

海雾对 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 红外辐射的衰减特性

饶瑞甲 宋正方

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽, 合肥)

摘要——分析了 Khrgian-Mazin 模型描述雾的粒度谱分布的可靠性, 利用该模型和米氏散射理论计算了世界上典型地区的海雾对 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 大气窗红外辐射的衰减, 并将计算结果和红外波段内的 $10.6\mu\text{m}$ 激光辐射在雾中衰减的实测结果相比较, 得出了两个大气窗内海雾对红外辐射衰减的一般规律。

关键词——红外辐射, 海雾, 大气衰减。

1. 引 言

红外辐射在雾中的衰减与散射特性的研究开展已久^[1~5], 但到目前为止, 这些工作尚不够完善, 主要表现为: 雾的种类少; 宽波段内取点少; 某些研究工作中使用的雾滴粒度谱分布的可靠程度较差。

理论上研究雾对红外辐射的衰减特性, 必须清楚地了解雾的物理性质, 但雾的产生、发展和消散的物理过程十分复杂, 粒度谱分布至今未能在理论上作出推断。尽管如此, 该领域的研究者已根据积累的雾的有关资料, 提出了一些有用的经验模型, 从而为我们研究红外辐射在雾中的衰减特性打下基础。

2. 雾滴粒度谱分布的 Khrgian-Mazin 模型

A. Kh. Khrgian 和 I. P. Mazin 提出的雾粒度谱分布模型现在已被广泛采用, 据此模型, 半径为 r 的粒子在单位体积、单位半径间隔内的粒子数 $n(r)$ 为^[6]

$$n(r) = ar^2 \exp(-br); \quad (1)$$

据此可求得粒子的三个重要物理量: 粒子密度 $N(\text{cm}^{-3})$, 平均半径 $\bar{r}(\mu\text{m})$ 和含水量 $W(\text{g}/\text{m}^3)$ 。

$$N = \int_0^{\infty} n(r) dr = 2a/b^3; \quad (2)$$

$$\bar{r} = \int_0^{\infty} rn(r) dr = 3/b; \quad (3)$$

$$W = \frac{4\pi}{3} \rho_{H_2O} \int_0^{\infty} n(r) r^3 dr = \frac{4\pi}{3} \rho_{H_2O} \cdot 5! a/b^6; \quad (4)$$

式(4)中, ρ_{H_2O} 为水的密度(10^6 g/m^3). 反过来通过测量 N 、 \bar{r} 和 W 就可确定模型参量 a 、 b :

$$a = \frac{27}{2} N/\bar{r}^3; \quad b = 3/\bar{r}. \quad (5)$$

在此模型下, N 、 \bar{r} 、 W 三量的关系为

$$W = 9.31 \times 10^{-6} N \bar{r}^3. \quad (6)$$

显然, 将实测的 N 、 \bar{r} 、 W 三个量的关系与式(6)相比较, 就可检验此种模型的可靠性.

表1列出了位于美国加州西海岸的范登堡空军基地历年海雾的平均特征^[7], 表中 W_c 就是将 N 、 \bar{r} 的值代入式(6)计算的结果, 可看出它与实测的 W 值较好地吻合, 从而证明 $K-M$ 模型是可靠的.

表1 范登堡空军基地海雾参数的平均值

Table 1 The average parameters of the sea fogs in Vandenberg AFB.

高度(m)	$\bar{r}(\mu\text{m})$	$N(\text{cm}^{-3})$	$W(\text{g/m}^3)$	$W_c(\text{g/m}^3)$
42	6.1	215	0.38	0.44
13	6.2	110	0.22	0.244
1.2	8.4	11	0.08	0.061

3. 各种海雾对红外辐射的衰减

我们选择美国加州西海岸范登堡空军基地和我国青岛地区以及世界其它若干地区典型的海雾作为研究对象, 表1~3列出了它们的参数^[7].

表2 青岛地区海雾的参数(1948)

Table 2 The parameters of the sea fogs in Qingdao district (1948).

日期	含水量 $W(\text{g/m}^3)$	雾滴半径 (μm)		雾滴浓度 (cm^{-3})	
		数 据	\bar{r}	数 据	N
1.31	0.44	8.8	6.75	154	154
4.18	0.12	9.6~24	9.08	32.4~2.07	17.2
5.23	0.01	4~8	3.71	37.4~4.67	21.0
6.10	0.30	60~120	55.85	0.33~0.04	0.185
7.10	0.76	152~304	65.92	0.51~0.06	0.285
8.3	0.04	8~16	7.42	18.69~2.34	10.5

表 3 世界若干地区海雾的参数

Table 3 The parameters of the sea fogs in several districts in the world.

地 区	$N(\text{cm}^{-3})$		$\bar{r}(\mu\text{m})$		$W(\text{g}/\text{m}^3)$	
	数 据	选定值	数 据	选定值	数 据	选定值
Roundhill	1.4~6.0	6	5~45	14.2*	0.095~0.222	0.16
落 石	1~22	22	2.5~10	10	0.1~0.8	0.20*
根 室	50~250	150	5~15	10	1.2~2.3	1.37*
法拉隆岛	45	45	1~5	4.37*	0.015~0.035	0.035
人 吉	2~4	4	15	15	0.1~0.2	0.126*
旭 川	460	460	—	4.6*	0.01~0.42	0.42

表 2 中 N 值是平均该量数据的上下限而求得, 而 \bar{r} 则利用 W 、 N 的值通过式(6)求得。表 3 中带“*”各量是当其它两量选定后, 用式(6)计算得到的。

由于雾粒子基本呈球形, 其半径一般处在 1~30 μm 的范围内, 可以用米氏散射理论来处理雾对 3~5 μm 和 8~14 μm 红外辐射的消光和散射。但严格的米氏解对实际计算十分不便, 而对于复折射率 $|m| = |n_1 - in_2| \rightarrow 1$ 的“软”粒子, 可以使用 Van de Hulst 给出的近似解。但是, 在中红外区上述条件不再满足, Deirmendijian^[9] 于是提出修正方法, 可使得 Van de Hulst 的近似公式适合于 $|m| < 2$ 的情况, 修正后的结果同“严格解”相比, 误差一般小于 4%^[9]。

我们在计算中引用了文献[10]所提供的两个红外窗区各个波长上水的折射率, 为了完整地反映这个区域内衰减规律的全貌共选取 45 个点进行了计算。

根据表 1~3 所列数据计算的各种海雾的衰减情况分别绘于图 1~3。图 1 中的数字表示观测海雾的高度。图 2 中的数字表示月份, 按照含水量的大小顺序为 7, 1, 6, 4, 8, 5, 可以看出 6, 7 两个月的雾雨与其它月份的衰减系数在图中是一直线, 即与波长无关。因为, 当雾雨的直径 $\gg \lambda$ 时, 消光截面 ($Q_{ext} \rightarrow 2$) 与波长无关, 因而衰减系数也与波长无关; 这和雨对红外辐射的衰减相似。6, 7 两个月显然违背了雾的衰减系数和含水量基本上有很好相关性的规律, 说明用雾滴的粒度谱分布来描述雾雨是不合适的。

为了检验计算方法的合理性, 我们以含水量为参照值, 将计算的 10.5 μm 处的衰减系数与文献[5]中 10.6 μm CO_2 激光辐射在雾中实测的衰减系数并列于表 4 进行比较, 从表 4 可以看出, 两者符合得比较好, 部分差别稍大些, 这可能说明仅用含水量作判据是不全面的。

从图 1~3 和表 4 我们可以看出, 海雾对 3~5 μm 和 8~14 μm 红外辐射的衰减具有以下规律:

(1) 衰减系数的大小同含水量密切相关, 总的来讲, 含水量越大, 衰减系数也越大。这是因为, 雾的液态水的比重是一定的, 含水量越大, 雾滴在总体积内的占空比也就越大, 所以对红外辐射的衰减也就增大了。

(2) 在 3~5 μm 和 8~14 μm 两个窗区, 衰减规律有显著的不同。在 3~5 μm , 衰减系数随波长的增大呈缓慢增大的趋势。而在 8~14 μm , 衰减系数随波长的变化显著, 而且衰

表 4 10.5 μm 处的衰减系数和 10.6 μm 激光在雾中的衰减系数实测值的比较
 Table 4 The calculated extinction coefficients at 10.5 μm compared with those measured at 10.6 μm CO₂ laser.

地 区	10.5 μm 计算值		10.6 μm 实测值	
	W (g/m ³)	α (km ⁻¹)	W (g/m ³)	α (km ⁻¹)
青岛(5月)	0.01	1.452	0.0154	9.258
法拉隆岛	0.035	5.099	0.0386	5.668
青岛(8月)	0.04	4.814	0.0396	5.829
范登堡(1.2m)	0.08	6.536	0.0802	11.797
青岛(4月)	0.12	13.16	0.1176	17.281
人吉	0.126	8.652	0.1257	18.479
Round hill	0.16	11.49	0.1590	23.364
落石	0.20	19.82	0.2181	32.051
范登堡(13m)	0.22	32.82	0.2200	32.350
范登堡(42m)	0.38	61.54	—	—
旭川	0.42	60.57	0.4357	64.032
青岛(1月)	0.44	56.71	0.4455	65.484
根室	1.37	135.1	—	—

减系数越大,变化也越显著.另一个显著特点是衰减系数在 11~11.5 μm 处达到极小值.造成这种现象的原因在于水的复折射率随波长的变化较为显著所致.

3. 不同地区或同一地区不同时期的雾,由于它们的各物理量明显不同,衰减情况明显不同.衰减系数可出现一个数量级的变化.

4. Khagian-Mazin 的经验模型能较好地描述雾滴的粒度谱的分布,但不适于雾雨,由于雾雨的半径较大,其衰减情况和雨相似.

为了更好地掌握海雾的衰减规律,需要积累更多的海雾资料;此外,对于浓度较大的雾,如用多次散射理论进行修正,可望获得更为完善的结果.

参 考 文 献

- [1] KURICK S. W., *J. OPT. SOC. AM.*, **50**(1960), 5:578.
- [2] SPENSOR D. E., *J. OPT. SOC. AM.*, **50**(1960), 5: 584.
- [3] KUMAI M. & RUSSELL J. D., 红外大气传输的研究,上海:上海科技情报研究所,1975, 65.
- [4] CHU T. S. & HOGG D. C., *BELL. SYS. TECH. J.*, **47**(1968), 5: 723.
- [5] CHIMELIS V., *APPL. OPT.*, **21**(1982), 3367.
- [6] BOROVNIKOV A. M. ET AL., *CLOUD PHYSICS*, JERUSALUM, 1963, 68.
- [7] 王彬华,海雾,北京:海洋出版社,1983, 246.
- [8] DEIRMENDIJIAN D., *ELECTROMAGNETIC SCATTERING ON SPHERICAL POLYDISPERSIONS*, AMERICAN ELSEVIER, NEW YORK, 1969, 128.
- [9] ZUEV V. E., *LASER BEAMS IN THE ATMOSPHERE*, CONSULTANS BUREAU, NEW YORK, 1982, 124.
- [10] HALE G. M. & QUERRY M. R. *APPL. OPT.*, **12**(1973), 3: 555.

ATTENUATION CHARACTERISTICS OF IR RADIATION OVER $3\sim 5\mu\text{m}$ AND $8\sim 14\mu\text{m}$ BY SEA FOGS

RAO RUIZHONG, SONG ZHENGFANG

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, He fei, Anhui, China)

ABSTRACT

The reliability of the Khragian-Mazin Model for characterizing the size distribution of fogs is analysed. With the model, the attenuation of IR radiation over $3\sim 5\mu\text{m}$ and $8\sim 14\mu\text{m}$ by the typical fogs in several districts in the world is calculated on the basis of the Mie theory. Comparing the results with those measured with $10.6\mu\text{m}$ CO_2 laser radiation, some characteristics of the attenuation are given.