

文章编号 1005-0388(2003)01-0043-05

沙尘暴对低层大气红外辐射的 吸 收 和 衰 减^①

李曙光 刘晓东 侯蓝田

(燕山大学红外光纤与传感研究所,河北 秦皇岛 066004)

摘 要 根据 Mie 散射理论用数值法研究了沙尘粒子对大气红外辐射的散射、消光和吸收效率,揭示了不同粒径的沙尘粒子在不同红外辐射波段消光和吸收的特点。考察了三种典型的沙尘天气—浮尘、扬沙和沙尘暴时沙尘对红外辐射的吸收系数和消光系数,得出了沙尘暴天气对红外辐射具有显著的吸收和衰减特别是对于 $\lambda = 2 \sim 2.6\mu\text{m}$ 和 $\lambda = 3 \sim 5\mu\text{m}$ 这两个红外大气窗口的衰减最严重的结论。

关键词 沙尘,散射,消光,吸收,红外辐射

中图分类号 TN011

文献标识码 A

The absorption and extinction of infrared radiation in lower atmosphere by sand storm

LI Shu-guang LIU Xiao-dong HOU Lan-tian

(Institute of infrared optical fibers and sensors, Yanshan University,
Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract In this paper, the scattering, extinction and absorption efficiency of sand dust is investigated for the infrared radiation in atmosphere on the basis of the Mie theory. It is showed from the numerical results that the extinction and absorption of the sand particle with various sizes are different in band of infrared radiation, and the absorption and extinction coefficient of the sand aerosol are calculated for three representative sand weathers, i. e. light dust, sand blowing and sand storm. It is concluded that there are remarkable absorption and attenuation in the band of infrared radiation for the weather of sand storm, especially for the cases of $\lambda = 2 \sim 2.6\mu\text{m}$ and $\lambda = 3 \sim 5\mu\text{m}$.

Key words sand and dust, scattering, extinction, absorption, infrared radiation

1 引 言

红外辐射在大气中的衰减受到了人们的重视,在晴朗的天气已经能够利用气象参数比较科学地预计红外辐射的大气传输特性^[1],降雨对红外辐射的衰减也有人进行过比较系统的研究^[2],但是人们对于特殊天气条件,特别是近年来沙尘暴的肆虐对红外辐射传输特性的影响研究很少,而对于沙尘暴性

质以及在沙尘天气各种红外探测仪的工作性能和工作环境的研究迫切需要这方面的定量数据。另外,大气沙尘通过散射、吸收太阳辐射和吸收、发射红外辐射直接影响地-气系统的辐射能收支,从而影响区域或全球的气候及生态环境。本文通过数值法研究了近红外和中红外波段电磁波所受沙尘粒子的散射和衰减特性。

2 理论基础

Mie 散射理论是适用于球形粒子散射的经典理论,空气中的沙尘粒子可以近似地以球形粒子处理(实际测量表明沙尘粒子中有 50% 左右是球形粒子,采用等容球方法处理,仍可借用 Mie 理论进行计算),沙尘粒子对红外辐射的吸收和衰减可以用吸收效率因子 Q_{abs} 和消光效率因子 Q_{ext} 来表示。

下面简要地给出相关的 Mie 公式^[3],假设球形粒子的直径为 D ,入射光波长为 λ ,粒子的复折射率为 $n = n_r + in_i$,单粒子的散射截面 σ_{sca} 可以表示为:

$$\sigma_{sca} = \lambda^2/2\pi \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) \{ |a_m|^2 + |b_m|^2 \} \tag{1}$$

其中 a_m 和 b_m 是 Mie 系数

散射截面与相应的粒子几何截面之比为无量纲的散射效率因子(Q_{sca}):

$$Q_{sca} = 2/\alpha^2 \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) \{ |a_m|^2 + |b_m|^2 \} \tag{2}$$

其中 $\alpha = \pi D/\lambda$ 。类似地,利用散射截面与相应的粒子几何截面之比可得粒子的消光效率因子 Q_{ext} :

$$Q_{ext} = 2/\alpha^2 \text{Re} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) [a_m + b_m] \tag{3}$$

吸收效率因子为消光效率因子与散射效率因子之差:

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca} \tag{4}$$

实测结果表明^[4],一些分散性和凝集性气溶胶都遵从对数正态分布。另外通过对固体微粒破裂的过程特性的假设出发,可以得到微粒大小的分布渐近地趋向对数正态分布的结论^[5],即:

$$P(D) = (1/\sqrt{2\pi}\eta D) \exp\{-(\ln D - \delta)^2/2\eta^2\} \tag{5}$$

其中 δ 和 η 分别为 $\ln D$ 的平均值和标准方差。

考虑到沙尘粒子的尺寸分布,波长为 λ 、强度为 I_0 的辐射通过距离为 L 的介质后,根据 Bouguere 定律其强度 I 可写成^[6]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\int_0^L \sigma(\lambda) dl\right] \tag{6}$$

其中 σ 为消光系数,它表示了粒子系统的消光能力,即对辐射的衰减能力。对于球形粒子可由下式计算:

$$\sigma(\lambda) = \int_0^{\infty} \pi D^2 Q_{ext} N(D) dD \tag{7}$$

相应地,可以定义粒子系统的吸收系数 σ_a ,它表示由于吸收而引起辐射衰减的能力:

$$\sigma_a(\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{1}{4} \pi D^2 Q_{abs} N(D) dD \tag{8}$$

$N(D)$ 为粒子的尺度谱分布:

$$N(D) = N_0 \times P(D) \tag{9}$$

N_0 表示沙尘粒子的浓度,即单位体积中的沙尘粒子数。有时习惯以每千米衰减的分贝数表示其衰减程度,沙尘粒子在单位距离上所引起的信号衰减 A (dB/km) 为:

$$A = 0.004343 \int_0^{\infty} \frac{1}{4} \pi D^2 Q_{ext} N(D) dD \tag{10}$$

3 数值模拟与分析

风沙天气通常分为浮尘、扬沙和沙尘暴三种天气状态。浮尘天气是由于高空中的风力较大,从其它地方携带来颗粒较细小的细沙、粉尘等物质所形成,其能见度通常大于 10km;扬沙天气是指风速大于或等于起风沙速(一般确定为 5m/s),水平能见度小于 10km 的天气,能形成离地一定高度上的沙尘粒子的跃移、悬浮和漂移,这也是沙漠中最常发生的风沙天气,沙尘暴是指在大风(风速大于 17.2m/s)的作用下,地面沙尘被吹起形成空中相当高的浓度,造成水平能见度低于 1km。为了研究具有代表性,本文采用牛生杰等在 1996 年、1997 年和 1998 年连续三个春季对吉兰泰(腾格里沙漠)、盐池(毛乌素沙漠)和阿拉善右旗(巴丹吉林沙漠)的测量结果^[7],将他们在不同的地点和时间所得三种沙尘天气沙尘气溶胶质量浓度的测量数据求平均值。分别得到浮尘、扬沙和沙尘暴天气的气溶胶质量浓度的粒径分布(认为这些数据能够代表一般的浮尘、扬沙和沙尘暴天气),并进一步根据公式将其转化成粒子数浓度的粒径分布^[8],通过曲线拟合得到对数正态分布中的参数 δ 和 η 值,结果如表 1 所示。沙尘粒子的复折射率^[9]对于 $\lambda = 3 \sim 5\mu\text{m}$ 为 $1.25 - 0.016i$ 、对于 $\lambda = 8 \sim 14\mu\text{m}$ 为 $1.62 - 0.105i$,沙尘粒子在其它波长范围的复折射率用最小二乘曲线拟合得到。下面对沙尘粒子的单粒子吸收效率 Q_{abs} 和消光效率 Q_{ext} 以及考虑粒度分布的消光系数 σ 、吸收系数 σ_a 和信号衰减 A 进行数值模拟。

3.1 单粒子散射、消光和吸收效率的数值模拟和分析

图 1 表示了沙尘粒子对波长为 $10\mu\text{m}$ 的红外辐射的单粒子散射、消光和吸收效率随粒径的变化规

律 图 2 给出了从 $3\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 的几种典型波长的红外辐射的消光效率随粒径的变化规律。从图 1 中可以看出 随着粒径的增大散射和消光效率因子会增大到一个峰值 然后开始下降并有小的波动 消光效率因子随粒径的增大趋向于 2。散射和吸收对消光的贡献随着粒径的增大经历如下一个过程 即 (一) 吸收效率因子大于散射效率因子 (二) 散射效率因

子大于吸收效率因子 (三) 散射和吸收差不多。从图 2 可以看出随着辐射波长的增大粒子消光效率的峰值向粒径增大的方向移动 且对于红外大气窗口消光效率的峰值位于沙尘粒径 $5 \sim 15\mu\text{m}$ 之间 说明对于红外辐射 $5 \sim 15\mu\text{m}$ 这一粒径范围的沙尘粒子的消光效率最大。

表 1 三种不同类型沙尘天气气溶胶浓度的粒径分布

粒径范围(μm)	<0.43	~0.65	~1.1	~2.1	~3.3	~4.7	~5.8	~9.0	>9.0	合计
浮尘 : $\delta = -7.70, \eta = 0.790$										
质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	32.3	26.1	33.1	68.3	69.0	51.7	30.0	37.0	58.3	406.6
粒子数浓度($10^6/\text{m}^3$)	292.8	150.5	75.9	28.5	5.37	1.04	0.21	0.12	0.06	554.5
粒子数浓度百分比	52.8	27.2	13.7	5.14	0.97	0.19	0.038	0.022	0.010	100
扬沙 : $\delta = -7.68, \eta = 0.890$										
质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	67.3	68.1	83.0	192.5	151.3	169.0	105.5	185.0	178.0	1199.4
粒子数浓度($10^6/\text{m}^3$)	609.6	392.1	190.5	80.3	11.8	3.39	0.732	0.617	0.170	1289.2
粒子数浓度百分比	47.3	30.4	14.8	6.23	0.914	0.263	0.057	0.048	0.013	100
沙尘暴 : $\delta = -7.48, \eta = 0.995$										
质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	159.3	162.1	210.6	333.9	256.2	276.3	250.0	307.5	708.4	2745.8
粒子数浓度($10^6/\text{m}^3$)	1301.0	934.6	482.7	229.3	39.94	15.541	11.74	8.03	6.678	3029.5
粒子数浓度百分比	42.9	30.8	15.9	7.57	1.32	0.513	0.388	0.265	0.22	100

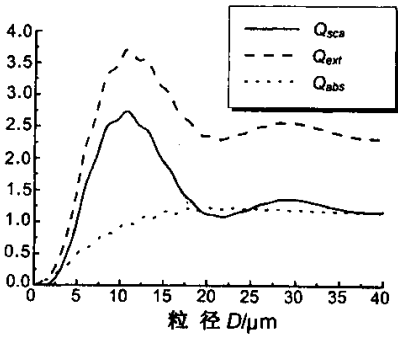


图 1 波长 $\lambda = 10\mu\text{m}$ 时沙尘粒子的散射、消光和吸收效率

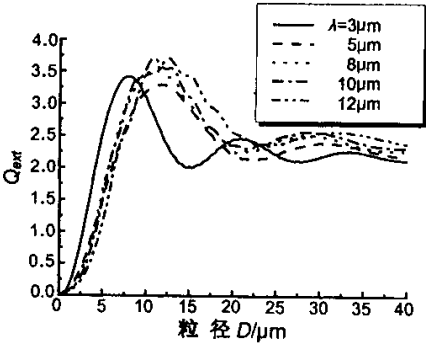


图 2 几种典型波长情况下沙尘粒子的消光效率

图 3 给出了粒径为 $8\mu\text{m}$ 的沙尘粒子的散射、消光和吸收效率随波长的变化。从图中可以看出对于粒径为 $8\mu\text{m}$ 的粒子的两个消光(或散射)峰值恰好位于红外辐射的三个典型大气窗口 $2 \sim 2.6\mu\text{m}$ 、 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 这说明粒径为 $8\mu\text{m}$ 左右的粒子对于这三个红外大气窗口单粒子消光(或散射)效率最高 图 4 给出了几种典型粒径下消光效率随波长的变化。从图中可以看出随着沙尘粒径的增大 单粒子

消光效率的峰值向长波方向移动 并且当粒径和辐射波长的尺度差不多时单粒子消光效率最高。

3.2 三种典型沙尘天气对红外辐射的吸收和衰减

图 5 给出了对于沙尘暴天气时考虑粒度分布的消光系数 σ 和吸收系数 σ_a 的数值模拟结果 从中可以得出 沙尘暴天气时消光系数和吸收系数的峰值位于 $\lambda = 2 \sim 2.6\mu\text{m}$ 这个红外大气窗口 并且消光系数可以达到 13.3km^{-1} 在这一波长范围吸收系数也

可达到 5.5 km^{-1} , 这里吸收对消光的贡献也比较大; 在 $\lambda = 3 \sim 5 \mu\text{m}$ 消光系数仍然比较大, 可达 12 km^{-1} , 而在 $\lambda = 8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的红外大气窗口, 其消光系数下降为 7 左右, 吸收系数下降为 3 左右。随着波长的继续增大消光和吸收系数减小, 并且消光系数比吸收系数下降的要快。图 6 给出了三种不同类型天气沙尘气溶胶的消光系数随辐射波长的变化结果, 可以看出三种天气情况的消光系数对于 $\lambda = 2 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 3 \sim 5 \mu\text{m}$ 都要比 $\lambda = 8 \sim 12 \mu\text{m}$ 大, 消光

系数按照沙尘暴、扬沙、浮尘的次序依次下降, 并且扬沙和浮尘天气的消光系数要比沙尘暴小的多。

本文进一步对三种不同类型沙尘天气沙尘溶胶的信号衰减系数 A 进行了数值模拟, 衰减系数 A 随波长变化的曲线与图 6 相似(在这里不再给出), 对于本文所采用的沙尘暴天气时的粒子分布数据, 第一个大气窗口的信号衰减 A 可以达到 55 dB/km , 但强沙尘暴天气时, 沙尘粒子浓度更高, 大尺寸粒子所占的比例增大, 对红外辐射的衰减将更为严重。

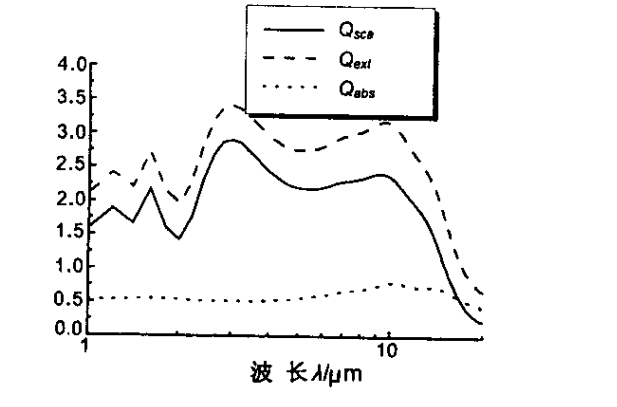


图3 粒径 $D=8 \mu\text{m}$ 时粒子的散射、消光和吸收效率随波长的变化

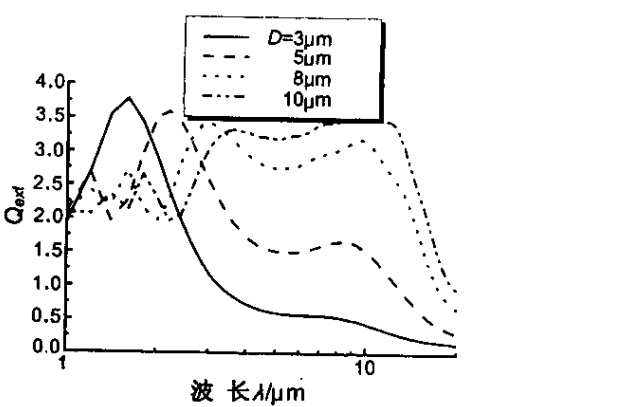


图 4 几种典型粒径下消光效率随波长的变化

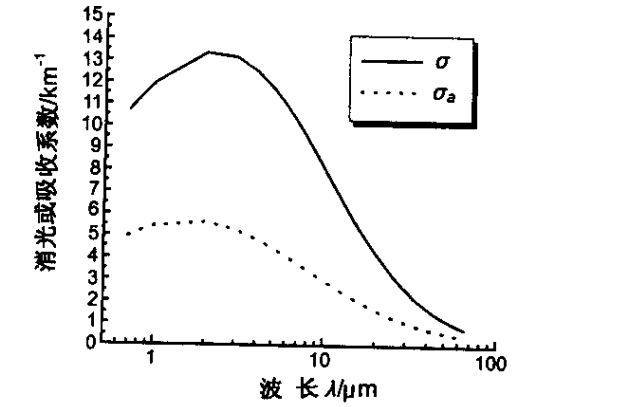


图 5 沙尘暴天气时的消光系数和吸收系数随辐射波长的变化

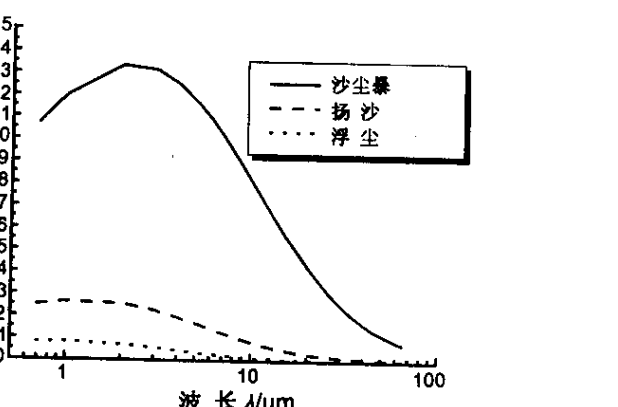


图 6 三种不同类型沙尘天气沙尘气溶胶的消光系数随辐射波长的变化

从单粒子散射、消光和吸收效率的数值模拟结果可知, 粒子的散射或消光峰值应出现在粒径与波长大小差不多的位置, 并且粒径比波长小很多时粒子的吸收效率比散射效率高, 而本文所模拟的粒子系统具有这样的特点: 粒径小于 $1.1 \mu\text{m}$ 的粒子浮尘天气占 93.7% 、扬沙天气占 92.5% 、沙尘暴天气占 89.6% , 这一尺寸范围的粒子对红外辐射的吸收起到了重要的作用, 所以才会出现图 5 所示的显著的吸收系数的结果, 沙尘暴天气比扬沙和浮尘天气时

的消光和吸收系数大很多, 沙尘暴天气的消光系数是扬沙天气的 5 倍, 是浮尘天气的 15 倍, 究其原因一方面是由于沙尘暴天气粒子浓度显著增大, 另一方面由于沙尘暴天气粒径较大的沙尘粒子所占的比例也明显增大, 这也与单粒子消光效率的模拟结果: $5 \sim 15 \mu\text{m}$ 粒径范围的沙尘粒子的消光效率最大相一致。总的说来, 沙尘天气、特别是沙尘暴天气对红外辐射的衰减和吸收是显著的。对于强沙尘暴天气, 沙尘粒子的浓度会更大, 较大粒径的沙尘粒子所占

的比例会进一步上升,沙尘暴对红外辐射的衰减会更加显著。沙尘暴对于各种红外探测仪的工作性能和工作环境的影响已经不容忽视,另外沙尘对红外辐射的散射和吸收直接影响到了地-气系统的辐射能收支,从而影响区域或全球的气候及生态环境。

4 结论

本文对沙尘粒子的单粒子散射、消光和吸收效率进行了数值模拟,研究了不同粒径的沙尘粒子在不同红外辐射波长情况下的消光和吸收的特点。同时对三种典型的沙尘天气—浮尘、扬沙和沙尘暴时对红外大气窗口辐射的吸收系数和消光系数以及信号衰减进行了计算,得出了沙尘暴天气对红外辐射具有显著的吸收和衰减的结论,其衰减的峰值位于 $\lambda = 2 \sim 2.6\mu\text{m}$ 和 $\lambda = 3 \sim 5\mu\text{m}$ 这两个大气窗口。本文对研究沙尘暴引起红外探测仪性能的变化及其对局部地区气候的影响具有一定的指导意义。

参考文献

[1] Kneizys F X, et al.. User's guide to lowtran 7[M]. AFGL-TR88-0177, Bedford MA, 1988.

[2] 魏合理,刘庆红,宋正方等. 红外辐射在雨中的衰减[J]. 红外与毫米波学报,1997,16(6):418~424.

[3] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. (New York:John Wiley, 1983),

Chap. 5.

[4] 董庆生,赵振维,丛洪军. 沙尘引起毫米波衰减[J]. 电波科学学报,1996,11(2):29~32.

[5] H A øyke 著,顾震潮等译. 气溶胶力学[M]. 北京:科学出版社,1960.

[6] 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京:气象出版社,1990,12.

[7] 牛生杰,孙继明,陈跃等. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. 高原气象,2001,20(1):82~87.

[8] 董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性[J]. 电波科学学报,1997,12(1):15~25.

[9] 黄培强,盛夏. 对流层与平流层大气气溶胶粒子的若干散射特性[J]. 气象科学,1996,16(3):233~239.

李曙光 (1968-),男,山西人,燕山大学理学院副教授,2000年在吉林大学获理学硕士学位,在读博士生,主要研究方向为非均匀介质中的电磁波理论和光子局域化。

刘晓东 (1968-),男,河北人,2002年1月在燕山大学获得博士学位,主要研究方向为光子晶体和光子定域化。

侯蓝田 (1939-),男,吉林人,教授,博士生导师,从1986年开始连续15年为国家“863”新材料领域的项目“传输激光能量光纤研究”的课题负责人,国家经贸委创新基金项目,国家中小企业创新基金项目,河北省重点基金等项目负责人。