

# 大气气溶胶的光学厚度和 Ångström 公式的适用范围

王 庚 辰

(中国科学院大气物理研究所)

## 提 要

本文根据在不同大气条件下获得的大量观测资料,分析了大气气溶胶光学厚度的变化;估计了 Ångström 公式的精度,并在此基础上讨论了 Ångström 公式和实测结果的符合程度以及 Ångström 公式的适用范围。结果表明,在可见光和近红外范围内,Ångström 公式仅和 20% 左右的实测结果相符合。在气溶胶光学厚度小于 0.1 的洁净大气中,Ångström 公式基本上是不适用的。WMO 建议使用 3800 埃和 5000 埃两个波长来确定 Ångström 参数,一般会导致较大的误差。Ångström 公式的使用应限制在可见光区和比较浑浊的大气状况,并且在确定 Ångström 参数时应当使用整个可见光波段范围内的多波段太阳辐射观测资料。

## 一、前 言

在大气气溶胶光学特性的研究中,普遍采用 Ångström 公式<sup>[1]</sup>来描述气溶胶的光学厚度随波长的变化关系。世界气象组织也建议根据 Ångström 公式来评价世界各地的大气浑浊度<sup>[2]</sup>。但是,由 Ångström 公式所确定的气溶胶光学厚度和波长的关系与实际观测结果的符合程度如何? Ångström 公式的精度如何? 它的适用范围有无限制? 这些都是应当讨论和明确的问题。本文的目的在于根据不同大气浑浊度情况下和在气溶胶物理特征有明显差别的地区所获得的太阳光谱辐射资料,对 Ångström 公式的精度和适用性做出评价。

## 二、气溶胶光学厚度的变化特征

气溶胶的实际光学厚度是气溶胶研究中人们最感兴趣的参数之一。但是,由于对气溶胶的浓度、谱分布、成份等参数了解得还很不够,所以,目前关于气溶胶在各波段的光学厚度资料大多是通过实际测量得到的,其中最普遍的方法是对太阳辐射的分光观测。在可见光和近红外区范围内的大气窗区中,描述太阳直接辐射在大气中衰减的基本方程是:

$$I_0(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda)M] \quad (1)$$

其中

$$\sigma(\lambda) = \sigma_R(\lambda) + \alpha_i(\lambda)w_i + \sigma_a(\lambda) \quad (2)$$

上两式中,  $I_0(\lambda)$  和  $I(\lambda)$  分别为波长  $\lambda$  处太阳直接辐射的地外值和地面值;  $\sigma(\lambda)$  是波长  $\lambda$  处单位大气质量的大气光学厚度;  $M$  是大气质量数;  $\sigma_R(\lambda)$  是分子散射光学厚度;  $\alpha_i(\lambda)$  是大气中某种气体(如臭氧, 水汽, 二氧化碳, 氧气等)的吸收系数,  $w_i$  是吸收物含量;  $\sigma_a(\lambda)$  是波长  $\lambda$  处气溶胶的光学厚度。根据对太阳辐射进行的多波段分光观测结果, 按照(1)式可获得给定波长处的大气光学厚度,  $\sigma(\lambda)$ , 然后, 按(2)式可得到相应的气溶胶光学厚度值  $\sigma_a(\lambda)$ 。

为了研究气溶胶光学厚度的变化特征, 我们按照上述方法对几年来在我国珠峰<sup>[3,4]</sup>、北京<sup>[5]</sup>、香河等地区获得的 400 余份太阳辐射分光观测资料进行了分析。为使分析结果具有普遍意义和合理评价 Ångström 公式, 对一些国外研究者取得的某些观测结果<sup>[6-12]</sup>也一并进行了分析。分析结果表明: 1) 对于可见光和近红外范围内的某一给定波长  $\lambda$  而言, 气溶胶的光学厚度可以随地区和气象条件的差异有很大的变化。例如, 就整层大气而言, 在 0.55 微米处,  $\sigma_a$  值可以从高山地区洁净大气的 0.01 到城市污染大气的 1.5 左右; 2) 对于绝大多数地区和气象条件而言, 气溶胶光学厚度随波长的变化是明显的, 但一般在近红外区, 这种变化速率要比在可见光区小; 3) 气溶胶光学厚度随波长的变化特征是各种各样的, 在不同大气和不同地理条件下, 可以有完全不同的变化规律。由此可见, 在实际大气中, 整层大气的气溶胶光学厚度及其变化是一个相当复杂的问题, 它不仅取决于气溶胶本身的物理、光学特性及其在大气中的时空分布, 而且还受到大气环境、地理条件的影响。

### 三、Ångström 公式的精度估计

Ångström 建议<sup>[3]</sup>, 大气中气溶胶的光学厚度可由下式给出:

$$\sigma_a(\lambda) = b\lambda^{-n} \quad (3)$$

式中  $b$  称之为浑浊系数, 它反映大气中气溶胶粒子的散射强度。可以发现,  $b$  实际上是气溶胶在波长 1 微米处的光学厚度。  $n$  是粗粒参数, 它的大小取决于粒子谱的分布特征, 根据散射理论, 当粒子尺度很大时,  $n \rightarrow 0$ , 而当粒子大小接近于分子尺度时  $n \rightarrow 4$ 。

Ångström 公式表明, 气溶胶光学厚度随波长按指数规律变化。根据在不同波长观测到的  $\sigma_a(\lambda)$  值, 按 Ångström 公式很容易得到  $b$  和  $n$  值。可以看到, Ångström 公式是一个类似于 Mie 散射光学厚度的表达式, 看起来, 这是一个在大气窗区(主要是可见光和近红外区)估计气溶胶光学厚度的简单而又方便的经验公式。

很明显, 在由 Ångström 公式确定的气溶胶光学厚度随波长的变化关系中,  $n$  起着决定性的作用。但是, 由式(1), (2)和(3)可以发现, 要得到  $n$  值需要取两次对数, 这样就容易导致较大的误差。为了评价 Ångström 公式的精度, 我们首先估计一下根据对太阳辐射多波段观测资料得到的气溶胶光学厚度  $\sigma_a(\lambda)$  的精度。由式(1)和(2)得到  $\sigma_a(\lambda)$  值的最大绝对误差  $\Delta\sigma_a(\lambda)$  为:

$$\Delta\sigma_s(\lambda) = \frac{1}{M} \frac{\Delta I_0(\lambda)}{I_0(\lambda)} + \frac{1}{M} \frac{\Delta I(\lambda)}{I(\lambda)} + \frac{\ln I_0(\lambda) - \ln I(\lambda)}{M^2} \cdot \Delta M + \Delta\sigma_R(\lambda) + \omega \cdot \Delta\alpha(\lambda) + \alpha(\lambda) \cdot \Delta\omega \quad (4)$$

为获得  $\Delta\sigma_s(\lambda)$  值的定量概念,在一般大气条件下取:  $M = 2$ ,  $\Delta M = 0.001$ ,  $\Delta I_0(\lambda)/I_0(\lambda) = \Delta I(\lambda)/I(\lambda) = 0.01$ ,  $\ln I_0(\lambda) - \ln I(\lambda) = 0.5$ ,  $\Delta\sigma_R(\lambda) = 0.005$ ,  $\omega = 0.3$  厘米,  $\Delta\omega = 0.05$  厘米,  $\alpha = 0.05$  厘米<sup>-1</sup>,  $\Delta\alpha = 0.005$  厘米<sup>-1</sup>. 得到  $\Delta\sigma_s = 0.0191$ . 在不同大气光学厚度情况下  $\Delta\sigma_s$  所引起的相对误差见表 1.

表 1 大气光学厚度的相对误差

| $\sigma_s$                    | 0.01 | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 1.00 | 1.50 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\Delta\sigma_s/\sigma_s(\%)$ | 191  | 38   | 19   | 9.5  | 6.4  | 4.8  | 3.8  | 1.9  | 1.3  |

现在来讨论 Ångström 公式中粗粒参数  $n$  的误差. 实际上,根据式(3),如果使用两个波长(对于 Volz 型太阳辐射计, WMO 建议使用的两个波长是 3800 埃和 5000 埃)  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的资料来确定  $n$  值,则其绝对误差  $\Delta n$  为:

$$\Delta n = \frac{1}{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2} \left[ \frac{\Delta\sigma_s(\lambda_1)}{\sigma_s(\lambda_1)} + \frac{\Delta\sigma_s(\lambda_2)}{\sigma_s(\lambda_2)} \right] \quad (5)$$

式(5)清楚地表明,  $n$  值的精度依赖于: 1) 使用波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的间距, 2) 气溶胶光学厚度的绝对误差和, 3) 气溶胶光学厚度值的大小. 式(5)还表明,在同样的条件下,在非常洁净的大气中,使用两个波长的观测资料来确定  $n$  值,可能会导致很大的误差.

在一般大气状况下,取  $\sigma_s = 0.30$ ,  $\Delta\sigma_s/\sigma_s = 0.064$ , 当使用波长为 3800 埃和 5000 埃时,由式(5)得到  $\Delta n = 0.466$ , 而当使用波长为 3800 埃和 7500 埃时,  $\Delta n = 0.210$ . 对于一般平原地区的气溶胶谱,取  $n = 1.3$ , 则粗粒参数的相对误差分别为 36% 和 16%. 图

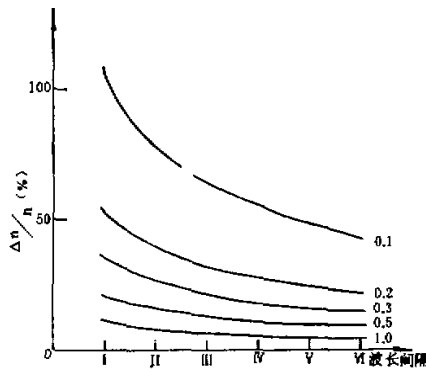


图 1 粗粒参数相对误差随选取波长的变化. 曲线上所标数字为大气光学厚度值, 横座标罗马数字分别表示:

- I.  $\lambda_1 = 3800$  埃,  $\lambda_2 = 5000$  埃, II.  $\lambda_1 = 3800$  埃,  $\lambda_2 = 5500$  埃,  
 III.  $\lambda_1 = 3800$  埃,  $\lambda_2 = 6000$  埃, IV.  $\lambda_1 = 3800$  埃,  $\lambda_2 = 6500$  埃,  
 V.  $\lambda_1 = 3800$  埃,  $\lambda_2 = 7000$  埃, VI.  $\lambda_1 = 3800$  埃,  $\lambda_2 = 7500$  埃.

1 给出了在不同大气光学厚度情况下  $\Delta n/n$  值随选取波长的变化曲线。

#### 四、关于 Ångström 公式适用范围的讨论

对实际观测资料的分析表明,在实际大气中,大气气溶胶在可见光和近红外区的光学厚度可以在很大范围内变化。要寻求这种变化的规律性和用合理的表达式来描述这种变化并不是一件容易的事情,它需要对包括气溶胶本身的特征参数以及环境条件在内的大量因子做综合性的分析,需要对气溶胶在实际大气中的扩散、凝并、沉降等物理过程做定量化的研究。尽管如此,为了讨论 Ångström 公式在实际大气中的适用程度,我们把在不同地区和在不同大气条件下获得的测量结果,按气溶胶光学厚度随波长的变化特征进行了分类。在对数座标图上,这种变化特征可分为以下六类:

I,  $\sigma_s$  值随波长的增大而减小,变化呈直线或基本接近于直线。

II,  $\sigma_s$  值随波长的增大而减小,但变化呈凹型曲线。

III,  $\sigma_s$  值随波长的增大而减小,但在较短波区变化呈凹型曲线,而在较长波区变化呈凸型曲线。

IV,  $\sigma_s$  值随波长的增大而减小,但在较短波区变化呈凸型曲线,而在较长波区变化呈凹型曲线。

V,  $\sigma_s$  值随波长的增大而减小,但变化呈凸型曲线。

VI,  $\sigma_s$  值随波长的增大而增大。

上述六种类型变化特征的示意图 2。不难发现,图中所列六种类型的变化曲线中,

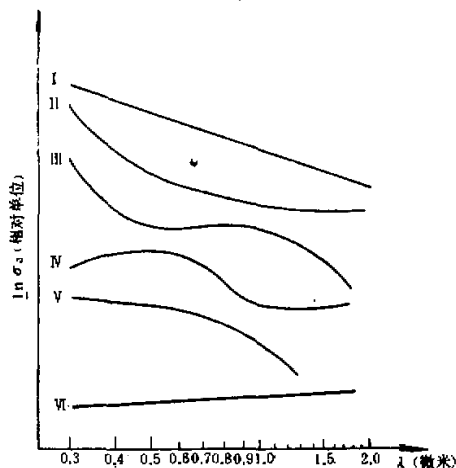


图 2  $\ln \sigma_s$  随  $\ln \lambda$  变化特征的示意图

只有第一类才和 Ångström 关系式相符合,而其它五类则表明,在可见光和近红外波区,气溶胶光学厚度和波长的依赖关系并不遵守简单的指数规律。为获得定量概念,我们根据 400 余份资料,对实测结果与 Ångström 公式确定的线性关系之间的均方根相对误差进行

了计算,结果发现,在均方根相对误差不大于 10% 的情况下,符合类型 I 的观测结果约为 20% (如果把讨论限制在可见光区,这个比例可达 60% 左右);类型 II, III, IV 约占 65%;而类型 V, VI 约为 15%。

现在来讨论 Ångström 关系式和某些实测结果不相符的原因。实际上,在假定地球大气为水平均匀以及气溶胶为球形粒子情况下,整层大气的气溶胶光学厚度可由下式计算得到:

$$\sigma_a(\lambda) = \int_0^{\infty} \beta(h, \lambda) dh \quad (6)$$

这里,

$$\beta(h, \lambda) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} N(r, h) Q(\lambda, r, m) dr \quad (7)$$

式(6), (7)中,  $\beta(h, \lambda)$  是高度  $h$  处气溶胶粒子在波长  $\lambda$  处的消光系数;  $r$  是粒子半径;  $N(r, h)$  是高度  $h$  处的粒子分布;  $Q$  是单个粒子的散射截面;  $m$  是粒子的折射指数。若进一步假定气溶胶粒子遵循 Junge 分布,则很容易得到式(6)中的  $\beta$  值:

$$\beta(h, \lambda) = k(h)\lambda^{-\nu+2} \quad (8)$$

式(8)中  $k$  是比例系数,  $\nu$  是 Junge 分布中的形状参数,一般情况下有  $2 \leq \nu \leq 4$ 。可见,严格说来,只有在 Junge 粒子分布情况下,气溶胶的光学厚度随波长的变化才遵循指数规律,并且粒子谱越宽,这种变化规律和实测结果的符合程度就会越好。但是,实测结果表明,在实际大气中,尤其是在粒子谱较宽的情况下, Junge 分布的适用性是有限的<sup>[6,13]</sup>,这就构成了限制 Ångström 公式使用范围的首要原因。其次,实际大气中的气溶胶是一个多色散粒子系统,在不同大气条件下,粒子谱本身在不同谱区的相对变化可以有很大的差别<sup>[13]</sup>,因此不同波长处所引起的光学效应的变化也自然会不尽相同,所以气溶胶在从可见光到近红外区的光学厚度的变化自然也就很难用同一个表达式来描述。第三, Ångström 公式是根据在平原地区多年的可见光观测资料而确定的,一般人把在近红外区所取得的资料也用 Ångström 公式来处理显然是不恰当的。气溶胶粒子在近红外区的光学特性在某些大气条件下会由于某些粒子成份的吸收效应而明显地区别于可见光区。最后,气溶胶粒子的组分在不同大气和地理条件下可以有很大的差别,而不同组分的粒子显然具有不同的光学特性,从而也会直接影响到气溶胶的光学厚度及其随波长的变化。所有上述种种,显然都是导致 Ångström 公式在某些大气条件下或在某些波区和实测结果不符的重要原因。

## 五、结 论

根据实测资料对 Ångström 公式的精度和适用性的讨论表明:

1. 大气气溶胶的光学厚度由于环境条件的差异,可以在很大范围内变化;大气愈浑浊,大气气溶胶光学厚度测量的相对误差就愈小,在同样的条件下, Ångström 参数的确定精度也就愈高,反之,  $\Delta n/n$  值就愈大。
2. 在可见光和近红外范围内,实际大气中气溶胶光学厚度随波长的变化是明显的。但

这种变化和 Ångström 公式相符合的 (其均方根相对误差不大于 10%) 仅有 20% 左右。

3. Ångström 公式基本上不适用于气溶胶光学厚度小于 0.1 的洁净大气, 因为在这种情况下  $\Delta n/n$  值一般都大于 40%。

4. 在确定 Ångström 参数时, 使用 WMO 建议的 3800 埃和 5000 埃两个波长在一般情况下会造成较大的相对误差, 对于气溶胶光学厚度小于 0.2 的较洁净大气, 这种相对误差一般会超过 50%。

5. 对 Ångström 公式的使用应当限制在可见光区和比较浑浊的大气条件。同时, 对于 Ångström 参数的确定应当使用整个可见光范围内的多波段太阳辐射观测资料。

### 参 考 文 献

- [1] Ångström A. K., *Tellus*, 16, 64—75, 1964.
- [2] WMO—No. 299, 1971.
- [3] 童庆禧、项月琴, 珠穆朗玛峰地区科学考察报告, 1966—1968, 气象与太阳辐射, 科学出版社, 1975.
- [4] 王庚辰, 许黎等, 大气科学, Vol. 3, No. 4, 1979.
- [5] 林海, 强重, 大气科学, 第二期, 1976.
- [6] King M. D. et al., *J. Atmos. Sci.*, 35, 2153—2167, 1978.
- [7] Murai K. et al., *Papers in Meteorology and Geophysics*, 28, 169—184, 1977.
- [8] Murai K. et al., *Papers in Meteorology and Geophysics*, Vol. 18, No. 3, 1967; Vol. 27, No. 1, 1976; Vol. 30, No. 2, 1979.
- [9] Yamamoto G. and Tanaka M., *Appl. Opt.*, Vol. 8, No. 2, 1969.
- [10] Shaw G. E., *J. Appl. Meteor.*, Vol. 12, No. 2, 1973.
- [11] Полякова Е. А., Труды ГГО, вып. 357, 1976.
- [12] Rangarajan S., *Tellus*, Vol. 24, No. 1, 1972.
- [13] 王庚辰, 大气气溶胶浓度及其谱分布特征, 1979 (待发表)。

## OPTICAL DEPTH OF ATMOSPHERIC AEROSOLS AND THE VALID RANGE OF ÅNGSTRÖM FORMULA

Wang Geng-chen

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

### Abstract

The variation of the optical depth of atmospheric aerosols has been analysed based on measurement data under different atmospheric conditions. The accuracy of Ångström formula is estimated. The agreement of Ångström formula with measurement data and the valid range of the Ångström formula are discussed. The result shows that: 1) in the visible and near-infrared spectral regions only 20% of the measurement data are in close agreement with Ångström formula; 2) when aerosol optical depth is smaller than 0.1, the Ångström formula is essentially invalid; 3) using wavelengths 3800 Å and 5000 Å for the determination of Ångström parameters, as suggested by WMO, may produce a larger relative error; 4) application of the Ångström formula should be limited to the visible spectral region and turbid atmosphere; moreover, the Ångström parameters should be determined by the use of multispectral solar radiation data in the whole visible region instead of two wavelengths.