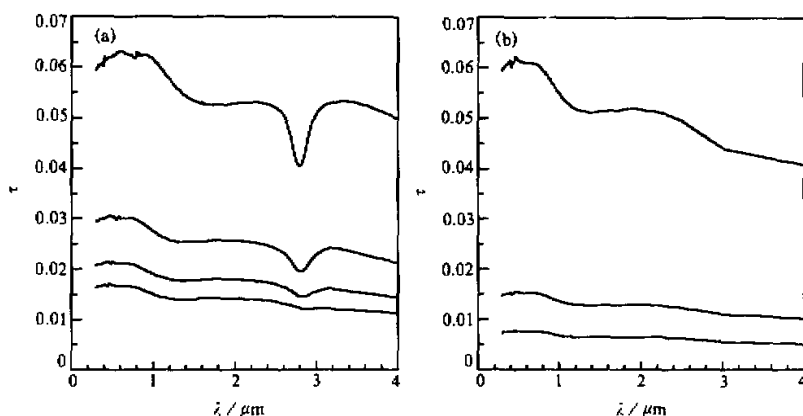


图 4 光学厚度 (0~1600 m 整层大气) 与相对湿度 (a) 和气溶胶粒子数密度 (b) 的关系

(a) 线条从下到上分别表示 65%、75%、85% 和 95%; (b) 线条从下到上分别

表示 $N_0 / 2$, $N_0 = 252.7 / cm^3$ 和 $N_0 \times 4$

增温率。按照重庆 12 月 23 日的日长和太阳天顶角的变化, 利用实测探空资料可积分得到全天的太阳短波辐射增温率。

4.3.1 相对湿度的影响

由于相对湿度对气溶胶的 Mie 散射各参量均有明显影响, 因此必然在大气短波辐射传输中有所体现, 最终影响到边界层的太阳增温率。从图 5a 中可以看出, 相对湿度通过影响气溶胶的光学特性, 从而对太阳增温率具有系统影响。对于未饱和大气, 相对湿度愈大, 太阳增温率愈大。如果不考虑相对湿度对气溶胶粒子短波增温率的影响, 所计算出来的太阳增温偏小, 最大偏差可达每天 1.0 K 以上。这一结论对气溶胶的气候效应是有意义的。

同时看到, 在边界层的中上层, 太阳增温率随高度减小, 主要受气溶胶数密度随高度减小的影响; 在近地层, 由于计算中该层气溶胶数密度不随高度改变, 高度愈低, 太阳辐射能量愈小, 导致近地层增温率相对较小。

4.3.2 浓度的影响

图 5b 给出了不考虑相对湿度的影响时, 气溶胶粒子数密度对太阳增温率的影响。当不考虑气溶胶的存在时, 对于本文模拟时间、地点的边界层, 由水汽、臭氧等吸收气体造成的太阳短波增温率约为 1.8 K/d。当考虑了实际气溶胶分布后, 太阳增温率约为 2.1 K/d。气溶胶粒子数密度愈大, 太阳辐射增温率也愈大, 图中这一作用随高度的增大而减小, 原因与气溶胶粒子数密度随高度的减小有关。

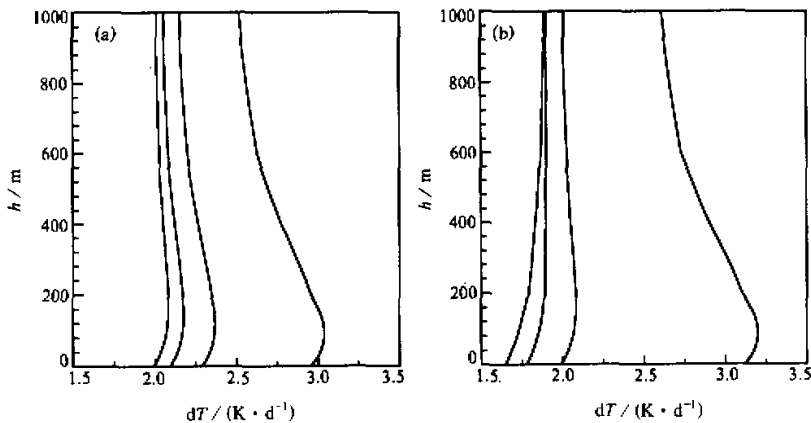


图 5 相对湿度 (a) 和气溶胶数密度 (b) 与太阳增温率的关系
(a) 线条从左到右分别表示 65%、75%、85% 和 95%; (b) 线条从左到右分别表示无气溶胶, $N_0/2$, $N_0 = 252.7/\text{cm}^3$ 和 $N_0 \times 4$

5 结论

(1) 相对湿度对单个气溶胶粒子光学特性有明显影响, 这种影响随光学特性参数和气溶胶粒子尺度参数的不同而不同, 这是由相对湿度对粒子的尺度和折射指数的不同影

响所共同决定的。不考虑相对湿度的影响将会给计算结果带来较大的误差。

(2) 相对湿度对气溶胶粒子积分光学特性的影响是由相对湿度对气溶胶粒子的折射指数和谱分布的影响造成的, 这一影响在太阳辐射能量集中的可见光波段很显著。对于气溶胶粒子群体的主要积分光学特性参数, 基本上随相对湿度的增大而增大。

(3) 相对湿度在 65%~95% 之间变化时, 相对湿度对气溶胶粒子群体光学特性参数和太阳增温率的影响在量级上可与气溶胶粒子浓度成倍改变的影响相比拟。

(4) 气溶胶粒子造成的太阳短波增温率与相对湿度相关显著, 相对湿度愈大, 边界层太阳短波增温率愈大。对于实际气溶胶大气, 不考虑相对湿度对气溶胶光学特性的影响所得到的太阳增温率最大偏差可达 1.0 K 以上。

参 考 文 献

- 1 Pilinis, C., J. H. Seinfeld and D. Grosjean, 1989, Water content of atmospheric aerosols, *Atmos. Envir.*, **23**(7), 1601~1606.
- 2 Hanel, G., 1984, The physical chemistry of atmospheric particles, *Hygroscopic Aerosols*, Eds. L. H. Ruhnke and A. Deepak, A. Deepak Publishing, 1~20.
- 3 孙景群, 1983, 湿气溶胶的光散射特性, *高原气象*, **2**(3), 49~54.
- 4 孙景群, 1985, 能见度与相对湿度的关系, *气象学报*, **43**(2), 230~234.
- 5 Twitty, J. T. and Weinman, J. A., 1971, Radiation properties of carbonaceous aerosols, *J. Appl. Meteor.*, **10**, 725~731.
- 6 Iqbal, M., 1983, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, New York, 85~152.
- 7 尹宏、韩志刚, 1989, 气溶胶大气对太阳辐射的吸收, *气象学报*, **47**(1), 118~123.

Influence of Relative Humidity on Shortwave Radiative Properties of Atmospheric Aerosol Particles

Yang Jun and Li Zihua

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Huang Shihong

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Based on Mie scattering theory and ground-based measurements of aerosols in Chongqing, detailed calculations are performed to study the influence of relative humidity on shortwave radiative properties of aerosol particles. Then the heating rate in PBL is determined by means of two-stream approximation and the adding method. Results show that the influences of relative humidity changed from 65% to 95% on the aerosol shortwave radiative properties can be compared with the influences of multiple change of aerosol particles total number.

Key words atmospheric aerosol particles Mie scattering theory radiative transfer relative humidity