

大气气溶胶对臭氧总量测值的影响

汪宏七

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用 Mie 散射理论计算了不同复折射指数不同谱分布几种气溶胶对 Dobson 分光光度计和宽带滤光片光度计臭氧总量测值的影响。

一、引 言

在地球上 10—50 公里高度的臭氧层强烈地吸收太阳紫外辐射,大气臭氧量的多少直接影响着到达生物圈紫外辐射的强度,同时它对地球能量收支平衡和地球气候也有重要影响。因此,精确地监测大气臭氧量和它的变化成了高层大气物理学的重要课题之一。目前世界上采用 Dobson 分光光度计作标准进行臭氧总量常规观测,在苏联和东欧地区还应用 M-83 滤光片光度计作常规观测。引起这些仪器测值误差的原因很多,其中之一即大气气溶胶。为了消除气溶胶消光对臭氧测值的影响,目前推荐在 Dobson 分光光度计观测中采用双波长组 AD 组测值 x_{AD} 为臭氧总量,这相当于假设气溶胶消光随波长作线性变化。Basher (1973)^[1] 提出用抛物线函数来近似气溶胶消光,用 Dobson 分光光度计各组测值和这种近似推算的 O_3 总量与 x_{AD} 可相差 0.024 大气厘米之多。Shah (1976)^[2] 采用 Ångström 经验公式作气溶胶消光近似,得到的结果是气溶胶的数量和谱分布对 x_{AD} 影响非常小。Shah (1979)^[3] 提出气溶胶消光的指数函数近似,利用 Dobson 分光光度计的三个单组测值确定 O_3 总量,得到的结果与 Basher 的差不多。本文应用 Mie 散射理论计算实际可能的一些大气气溶胶消光来估计气溶胶消光引起 O_3 总量测值误差。

二、方 法

通过地球大气到达地面的太阳辐射通量

$$F_{\lambda} = F_{0\lambda} e^{-(\alpha_{\lambda} x + \beta_{\lambda} m + \delta_{\lambda} m')} \quad (1)$$

F_{λ} , $F_{0\lambda}$ 分别为到达仪器的和大气外界的波长 λ 的太阳辐射通量密度, α_{λ} 为波长 λ 的臭氧吸收系数, β_{λ} 为波长 λ 的垂直整层大气分子散射光学厚度, δ_{λ} 为波长 λ 的垂直整层大气气溶胶消光光学厚度, x 为大气臭氧总量, μ 为通过臭氧层的太阳光的相对光学质量, m 为通过大气层的太阳光的相对光学质量, m' 为通过气溶胶层的太阳光的相对光学质量。

Dobson 分光光度计方法是测量位于臭氧强吸收和弱吸收两个波长处的辐射通量密

度比值,从而推算出臭氧总量。其中单组的方法

$$x = (N_i - m\Delta\beta_i)\mu^{-1}\Delta\alpha_i^{-1} - m'(\delta_i - \delta_i')\mu^{-1}\Delta\alpha_i^{-1} \quad (i \text{ 为 } A, B, C, D \text{ 组}) \quad (2)$$

此处 $N = \log(F_{0\lambda}/F_{0\lambda}') - \log(F_{\lambda}/F_{\lambda}')$

双组的方法

$$x = (\Delta N_{ij} - m\Delta\beta_{ij})\mu^{-1}\Delta\alpha_{ij}^{-1} - m'[(\delta_i - \delta_i')_i - (\delta_i - \delta_i')_j]\mu^{-1}\Delta\alpha_{ij}^{-1} \quad (ij \text{ 为 } AD, CD \text{ 组}) \quad (3)$$

因为在近紫外波段气溶胶消光 δ_λ 随波长变化比 α_λ 和 β_λ 的变化要小很多,通常认为

$$(\delta_\lambda - \delta_\lambda')_i = 0$$

或

$$(\delta_\lambda - \delta_\lambda')_i - (\delta_\lambda - \delta_\lambda')_j = 0$$

空气分子散射是可以精确估算的,在太阳天顶角不大时 $m \simeq \mu$, $m' \simeq \mu$, 因而可以推得 x 值。

宽带滤光片光度计的方法是测量通过中心波长位于臭氧强吸收和弱吸收的两块滤光片的辐射通量密度比来推算 x 。两个通道输出的光电流比值

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\int_{\Delta\lambda_1} K_{1\lambda} F_{0\lambda} e^{-(\alpha_\lambda x \mu + \beta_\lambda m + \delta_\lambda m')} d\lambda}{\int_{\Delta\lambda_2} K_{2\lambda} F_{0\lambda} e^{-(\alpha_\lambda x \mu + \beta_\lambda m + \delta_\lambda m')} d\lambda} \quad (4)$$

$\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别为两块滤光片带通的波长范围。 $K_{1\lambda}$ 、 $K_{2\lambda}$ 分别为两个通道的仪器常数(包括滤光片透过率和接收器光谱灵敏度)。预先由大气外界太阳光谱辐射通量和仪器常数算出不同 x 值下 I_1/I_2 随太阳天顶角 θ (通过 μ , m , m') 变化的曲线图。根据测得的比值和测量时刻 (θ) 在预算的比值曲线图上内插即得到 x 值。在预算比值曲线图时,也认为两个滤光片波段范围内气溶胶消光与波长无关而于公式的分子分母中消去。

本工作用 Mie 散射理论计算了不同复折射指数和谱分布的几种气溶胶在 0.55 微米处光学厚度均为常值时近紫外波段各波长的 δ_λ 值,用来估计由于忽略它们的差值而引起 O_3 总量的误差 Δx 。

对于 Dobson 分光光度计,单组测量

$$\Delta x_i = (\delta_i - \delta_i')_i m' \Delta\alpha_i^{-1} \mu^{-1} \quad (5)$$

双组测量

$$\Delta x_{ij} = [(\delta_i - \delta_i')_i - (\delta_i - \delta_i')_j] m' \Delta\alpha_{ij}^{-1} \mu^{-1} \quad (6)$$

对于宽带滤光片光度计,在公式(4)中对于给定的 x , μ 值考虑几种模式气溶胶的消光,求出比值 I_1/I_2 , 然后在预算的比值曲线图上内插求出 x' , 则

$$\Delta x = x' - x$$

三、计算和结果

关于气溶胶的复折射指数 n , 我们选择了代表干气溶胶的 $1.5-i0.007$, $1.5-i0.01$,

1.5—i0.03, 1.5—i0.07, 1.5—i0.1, 1.5—i0, 1.55—i0, 1.60—i0, 1.65—i0.007 和代表水的 1.33—i0.

关于气溶胶的谱分布,选择了代表典型大陆性、海洋性气溶胶的 Deirmendjian^[4] 广义 Γ 分布

$$\frac{dn(r)}{dr} = ar^a \exp(-br^r) \quad 0 \leq r < \infty$$

的 Γ L、 Γ M 谱和不同指数的 Junge 分布

$$\frac{dn(r)}{dr} = \begin{cases} A \cdot 10^{r^*} & 0.02 \mu\text{m} \leq r \leq 0.1 \mu\text{m} \\ A \cdot r^{-r^*} & 0.1 \mu\text{m} \leq r \leq 10 \mu\text{m} \\ 0 & r > 10 \mu\text{m} \text{ 或 } r < 0.02 \mu\text{m} \end{cases}$$

广义 Γ 分布各谱的指数见表 1. Junge 分布的指数 r^* 取值为 3, 3.5, 4, 4.5. A 为归一化系数,使单位体积粒子个数为 1.

表 1 气溶胶广义 Γ 谱参数

谱 型	a	b	α	γ
Γ L	4.9757×10^4	15.1186	2	0.5
Γ M	5.3333×10^4	8.9443	1	0.5

由于地面能见度和波长 0.55 微米辐射的消光系数有一定关系,而地面能见度又常常作为晴朗天空大气光学状态的粗略标志,作为比较,考虑各模式气溶胶的影响都是在调整总数密度使各种气溶胶 0.55 微米垂直整层光学厚度 $\delta_{0.55}$ 为常值的情况下进行的.

在宽带滤光片光度计方法的计算中,地球大气外界的太阳光谱通量密度采用 Thekaekara^[5]1973 年的值, O_3 吸收系数采用 Vigroux^[6] 的值,大气密度采用 McClatchey^[7] 等人的中纬度夏季值,臭氧与气溶胶垂直分布廓线分别与同一作者的臭氧中纬度夏季值与“晴朗”气溶胶模式相似.我们对三种滤光片光度计进行了计算.第一种光度计,两块滤光片中心波长分别为 0.3110 和 0.3300 微米,带宽均为 71 埃.另两种分别是对拟合 M-83 和更新 M-83 滤光片的透过率曲线^[8]进行的.在计算中,这三种情况都设探测器灵敏度在考虑的波长范围内为常值.计算对 x 初值为 0.200, 0.350, 0.500 大气厘米进行.

表 2 给出 $\delta_{0.55} = 1$, $\theta = 0^\circ$ 时各种模式气溶胶引起 Dobson 分光光度计测量 O_3 总量的误差范围.对于不同的 O_3 总量 x ,绝对误差相同,相对误差与 x 值成反比.通常天气条件下气溶胶垂直整层光学厚度不超过 0.5,这时各种模式气溶胶在极端情况下 ($\delta_{0.55} = 0.5$, $r^* = 4.5$ 的 Junge 分布)引起 Dobson 分光光度计的 A, C, D 组和 AD 组的 O_3 测值误差分别不超过 0.018, 0.040, 0.091 和 0.002 大气厘米.而大气中 O_3 总量的平均值在 0.300 大气厘米左右,所以实际大气中气溶胶消光引起的 AD 组误差通常远小于 1%.

表 3 给出 $\delta_{0.55} = 0.5$, $\theta = 0^\circ$, O_3 总量初值为 0.350 大气厘米时各种气溶胶引起宽带滤光片光度计 M-83 和更新 M-83 的 O_3 总量测值的误差和相对误差的范围.气溶胶消光对宽带滤光片光度计的结果比对 Dobson AD 组结果影响要大.在所考虑的波段内,波长相距愈近,气溶胶消光相差愈小,但臭氧吸收系数差值也小.在接收器能接收到足够辐射的情况下,使短波滤光片尽可能位于吸收强的较短波长处,适当选择长波滤光片的波

表 2 $\delta_{0.55} = 1$ 各种气溶胶引起 Dobson 分光光度计 O_3 总量测值的误差 Δx (大气厘米)^(*)

	广 义 r 谱		Junge 谱 (r^*)			
	谱 M	谱 L	3	3.5	4	4.5
Δx_A	-0.0018	-0.0009	-0.0015	0.002	0.007	0.013
	-0.003	-0.003	0.0010	0.009	0.020	0.036
Δx_C	-0.004	-0.002	-0.003	0.006	0.017	0.030
	-0.007	-0.008	0.002	0.020	0.046	0.080
Δx_D	-0.010	-0.003	-0.006	0.015	0.042	0.073
	-0.016	-0.018	0.006	0.045	0.105	0.182
Δx_{AD}	0.0001	-0.0004	-0.0003	-0.0009	-0.0015	-0.002
	0.0003	0.0004	-0.0004	-0.0012	-0.002	-0.004
Δx_{CD}	0.0001	-0.0007	-0.0006	-0.0016	-0.003	-0.004
	0.0005	0.0006	-0.0010	-0.002	-0.004	-0.007

* 本表给出同一谱形下不同复折射指数气溶胶引起误差的最小和最大值

表 3 $\delta_{0.55} = 0.5$ 各种气溶胶引起宽带滤光片光度计 O_3 总量测值的误差 Δx ^(*)
(x 初值 0.350 大气厘米、 $\theta = 0^\circ$)

		广 义 r 谱		Junge 谱 (r^*)			
		谱 M	谱 L	3	3.5	4	4.5
M-83	大气厘米	-0.008	-0.0007	-0.004	0.016	0.041	0.071
		-0.013	-0.015	0.006	0.041	0.095	0.168
	%	-2.4	-0.2	-1.2	4.4	11.7	20.3
		-3.8	-4.3	1.6	11.6	27.1	48.1
更新 M-83	大气厘米	-0.0012	-0.0005	-0.0009	0.0015	0.005	0.008
		-0.0018	-0.002	0.0007	0.005	0.013	0.023
	%	-0.3	-0.2	-0.3	0.4	1.3	2.4
		-0.5	-0.6	0.2	1.6	3.7	6.5

* 本表给出同一谱形下不同复折射指数气溶胶引起误差的最小和最大值

长可使 O_3 总量测值受气溶胶影响小些。更新 M-83 滤光片光度计的两块滤光片比 M-83 的滤光片朝短波移动并且相互更靠近。计算表明,气溶胶对更新 M-83 测值的影响远小于对 M-83 的影响。在通常天气条件下 ($\delta_{0.55} < 0.5$),太阳天顶角不大时,气溶胶消光引起更新 M-83 O_3 测值误差小于 0.023 大气厘米,即在 x 值为 0.350 大气厘米时相对误差小于 6.5%。M-83 的测值误差则相当大。

由表 1 和表 2 还可看到,在 0.55 微米气溶胶垂直整层光学厚度相同的情况下,大粒子较丰富的宽谱气溶胶引起 O_3 总量测值误差较窄谱气溶胶的要小。

复折射指数和谱分布相同的气溶胶在粒子总数不同,即不同 $\delta_{0.55}$ 值引起的 O_3 总量测值误差与 $\delta_{0.55}$ 值基本成正比,见图 1。

气溶胶整层光学厚度不变时,在太阳天顶角不大的情况下,同一种气溶胶消光引起的

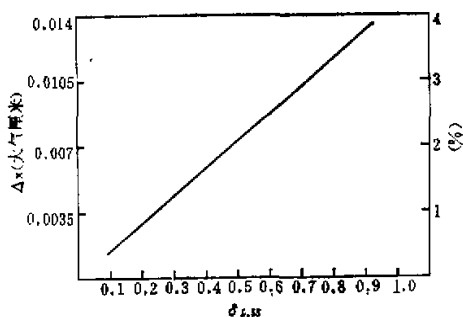


图1 同一种气溶胶引起 O_3 总量测值误差 Δx 与 $\delta_{0.55}$ 的关系. $\left(n = 1.5 - i0.01, \frac{dn(r)}{dr} = 4r^{-4}, \theta = 0^\circ, x = 0.350 \text{ 大气厘米, 更新 M-83 滤光片光度计}\right)$

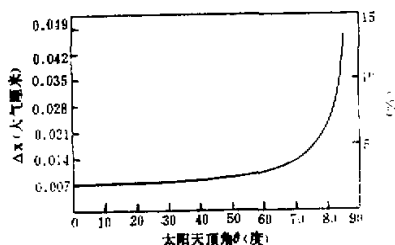


图2 同一种气溶胶引起 O_3 总量测值误差 Δx 与太阳天顶角的关系. $\left(n = 1.5 - i0.01, \frac{dn(r)}{dr} = 4r^{-4}, \delta_{0.55} = 0.5, x = 0.350 \text{ 大气厘米, 更新 M-83 滤光片光度计}\right)$

O_3 总量测值误差随天顶角变化不大,但在天顶角较大时($\theta > 60^\circ$),随着天顶角的增大误差显著增大。(见图2)。这主要是因为随着 μ 值增大,对较短波长辐射的吸收比之较长波长增加得快,使得宽带的有效波长相对地往长波移动,于是平均吸收系数减小(即“Forbes 宽带效应”),相当于公式(5)中 $\Delta\alpha_i$ 值的减小,这样误差随着增加。另外由于地球曲率的影响和由于气溶胶层主要位于5公里以下,而臭氧层在25公里高度左右,当太阳天顶角较大时,通过气溶胶层的相对光学厚度 m' 比通过臭氧层的相对光学质量 μ 要大些,特别当早晚或秋冬季有逆温层存在时,近地层气溶胶堆积较多, m' 比 μ 更要大些,这也引起误差的增加。这样在太阳天顶角较大时,气溶胶消光引起宽带滤光片光度计的 O_3 总量测值误差相当大。

四、结 论

用 Mie 散射理论对实际可能气溶胶的消光进行计算表明,气溶胶消光对 Dobson 分光光度计 AD 组测值的影响远小于1%。因此目前推荐的 x_{AD} 值作 O_3 总量值是合适的。 x_{AD} 值的长期变化能反映 O_3 总量的长期变化趋势。宽带滤光片光度计受气溶胶消光的影响较大,如更新 M-83 可有百分之几的误差,特别是在大的 μ 值时,由于“宽带效应”,气溶胶消光引起的误差大大地增加。这时运用宽带滤光片光度计的测值应予以注意。

本工作在周秀骥、吕达仁同志指导下进行,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Basher, B. E., *Royal. Meteo. Society. Quar. Jour.*, 102(433), p. 667, 1976.
- [2] Shah, G. M., *J. Atmos. Sci.*, 33(12), p. 2462, 1976.
- [3] Shah, G. M., *J. Appl. Meteor.*, 18(9), p. 1158, 1979.
- [4] Deirmendjian, D., *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*, American Elsevier, New York, N. Y., 290 pp., 1969.
- [5] Thekaekara, M. P., *Solar Energy*, 14(2), p. 109, 1973.
- [6] Vigroux, E., *Annales de Physique*, 8: 709, 1953.
- [7] McClatchey, R. A., et al. *Optical Properties of the Atmosphere*, (Third Edition), AFGL 72-0497.
- [8] Gushchin, G. P., *Proceedings of the Joint Symposium on Atmospheric Ozone*, Vol. 1, p. 135, Berlin, 1977.

THE EFFECT OF ATMOSPHERIC AEROSOL ON THE DETERMINATION OF TOTAL OZONE

Wang Hong-qi

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

The effects of aerosols with different refractive indices and size distributions on the determination of total ozone by a Dobson spectrophotometer or a wide band filter photometer are evaluated. The calculation is made using the theory of Mie scattering.