

能见度与相对湿度的关系*

孙 景 群

(中国科学院大气物理研究所)

本文通过光散射理论计算,分析了大气消光系数(削弱系数)与相对湿度的关系,并与观测实例进行了比较。由此提出在一定条件下,根据相对湿度的未来变化预报气象能见度的可能性。

气象能见度对交通运输和光学探测等一系列实际问题均具有重要意义,是气象台站的常规观测项目之一。

能见度取决于大气消光系数的分布,水平能见度与水平方向的平均大气消光系数之间有关系式^[1]

$$V = \frac{3.912}{\sigma_w} \quad (1)$$

式中 V 为水平能见度(公里); σ_w 为白光的大气消光系数(公里⁻¹),与人眼光谱生理特性密切相关。由于人眼对波长为 0.55 微米的绿光视觉最灵敏,因此, σ_w 可近似以波长为 0.55 微米的大气消光系数 σ 表示。这时,有关系式

$$V = \frac{3.912}{\sigma} \quad (2)$$

于是,只要已知大气消光系数 σ ,即可由上式求取水平能见度 V 。

在近地层大气,由于分子对大气消光系数的贡献可以忽略,因此,大气消光系数即等于大气气溶胶的消光系数。气溶胶消光系数不仅与干气溶胶的谱分布和光学折射率有关,还与大气相对湿度密切相关。当干气溶胶特性较为稳定时,有可能根据大气相对湿度的变化来预报气象能见度。有关这方面的问题,曾有过一些探索^[2-3]。

本文根据光散射理论,在海洋大气和污染大气两类典型干气溶胶谱分布和光学折射率的条件下,计算了气溶胶消光系数与相对湿度的关系,并与实测结果进行了比较,由此探讨了由相对湿度的变化预报气象能见度的可能。

1. 湿气溶胶模式

1) 湿气溶胶粒子的尺度变化

通常,气溶胶粒子在相对湿度大于 35% 左右时,便能吸附水汽而凝结增长^[4],当相对湿度大于 60% 左右时,气溶胶吸附水汽的能力就更为显著了^[6]。这时,干气溶胶粒子外逐渐形成一水层,这不仅使气溶胶粒子的尺度增大,其光学折射率也不同于干气溶胶粒

* 本文于 1983 年 1 月 11 日收到, 1983 年 10 月 11 日收到修改稿。

子, 从而使气溶胶消光系数发生相应变化。

当相对湿度为 f 时, 湿气溶胶粒子半径 $r(f)$ 与干气溶胶粒子半径 r 之比, 可用经验公式表示^[2]:

$$p = \frac{r(f)}{r} = (1-f)^{-\frac{1}{\mu}} \quad (3)$$

式中 μ 为常系数。对于海洋大气, $\mu=3.9$; 对于污染大气, $\mu=4.4$ 。若相对湿度 f 已知, 便可由上式求得湿气溶胶粒子半径与干气溶胶粒子半径之比 p 。

2) 湿气溶胶粒子的双层球模式

在均匀、球形干气溶胶粒子上包上一同心水层, 这就是湿气溶胶粒子的双层球模式。对于含盐吸湿性气溶胶粒子, 同心水层实为溶液, 水层的光学折射率为溶液的折射率, 且呈径向变化, 但通常可将水层的光学折射率简化为纯水的折射率。于是, 湿气溶胶粒子的散射问题, 就简化为内为球形干气溶胶粒子外为同心纯水层, 具有两种折射率的双层球散射问题^[6-7]。

3) 湿气溶胶粒子的等效光学折射率模式

为简便起见, 也可采用湿气溶胶粒子的等效光学折射率模式。即凝结增长的湿气溶胶粒子, 其光学折射率既不同于干气溶胶粒子的折射率, 也不同于水的折射率, 而用等效光学折射率 $m_e = n_{re} - in_{ie}$ 表示。于是, 湿气溶胶粒子的散射问题, 就简化为均匀、球形粒子的散射问题^[6]。

湿气溶胶粒子等效光学折射率的实部 n_{re} 和虚部 n_{ie} 与相对湿度 f 之间有关系式^[3]

$$n_{re} = n_{rw} + (n_r - n_{rw}) \left[\frac{r(f)}{r} \right]^{-3} \quad (4)$$

$$n_{ie} = n_{iw} + (n_i - n_{iw}) \left[\frac{r(f)}{r} \right]^{-3} \quad (5)$$

式中 n_{rw} 和 n_{iw} 分别为水的折射率 m_w 的实部和虚部, n_r 和 n_i 分别为干气溶胶折射率 m 的实部和虚部。

2. 气溶胶消光系数与相对湿度的关系

1) 理论计算结果

湿气溶胶消光系数可表示为

$$\sigma = \int_0^{\infty} \sigma_0 \left(\frac{2\pi r p}{\lambda}, m, m_w \right) n(r) dr \quad (6)$$

式中 λ 为光波波长。 $\sigma_0 \left(\frac{2\pi r p}{\lambda}, m, m_w \right)$ 为单个湿气溶胶粒子的消光截面, 与湿气溶胶的尺度参数 $\frac{2\pi r p}{\lambda}$ 、干气溶胶折射率 m 和水的折射率 m_w 等有关, 可根据光散射理论计算求得^[6-7]。 $n(r)$ 为干气溶胶的谱分布函数, 满足 Deirmendjian 修正伽玛谱^[8]

$$n(r) = ar^{\alpha} e^{-br^{\gamma}} \quad (7)$$

式中 $n(r)$ 取个/厘米³·微米单位, a, α, b, γ 为谱分布参数。文献[9]给出了气溶胶数密度为 10^2 个/厘米³ 时, 海洋大气和污染大气两类典型干气溶胶的谱分布参数, 对应的光学折

射率则分别取 $m = 1.55 - 0.035i$ 和 $m = 1.55 - 0.07i$ 。

由式(3)、(6)和(7),在海洋大气和污染大气两类典型干气溶胶谱分布和光学折射率,以及采用双层球和等效光学折射率两种湿气溶胶模式条件下,根据光散射理论计算了气溶胶消光系数与比值 p 的关系。计算时取波长 $\lambda = 0.55$ 微米,水的光学折射率 $m_w = 1.33 - 0.00i$,比值 p 取 1 至 2 不等。

由于气溶胶消光系数的变化主要取决于气溶胶粒子尺度的变化,而随气溶胶光学折射率的变化并不显著^[9]。因此,不同比值 p 时,根据两种湿气溶胶模式所计算湿气溶胶消光系数的差别很小。例如,对于海洋大气,根据不同湿气溶胶模式所计算湿气溶胶消光系数的差别,最大不超过 4%;对于污染大气,根据不同湿气溶胶模式所计算湿气溶胶消光系数的差别,最大不超过 2.5%。由此可见,不同比值 p 时,湿气溶胶消光系数的计算结果与湿气溶胶的不同模式关系不大。

计算表明,气溶胶消光系数与干气溶胶的谱分布密切相关。例如,海洋大气干气溶胶的消光系数为 1.063×10^{-1} 公里⁻¹;而污染大气干气溶胶的消光系数为 3.580×10^{-1} 公里⁻¹,是海洋大气时的 3.368 倍。不过,在这两类干气溶胶谱分布条件下,比值 $k = \frac{\sigma(p)}{\sigma(1)}$

随 $p = \frac{\tau(f)}{r}$ 的变化曲线却相当一致,彼此间的差别最大不超过 2%。由此可见,比值 k 随 p 值的变化,与干气溶胶谱分布的关系不甚密切。这一特点有助于根据大气相对湿度的变化来预报能见度。

图 1 示出了海洋大气和污染大气两类典型干气溶胶谱分布,以及两种湿气溶胶模式条件下,所计算比值 k 随 p 值变化的平均曲线。图 1 表明,当相对湿度增大时,由于气溶胶粒子吸附水汽凝结增长,使比值 k 随 p 值的增大而急剧上升。例如, $p=2$ 时的 k 值为 $p=1$ 时的 3.760 倍。

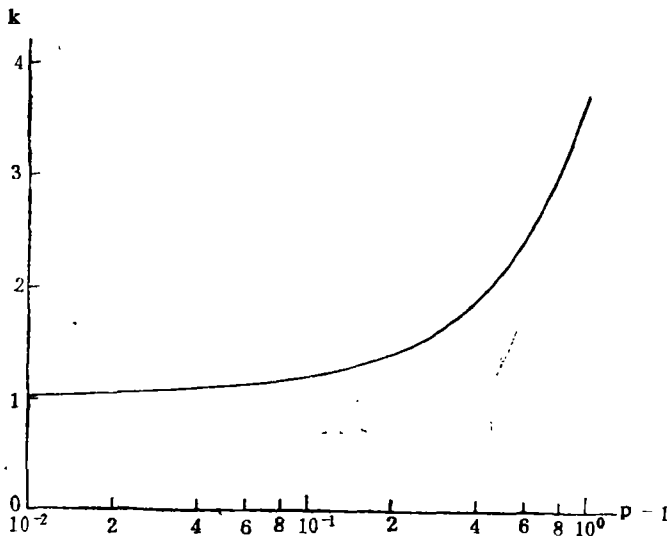


图 1 比值 $k = \frac{\sigma(p)}{\sigma(1)}$ 随 $p = \frac{\tau(f)}{r}$ 变化的平均曲线

2) 理论值与观测值的比较

相对湿度为 f 时的气溶胶消光系数 $\sigma(f)$ 与相对湿度为 f_0 时的气溶胶消光系数 $\sigma(f_0)$ 的比值 $k' = \frac{\sigma(f)}{\sigma(f_0)}$ ，随相对湿度 f 变化的观测结果和理论计算结果均示于图 2。

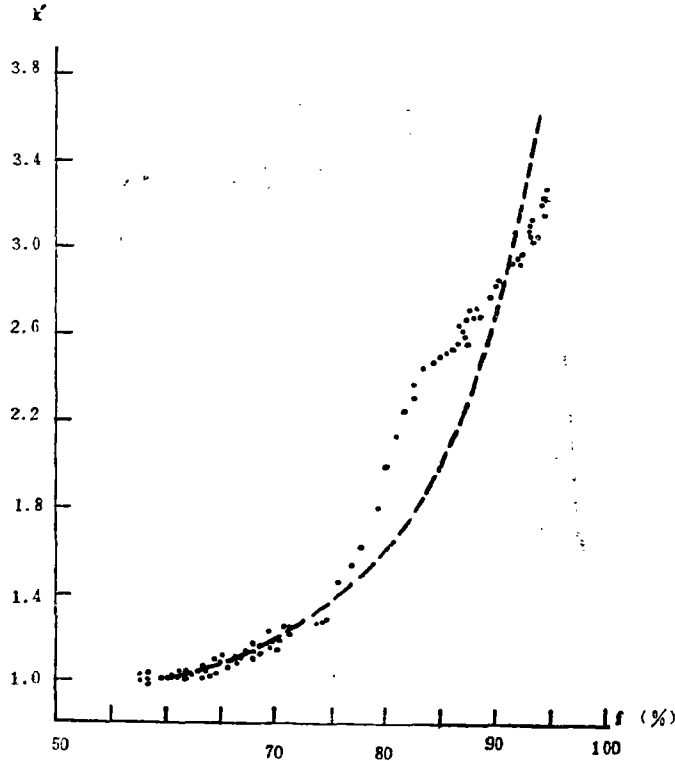


图 2 洋面上比值 $k' = \frac{\sigma(f)}{\sigma(f_0)}$ 随相对湿度 f 的变化
(黑点：观测值， $f_0 = 57\%$ ；虚线：理论计算拟合曲线， $f_0 = 60\%$)

图 2 中黑点表示洋面上相对湿度为 f 时的气溶胶消光系数 $\sigma(f)$ 与相对湿度 $f_0 = 57\%$ 时的气溶胶消光系数 $\sigma(f_0)$ 的比值 k' ，随相对湿度变化的观测值^[10]。

气溶胶谱分布的多数观测表明，只有当相对湿度大于 60% 左右时，气溶胶粒子尺度的增长才较为明显^[5]。因此，式(3)应修正为

$$p = \frac{\tau(f)}{\tau} = (1-f)^{-\frac{1}{\mu}} - (1-60\%)^{-\frac{1}{\mu}} + 1 \quad (8)$$

上式的适用范围， $60\% \leq f \leq 95\%$ ，系数 μ 则取 3.5。由式(6)、(7)和(8)，在 $f_0 = 60\%$ ，以及海洋大气典型干气溶胶谱分布的条件下，可计算比值 k' 随相对湿度 f 的变化曲线，计算结果为图 2 中虚线所示。

当大气较稳定时，干气溶胶的谱分布随时间变化不大，图 2 所示理论值与实测值的比较表明，若相对湿度随时间增大，则比值 $k' = \frac{\sigma(f)}{\sigma(f_0)}$ 亦随之递增，并导致气象能见度的下降。反之亦然。于是，在上述条件下，只要采用适合当地的湿气溶胶粒子尺度随相对湿

度变化的经验公式,便有可能根据理论计算曲线,以及相对湿度的未来变化,预报气象能见度的变化。

3. 结 束 语

对于海洋大气和污染大气两类典型的干气溶胶谱分布,比值 $k = \frac{\sigma(p)}{\sigma(1)}$ 随 $p = \frac{r(f)}{r}$ 值(取决于相对湿度)的增大而显著增大,其变化规律与气溶胶光学折射率和干气溶胶谱分布的关系均不甚密切。

在大气稳定条件下,根据适合实际的湿气溶胶粒子尺度随相对湿度变化的经验公式,在典型的干气溶胶谱分布和光学折射率的条件下,通过光散射理论,可获得比值 $k' = \frac{\sigma(f)}{\sigma(f_0)}$ (f_0 一般取 60%)随相对湿度 f 变化的理论计算曲线。于是,根据相对湿度的未来变化,有可能预报气象能见度的变化。

参 考 文 献

- [1] Middleton, W. E., *Vision through the atmosphere*, Canada Toronto Univ. Press, 1952.
- [2] Kasten, F., *Visibility forecast in the phase of precondensation*, *Tellus*, 21 (5), 631—635, 1969.
- [3] Hänel, G., *New results concerning the dependence of visibility on relative humidity and their significance in a model for visibility forecast*, *Contrib. Atmos. Phys.*, 44, 137—167, 1971.
- [4] 游荣高, 大气气溶胶浓度和尺度谱分布变化特征及尺度谱分布模式的研究, *科学探索*, 1(3), 11—22, 1981.
- [5] Junge, C., *The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical data on the atmosphere*, *J. Meteor.*, 12(1), 13—25, 1955.
- [6] Kerker, M., *The scattering of light and other electromagnetic radiation*, Academic Press, New York, 1969.
- [7] Herman, B. M., L. J. Battar, *Calculations of Mie back-scattering from melting ice spheres*, *J. Meteor.*, 18(4), 468—478, 1961.
- [8] Deirmendjian, D., *Electromagnetic scattering on spherical polydispersions*, American Elsevier, New York, 1969.
- [9] 孙景群、张海福, 激光遥测大气尘埃质量浓度的理论分析, *环境科学学报*, 2(1), 36—43, 1982.
- [10] Fitzgerald, J. W., *The relative contribution of fluctuations in relative humidity and particulate concentrations to the variability of the scattering coefficient over the north Atlantic*, *Atmos. Environ.*, 14(1), 71—77, 1980.