

大气气溶胶对激光的消光的理论计算

吕达仁 魏重

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

计算了某几类大气气溶胶谱分布对 0.6943μ 、 1.06μ 和 10.6μ 等几个波长的消光特性。结果表明利用能见度确定激光大气消光系数的可能和局限。

一、引 言

激光在大气中传输所遇到的重要问题之一就是大气对激光不同程度的消光和散射。除某些特殊需要外,在大气中传输的激光其波长都注意了避开大气气体成份(例如氧气和水汽等)的吸收线。但是,各种波长的激光都毫无例外地要受到大气气溶胶粒子(包括云雾水滴)的衰减作用。因此,研究不同天气条件下大气气溶胶对激光的消光具有一定的重要性。

大气气溶胶对激光的消光需要通过实验测量和理论估计两方面的途径来进行。在理论计算方面,一般是选取具有一定代表性的大气气溶胶模式,利用粒子散射公式进行严格的数值计算。因此其结果也只能是一种近似。这是它的局限性的一面。但是这种理论计算(或称数值试验)也有其突出的优越性,即它可利用高速电子计算机对许多不同类型谱分布以及不同光学特性的大气气溶胶进行大范围的数值考察,因而可以在广阔的范围了解大气气溶胶的散射与消光特性,由此可以对实际情况的概括和预测作出重要的指导和预测。上述这种作用是实际测量所难以达到的。总之,实际测量和理论计算是考察激光大气散射和消光的相辅相成的两个方面。

结合激光探测大气及其他遥感探测任务的需要,我们对几个激光波长的大气气溶胶消光,用 Mie 散射公式进行了严格的数值计算,考察了 0.6943μ 、 1.06μ 以及 10.6μ 波长激光的大气消光、散射特性与气溶胶谱宽、粒子复折射指数、大气能见度之间的数值关系。本文给出某些初步结果并进行分析。

二、计算公式和气溶胶模式选择

球形粒子的电磁波散射早已有严格的 Mie 散射公式。六十年代以来已有许多利用电子计算机的数值计算工作。我们采用 van de Hulst^[1] 的表达式和 Deirmendjian^[2] 的递推

关系表达式,并纠正了文献[2]中表达式的某些错误。

关于模式选择,在气溶胶谱分布的选择上,我们采用了 Deirmendjian 所用的广义 Γ -分布,即

$$n(a) = Aa^\alpha \exp(-ba^\gamma), \quad 0 \leq a < \infty$$

这是一个四参数(A, b, α, γ)模式,其中 a 为粒子半径,该模式具有单峰并在两端自动收敛为 0,在很宽的范围内可调节参数值而逼近许多实际大气气溶胶分布,同时又有较好的解析表达运算性能。Deirmendjian 采用下列二组参数值,标以 L 和 M,分别代表典型的大陆性和海洋性气溶胶谱分布,其具体分布见图 2。可以看出, M 谱较 L 谱要宽得多。其中 A 的选择是使粒子数密度为 100 厘米⁻³,完全可以按比例变动,与谱的宽窄并无关系。

表 1 两组气溶胶谱的参数值

谱 型	A	b	α	γ	N 厘米 ⁻³	V 厘米 ³
大陆性 L	4.9757×10^6	15.1186	2	0.5	100	4.948×10^{-11}
海洋性 M	5.3333×10^4	8.9443	1	0.5	100	1.167×10^{-11}

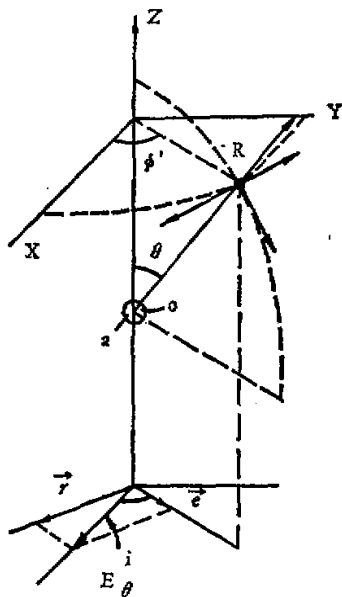


图 1 单粒子散射示意图。

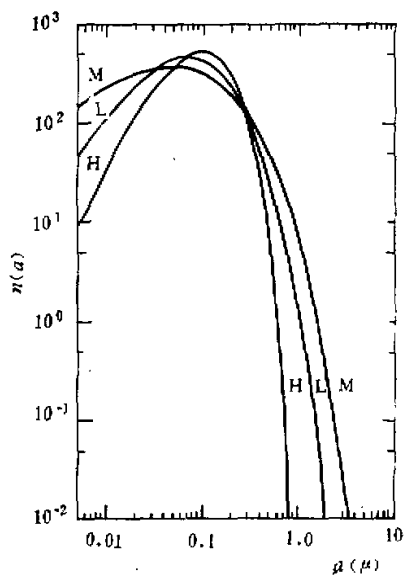


图 2 计算所选用的气溶胶谱型(引自[2])。

在气溶胶粒子的复折射指数选择问题上,以往的一些计算(如文献[2、3]等)基本上都以水的复折射指数来作计算。这在相对湿度大的环境下有较好的代表性,但在许多情况下就不能反映实际情况。因此,在我们计算时,除采用水的复折射指数外,还选用了干气溶胶的复折射指数的实测值来作计算。从目前了解看, Volz^[4,5] 在较长时间里实测了全球不少地区大气气溶胶的折射指数,并作了气溶胶所包含成分的单因子光学常数测量,对

照其他作者(如 Ивлев 等^[6])的结果看,彼此有不少相近之处,我们从 Volz 的实测结果中选用了三组气溶胶的光学常数,一组代表干燥的沙尘,另二组代表水溶性气溶胶的一般情况,具体见图 3、4。在可见段我们还选择了较多的复折射指数值,以尽可能包括严重污染大气情况在内。

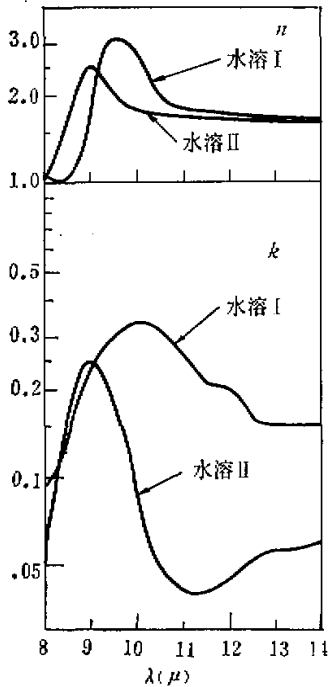


图3 水溶性气溶胶的复折射指数分布
(选自[4,5])。

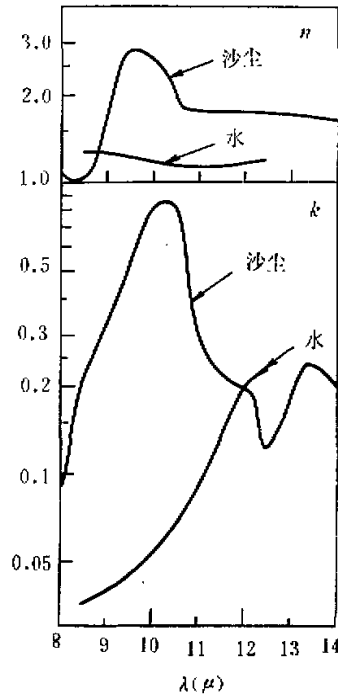


图4 沙尘和水的复折射指数分布
(选自[4,5])。

我们利用 109-乙电子计算机进行计算。以下我们分别对三个波长的计算结果作分析。

三、0.6943 的散射消光特性

1. 0.6943 μ 消光系数和水平能见度的关系

由于水平能见度是一个常用的气象要素,考察能否用水平能见度来确定 0.6943 μ 的消光系数是有实际意义的。根据能见度理论与实验研究,地面水平能见度 S_0 (公里)与 0.55 μ 是消光系数 $\sigma_{0.55}$ 由以下公式相联系

$$S_0 = \frac{3.912}{\sigma_{0.55}}$$

由上式, 0.6943 μ 的消光系数 $\sigma_{0.69}$ 与 S_0 的关系就可以通过 $\sigma_{0.69}$ 与 $\sigma_{0.55}$ 之间的关系来建立。

我们对 L、M 两种谱型和四种折射指数共八类情况的计算结果见表 2。

表 2 不同类型气溶胶的 $\sigma_{0.69}$ 和 $\sigma_{0.55}$

谱 型	m	$\sigma_{0.55}$ 公里 ⁻¹	$\sigma_{0.69}$ 公里 ⁻¹	$\sigma_{0.69}/\sigma_{0.55}$
L 沙尘	1.50—0.03i	0.04962	0.04802	0.988
L 水溶 I	1.50—0.01i	0.05059	0.04880	0.965
L 水溶 II	1.50—0.007i	0.04974	0.04840	0.973
L 水	$\begin{smallmatrix} .55\mu & 1.334 \\ .69\mu & 1.33 \end{smallmatrix}$	0.04519	0.03977	0.880
M 沙尘	1.50—0.03i	0.10648	0.10864	1.020
M 水溶 I	1.50—0.01i	0.10737	0.10970	1.022
M 水溶 II	1.50—0.007i	0.10749	0.10995	1.023
M 水	$\begin{smallmatrix} .55\mu & 1.334 \\ .69\mu & 1.33 \end{smallmatrix}$	0.10765	0.10569	0.982

由表 2 可以看出,除 L 谱水以外,在其他各种情况下 $\sigma_{0.69}$ 和 $\sigma_{0.55}$ 两者总是十分接近的。上面已经提及 L 和 M 两种谱差异是很大的,我们所选四类气溶胶性质也包括了自然气溶胶的一般情况(严重污染及强局地自然源影响情况除外)。因此有理由认为除了极干净空气或相对湿度较大形成窄谱水汽霾情况外,一般近地情况,特别是在海洋性气团影响情况下,均可以用能见度值来较好地估算得到 0.6943μ 激光的大气消光系数。

2. 同一谱形不同值对消光、散射和吸收的影响

由于大气气溶胶的复折射指数也有相当的变化,自然就需要关心在复折射指数的可能变化范围内对激光的消光和散射的影响。为此我们计算了 10—11 个 m 值情况下 L 和 M 谱的散射特性。这些 m 值大致包括了可见光段大气气溶胶 m 值的变化范围。

对 L 谱我们计算了 10 个 m 值。具体结果见表 3。由表 3 看出,在 m 的变化范围内, σ_i

表 3 L 谱不同 m 值气溶胶对 0.6943μ 的散射

NO.	$m = n - ik$	$\sigma_i 10^{-3}$ 公里 ⁻¹	$\sigma_s 10^{-3}$ 公里 ⁻¹	公里 ⁻¹	σ_i/σ_s
1	1.5 —0.007i	48.40	45.73	2.67	0.94
2	1.5 —0.01i	48.80	45.21	3.59	0.93
3	1.5 —0.03i	48.02	39.35	8.67	0.82
4	1.5 —0.1i	46.01	28.81	17.20	0.63
5	1.5 —0.3i	43.56	20.44	23.12	0.47
6	1.33—0i	39.77	39.77	0	1.00
7	1.40—0.007i	44.57	42.21	2.36	0.95
8	1.55—0.007i	50.45	47.71	2.74	0.95
9	1.60—0.007i	51.44	48.58	2.86	0.94
10	1.70—0.007i	52.58	49.50	3.08	0.94

即消光值有一定的变化,但变化范围不大。就是干气溶胶 σ_i 值偏大一些,较水汽霾同谱情况最大大 20% 左右。可以看出 σ_i 的变化在这里主要由 n 值的变化引起。反之,在 n 值不变(因而 σ_i 变化不大)而 κ 值变化时(表 3 中 1—5),则 σ_i 和 σ_a 就发生迅速的变化。当 κ 值增大时, σ_i 迅速减小,反照率(σ_i/σ_i)亦迅速减小,而吸收贡献 σ_a 大大增加,例如当遇到严重的燃烧物污染区的情况就会这样。根据实测^[4],烟灰 $\kappa \approx 0.5$, $n \approx 1.5$ 。当大气中烟灰比例增大时, κ 值就会显著增大。

对于 M 谱,我们用 11 个 m 值作了计算,结果见表 4。由表 4 看出,趋势与 L 谱情况是一致的。所不同的是水气溶胶与干气溶胶的 σ_i 差值更小,反映出 m 值变化对 σ_i 影响较 L 谱情况更小。但 κ 值变化对 σ_i 与 σ_a 的影响仍十分明显,而且 σ_a 贡献对 κ 值的变化更为敏感一些。

表 4 M 谱不同 m 值对 0.6943μ 的数值

NO.	$m = n - i$	$\sigma_i 10^{-3} \text{ 公里}^{-1}$	$\sigma_i 10^{-3} \text{ 公里}^{-1}$	$\sigma_a 10^{-3} \text{ 公里}^{-1}$	σ_i/σ_i
1	1.50—0.007i	109.9	99.9	10.0	0.91
2	1.50—0.01i	109.7	96.4	13.3	0.88
3	1.50—0.03i	108.6	80.7	27.9	0.74
4	1.50—0.1i	105.5	60.4	45.1	0.57
5	1.50—0.3i	100.3	48.5	51.8	0.48
6	1.33—0i	105.7	105.7	0	1
7	1.40—0i	109.0	109.0	0	1
8	1.50—0i	110.9	110.9	0	1
9	1.55—0i	111.0	111.0	0	1
10	1.60—0i	110.9	110.9	0	1
11	1.70—0i	110.6	110.6	0	1

四、 1.06μ 的散射特性

1.06μ 是目前常用激光波长之一。和对 0.6943μ 的计算一样,我们考察了 L、M 两种气溶胶谱分布和多个 m 值情况下大气粒子对 1.06μ 激光的散射。其综合结果见表 5。从表中可以初步看到如下几点:

1. 与地面水平能见度的关系

如前已述,只要考察 1.06μ 的消光系数与 0.55μ 的消光系数的比值即可。由表中 $\sigma_{1.06}/\sigma_{0.55}$ 可看出 L 谱水气溶胶情况其值仅 0.58,而 M 谱干气溶胶情况其值达 1,随大气粒子的成分(由此 m 值变化)和谱形有较大的变化,必须根据大气粒子的实际情况才能由水平能见度值大致估计 1.06μ 的消光系数。否则会产生较大的误差。但对海洋性粒子(M 谱)则比值在 0.88—1 之间约有 10% 的误差,还可以近似应用。

表 5 1.06 μ 的散射特性

谱型	m	$\sigma_s(\text{公里}^{-1})$	$\sigma_t(\text{公里}^{-1})$	$\sigma_a(\text{公里}^{-1})$	σ_s/σ_t	$\theta_{1/2}$	$P_{1\mu}(\times 10^{-4})$	$P_{1.2\mu}(\times 10^{-4})$	$\sigma_{1.06}/\sigma_{0.55}$
L	$1.325-0.107 \times 10^{-3}i$	0.0261	0.0261	0.0000	1.0	16.5	95	95	0.577
	$1.50-0.005i$	0.0400	0.0388	0.0012	0.970	18.0	238	231	
	$1.50-0.03i$	0.0395	0.0335	0.0060	0.848	18.0	138	117	0.796
M	$1.33-0i$	0.0951	0.0951	0	1	10.0	127	127	0.883
	$1.50-0i$	0.1111	0.1111	0	1	9.9	496	496	
	$15.0-0.007i$	0.1097	0.1026	0.0071	0.935	9.8	388	363	1.002
	$1.50-0.03i$	0.1077	0.0856	0.0221	0.795	9.4	196	156	1.000
	$1.50-0.1i$	0.1035	0.0628	0.0407	0.607	9.2	51	31	
	$1.50-0.3i$	0.0985	0.0466	0.0520	0.473	9.0	46	22	
	$1.40-0i$	0.1032	0.1032	0	1	9.8	197	197	
	$1.55-0i$	0.1120	0.1120	0	1	9.7	823	823	
	$1.60-0i$	0.1133	0.1133	0	1	9.7	1183	1183	
	$1.40-0.07i$	0.0977	0.0642	0.0335	0.657	9.0	41	27	

2. 同一谱形下不同 m 值对消光、散射和吸收的影响

据表 5 看出,对于大陆性气溶胶 L 谱 n 值的变化对 σ_s 值有相当大的影响,产生成倍的变化;而海洋性气溶胶 M 谱则 n 值的变化对 σ_s 影响不大, κ 值的增大则均导致反照率的迅速减小。

五、10.6 μ 的消光特性

我们计算了不同气溶胶分布下大气红外窗区(8—13 μ)的消光特性,其中包括了 10.6 μ CO₂ 激光的情况。这里不作 8—13 μ 的系统分析,只就 10.6 μ 的消光特性作一简单分析。

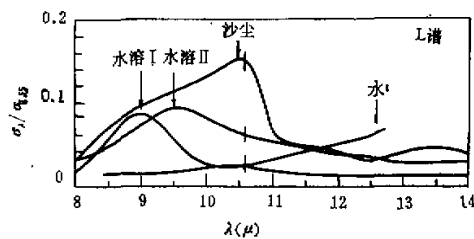


图 5 L 谱气溶胶对红外窗区段的消光

1. 10.6 μ 消光与能见度的关系

图 5、6 分别为 L、M 两种谱形四个 m 值计算所得 $\sigma_s/\sigma_{0.55}$ 的分布曲线。由于前面已

述 $\sigma_{0.55}$ 与能见度 S_0 之间有一个简单的关系, $\sigma_\lambda/\sigma_{0.55}$ 就可反映出 λ 波长消光值与水平能见度的关系。从图中可以看出两个明显的特点: (1) 对同一类气溶胶 L 与 M 两个谱形的谱消光比值具有极大的差异, L 谱的消光比值仅及 M 谱消光比值的 $1/2-1/4$; (2) 同一形不同 m 值的气溶胶, 其消光比值也有很大的差异。 10.6μ 水的消光比值仅为沙尘的 $\sim 1/3$ (L 谱) 到 $1/6$ (M 谱)。这两个特点与 0.6943μ 激光的消光特点差别极大, 造成的后果就是在同一水平能见度情况下, 由于气溶胶粒子的谱形与成分的不同, 10.6μ 激光的大气消光系数可能差异极大, 接近于有量级的变化。这一点给利用大气能见度来推算 10.6μ 衰减带来很大的不确定性。在同一能见度, 10.6μ 的消光值可能很小 (如象 L 谱水那样只及 $\sigma_{0.55}$ 的 0.02), 也可能会达到 0.55μ 消光值的 $1/3$ 那样大。

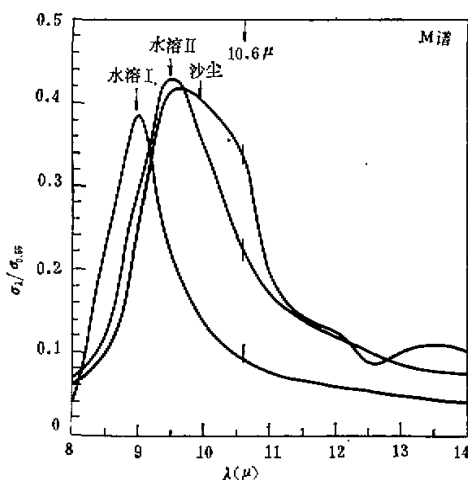


图 6 M 谱气溶胶对红外窗区段的消光

从物理上讲, 产生如此大变化范围的原因在于, 对 10.6μ 的红外光来说, 这两个气溶胶谱的大部分都处 $2\pi a/\lambda = x$ 值较小的范围, 即较接近于瑞利散射区。在该区域, 气溶胶的消光、散射和吸收对的粒子尺度和 m 值都是极为敏感的。由于我们所选模式均属于实际大气中可能出现的情况, 因此可以说实际大气中 10.6μ 激光的消光完全可能出现如此复杂的变化。

上述结果表明, 在确定 10.6μ 激光的消光时, 不能简单地凭水平能见度来作出有效的估计, 而必须掌握当时当地气溶胶谱型和 m 值的实际资料, 才能作出较符合实际的数值估计。因此, 在研究 10.6μ 等红外激光波长的消光时, 对于气溶胶谱型和成分的了解是一项十分必须的任务。

结 束 语

对三个激光波长在不同气溶胶粒子谱型和复折射指数情况下的消光理论计算表明, 0.6943μ 消光与能见度关系密切, 可以利用能见度值作出有效的估计。 1.06μ 则仅在海洋

性气溶胶情况下与能见度关系较为稳定,对大陆性气溶胶则稳定性稍差。至于 10.6μ 激光的消光则与能见度关系极不稳定,这是一个十分值得注意的特点,需要设法加以解决。

参 考 资 料

- [1] Van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*, 1957.
- [2] D. Deirmendjian, *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersion*, 1969.
- [3] В. Е. Зуев, *Распространение Видимых и Инфракрасных Волн в Атмосфере*, 1970.
- [4] F. E. Volz, *The Complex Index of Refraction of Aerosol from 0.2—40 μ* , "Conference on Atmospheric Radiation", 1972.
- [5] F. E. Volz, *Appl. Opt.* 1972, 11 (4).
- [6] Л. С. Излев и С. И. Попова. *Изв. АН СССР, сер. ФАО* 1973, 9 (10).
- [7] A. P. Waggoner et al., *Appl. Opt.* 1972, 11 (12).