

文章编号:1001-5078(2010)01-0051-06

· 红外技术 ·

水云从紫外到远红外波段的平均单次散射特性

刘 强¹, 陈秀红², 何晓雄¹, 魏合理²

(1. 合肥工业大学应用物理系, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要:水云出现在对流层的中下层, 一般由球形液态水滴组成, 是陆地大气太阳辐射通量的重要调节者之一。水云的散射特性在气候模式、辐射传输和遥感领域都具有非常重要的应用。利用 Mie 理论首先计算了不同大小的单个水云粒子的单次散射特性。再根据 90 种实际观测的水云粒子尺度谱分布, 建立了一个水云在光学波段(紫外到远红外)的平均散射特性数据库。利用这个数据库, 分析了 8 种常用的典型水云的单次散射特性分布, 以及在可见到近红外、中波红外和长波红外三个波段的平均透过率特性。

关键词:水云; 单次散射特性; 有效半径; 尺度谱分布

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A

Mean spectral scattering properties of water clouds from wavelength of ultraviolet to far-infrared region

LIU Qiang¹, CHEN Xiu-hong², HE Xiao-xiong¹, WEI He-li²

(1. Department of Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Key Lab. of Atmospheric Compositions and Optical Radiation, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The water clouds, which are mainly composed of spherical liquid water droplets, are commonly found in the middle troposphere and lower troposphere. They have a major impact on solar radiation flux. Scattering properties of water clouds are important to climatic model, radiative transfer, remote sensing and so on. Single scattering properties of single water cloud particle are calculated by using Mie theory. Then, the database of mean single-scattering properties from ultraviolet to far-infrared are built up based on 90 kinds of particle size distributions according to actual observation. In addition, the mean single scattering properties and extinction properties in visible to near infrared, middle infrared and long infrared wave bands of 8 typical water clouds are analyzed.

Key words: water clouds; scattering properties; effective radius; size distribution

1 引 言

大气中经常出现的中低云一般都是水云, 它对大气中的辐射传输有重要的影响, 云作为大气成分常年覆盖着地球, 云的频繁出现就决定了它是地气系统的主要调制者, 它可以造成能见度减小, 也可以减弱探测器、遥感装置的探测能力。研究水云的光学特性对低层大气的辐射传输和遥感、气候模式计算等方面具有重要的意义。

在研究单个粒子的水云的散射特性方面, 有研究人员对水云在可见光波段和红外波段提出了不同的近似计算表达式^[1-2], 虽然对水云的近似在红外波段效果非常好, 但是在短波段消光效率因子和吸

收效率因子随波长和粒子尺度都有较强的振荡特性, 参数化的近似计算带来较大的误差。实际大气中, 水云是由一系列大小不等的粒子群组成的, 它的散射特性与水云的云滴谱有关, 即由单个粒子的散射特性按云滴尺度谱分布加权平均得到水云的平均散射特性。王宏七等^[3-4]将太阳短波段 0.2 ~ 0.4 μm 和长波 3.333 ~ 1000 μm 分成不同的窄带和宽带, 用实际观测的 124 个水云尺度谱分布计算各

基金项目: 中国科学院合肥物质科学研究院青年人才基金资助。

作者简介: 刘 强(1977 -), 男, 硕士, 主要从事应用物理方面的研究。

收稿日期: 2009-05-05; 修订日期: 2009-07-13

个带的水云的光学性质,并对光学性质参数化。这种带模式的水云的光学性质对用在中等分辨率及高分辨率的辐射传输计算中时,显然计算精度不会较高。

本文基于 Mie 散射理论,利用 Wiscombe 的 MIEVO 程序^[5],计算了水云中不同大小单个粒子在紫外到远红外各个波长上的单次散射特性,包括消光效率因子、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数,并根据实际观测资料拟合到的 90 种尺度谱分布对水云的单次散射特性进行平均,建立一个水云从紫外到远红外的平均单次散射特性随有效半径变化的数据库。运用这个数据库,根据 8 种典型水云

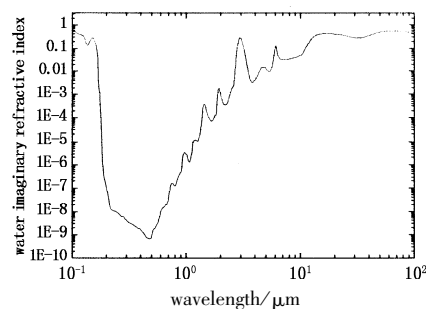
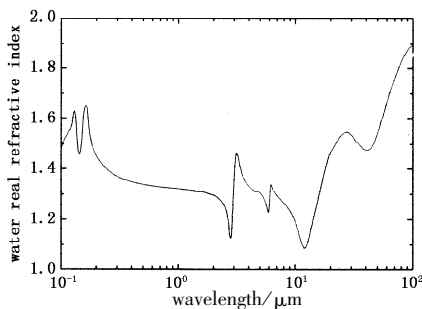


图1 水云的复折射率

Fig. 1 the complex refractive index of water cloud

根据水云的复折射率,应用 MIEVO 程序,我们计算了水云的单次散射特性,包括消光效率因子、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数。波长范围覆盖紫外到远红外(0.2 ~ 100 μm),粒子的半径从 1 ~ 150 μm 。计算散射相函数时,把 $0^\circ \sim 180^\circ$ 不等间距地分为了 498 个离散的角度,使得

的有效半径利用插值法得到它们的单次散射特性,分析和讨论了它们在不同波段上的平均透过率特性。水云的这些散射特性数据可在中等分辨率的云中辐射传输计算、气候模式和遥感应用等研究领域得到广泛应用。

2 水云单次散射特性计算

水云的单次散射特性包括消光效率因子、散射效率因子、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数等。这些参数与水云的复折射率和尺度参数($x = 2\pi r/\lambda$)有关。图 1 是 Segelstein 于 1981 年计算得到的水云的复折射率,我们在计算中取光波波长为 0.2 ~ 100 μm 。

可以完全地显示 Mie 相函数的弯曲和起伏状况,也可以很好地表示散射的前向和后向峰。图 2 是在 5 个不同水云粒子半径时,消光效率因子、单次散射反照率和不对称因子随波长的分布,以及 2.7 μm 波长不同粒子半径下的散射相函数随角度的分布。

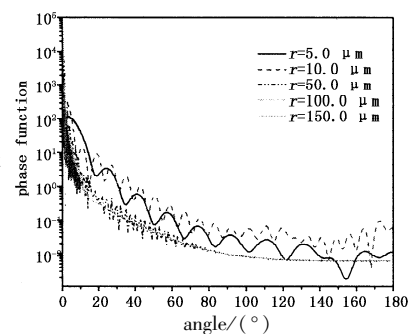
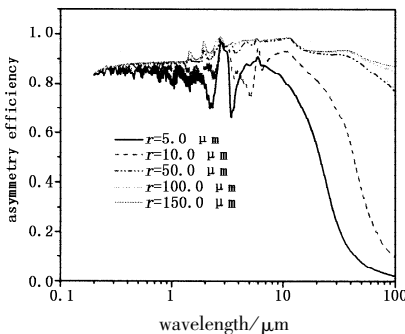
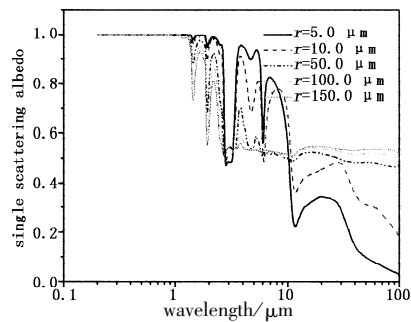
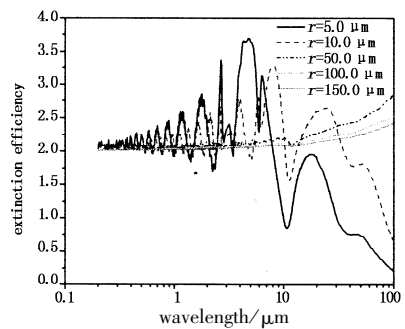


图2 水云单次散射特性分布

Fig. 2 the single-scattering properties of water clouds

从图 2 可以看出,在波长小于 10 μm 时粒子的消光效率因子、单次散射反照率和不对称因子迅速变化,0.2 ~ 0.9 μm 的紫外可见光和近红外波段,单次散射反照率都接近 1,并且不随粒子大小变化,因为该波段水的折射率虚部都很小(小于 10⁻⁷),不对称因子在 0.7 以上;在大于 100 μm 趋于平缓,散射相函数也迅速减小,这是因为水云的单次散射特性与水云的复折射率有关(如图 1 所示),这也可以说明粒子半径计算到 100 μm 足以描述水云的光学特性。当粒子半径增大时,消光效率因子逐渐向 2.0 靠近,单次散射反照率逐渐增大,不对称因子逐渐趋近于 1.0,散射相函数逐渐变得平滑,与 H - G 相函数较接近。

3 水云的平均单次散射特性

通常水云是由粒子半径大小不一的粒子群组成的,因此,实际使用时需考虑水云的粒子谱分布 $n(r)$,由单个粒子的单次散射性质根据下面的公式得到水云的平均单次散射性质。

$$\text{平均消光效率因子: } \langle Q_e \rangle = \frac{\int_0^\infty Q_e n(r) dr}{\int_0^\infty n(r) dr} \quad (1)$$

$$\text{平均单次散射反照率: } \langle \omega \rangle = \frac{\int_0^\infty Q_s n(r) dr}{\int_0^\infty Q_e n(r) dr} \quad (2)$$

$$\text{平均不对称因子: } \langle g \rangle = \frac{\int_0^\infty g Q_s n(r) dr}{\int_0^\infty Q_s n(r) dr} \quad (3)$$

$$\text{平均相函数: } \langle P(\Theta) \rangle = \frac{\int_0^\infty P(\Theta) Q_s n(r) dr}{\int_0^\infty Q_s n(r) dr} \quad (4)$$

图 3 是根据国内外实际观测资料总结拟合得到的水云滴谱分布,其中图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)分别是运用修正的伽马分布、对数正态分布拟合、半对数正态分布拟合的结果,共 90 种尺度谱分布。根据有效半径的定义:

$$r_e = \frac{\int_0^\infty r^3 \cdot n(r) dr}{\int_0^\infty r^2 \cdot n(r) dr} \quad (5)$$

所以一种尺度谱分布对应于一个有效半径。经计算,这些有效半径在 3 ~ 40 μm 之间,具有广泛的代表性。

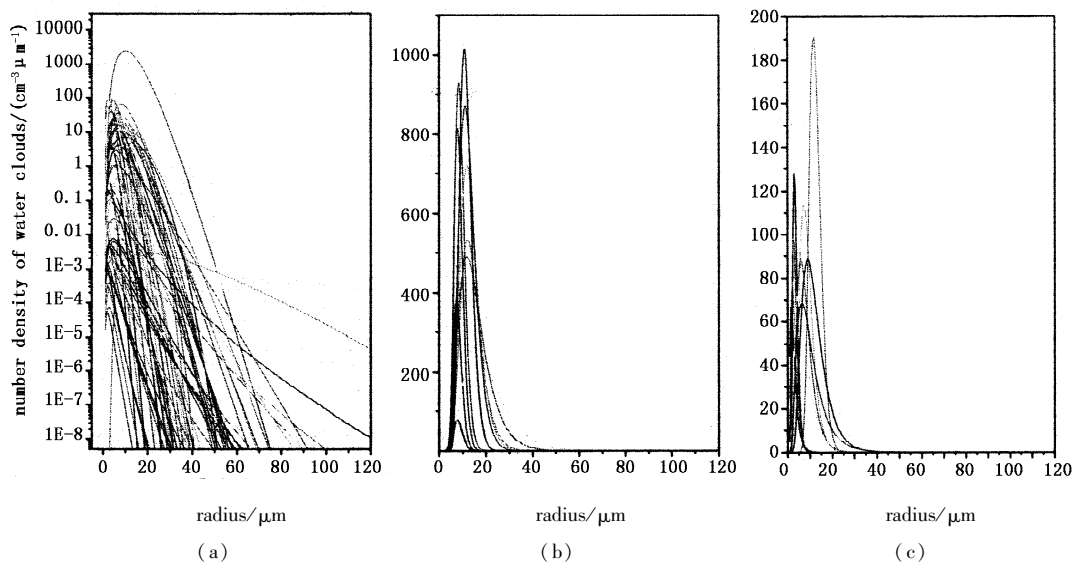


图 3 实际观测的水云尺度谱分布

Fig. 3 water cloud size distribution according to actual observation

利用水云的单次散射特性和尺度谱分布,根据上面的计算公式,我们建立了一个紫外到可见光波段各个波长上的水云的平均单次散射特性数据库。图 4 是水云的平均消光效率因子、单次散射反照率和不对称因子与有效半径的比值随有效半径的分布,以及不同有效半径时的平均散射相函数分布。

分析图 4 可以看到,水云的单次散射性质与有效半径的比值随有效半径的分布曲线非常光滑,这一特点为水云的单次散射性质参数化提供了方便。在中等或高分辨率的辐射传输计算中直接用参数化的结果进行计算有助于提高计算速度。散射相函数在不同的有效半径情况下随角度的分布几乎一致。

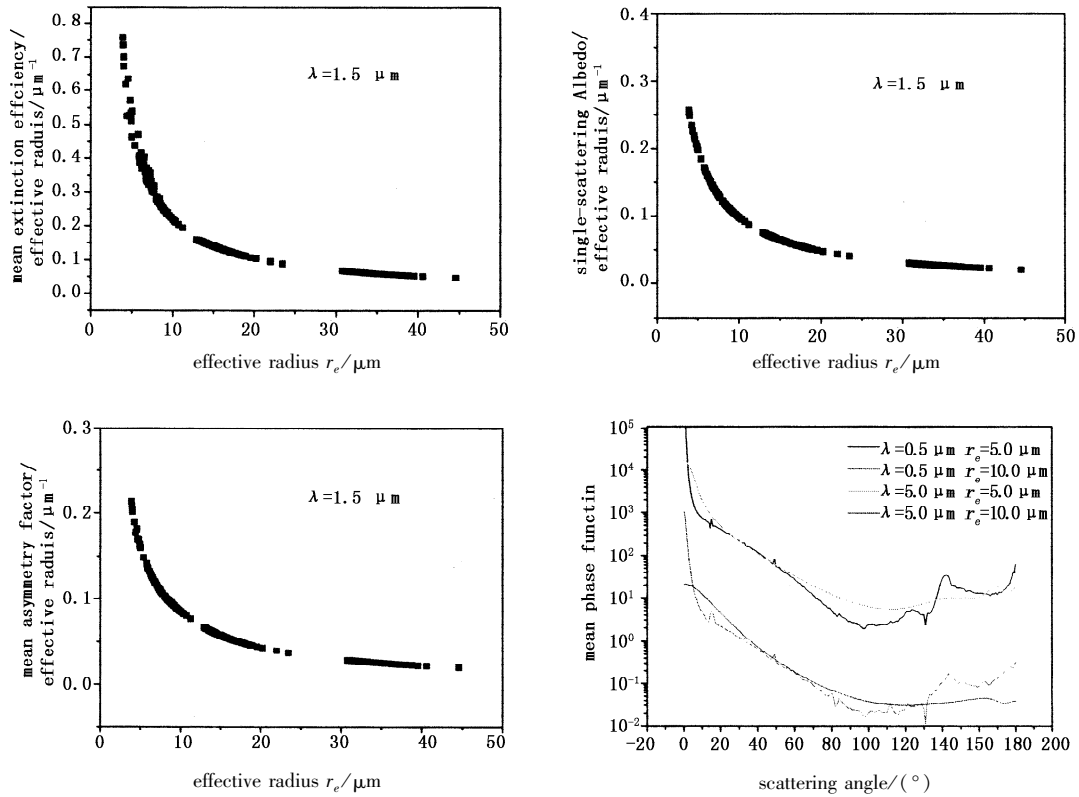


图4 水云的平均散射特性随有效半径的分布

Fig. 4 mean scattering properties of water clouds versus effective radius

4 平均单次散射特性数据库的应用

天空中常见的几种水云按其结构特点可以分为高层云、层积云、层云、雨层云、积云和积雨云。本小节以这几种水云为例,分析了它们的平均单次散射特性,以及这几种水云在不同波段上的平均透过率特性。

云。其中, I 代表陆地上空, II 代表海洋上空。经计算,它们的有效半径分别为:5.69,6.00,5.14,9.9,9.91,5.83,11.4,29.15 μm 。

根据常见的8种水云的滴谱分布的有效半径,用插值法从上述建立的水云平均单次散射特性数据库中得到它们的平均单次散射特性,结果如图6所示。

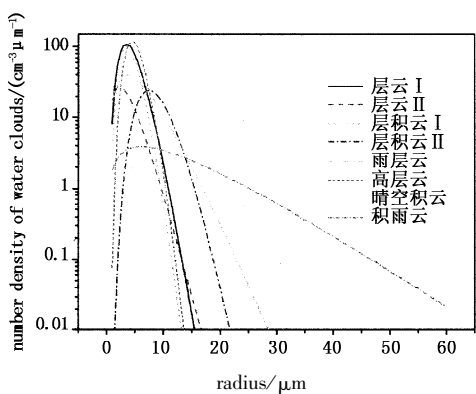


图5 8种典型水云的滴谱分布

Fig. 5 the droplet size distribution of eight kinds of typical water clouds

图5是根据文献[6]和[7]总结得到的常见的8种水云的云滴谱分布,分别是层云 I、层云 II、层积云 I、层积云 II、雨层云、高层云、晴空积云和积雨

云。从图6可以看出,8种典型水云的单次散射反照率、不对称因子、相函数以及消光效率因子随波长的变化趋势基本一致,但其数值大小在红外波段有明显的差别,引起这些差别的部分原因是粒子的光子隧道效应带来的^[8-9]。另外也可以看到,积雨云在大于20 μm 后,它的散射特性(消光效率因子、单次散射效率因子、不对称效率因子和散射相函数)值基本高于其他几种类型水云的值,其次是晴空积云、雨层云、层积云 II,再是高层云、层云 I、层积云 I 和层云 II,它们的排序顺序与水云的液态含水量大小顺序相同。从图5中也可以看出积雨云的尺度谱分布中大液滴粒子占的比重较大。

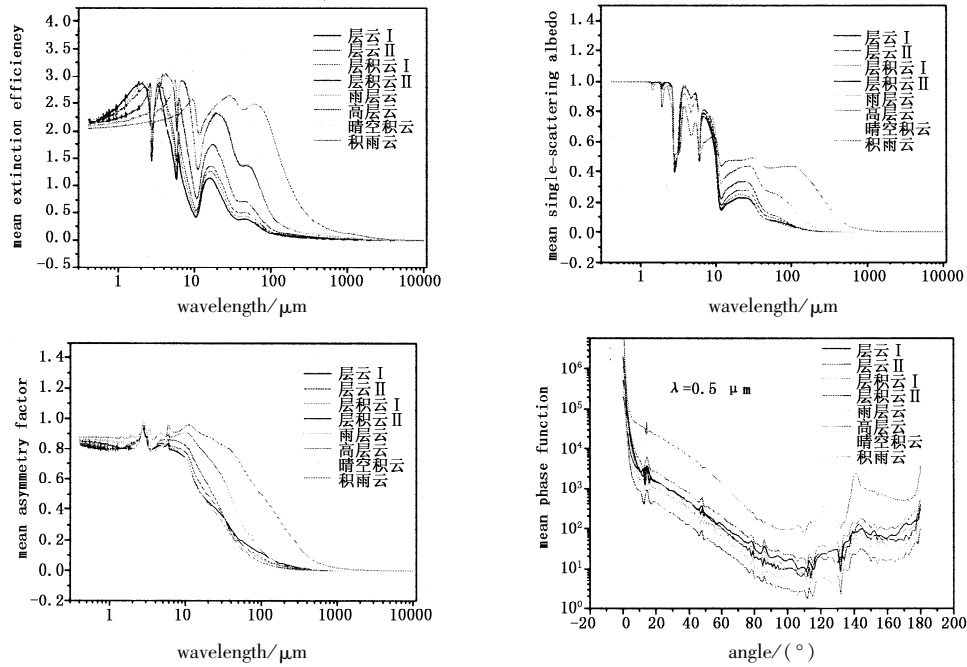


图 6 8 种典型水云的平均单次散射特性

Fig. 6 mean single-scattering properties of 8 kinds of typical water clouds

根据这些水云的衰减效率因子和尺度谱分布,我们计算了各种水云在可见光到近红外波段(波段 I:0.4~0.8 μm)、中红外波段(波段 II:3~5 μm)、长波红外波段(波段 III:8~12 μm)的平均透过率随云厚度的变化情况。计算结果如图 7 所示。同时还将水云的衰减特性和冰云(卷云)的衰减特性作了比较,其中卷云衰减系数设为 $0.14 \times L \text{ km}^{-1}$, L 表示云的厚度^[10]。很明显,随着云层厚

度的增加,各种水云的平均透过率迅速减小,当云厚度达到 100 m 时,云的透过率只有 $10^{-2} \sim 10^{-4}$,接近 0.0,而卷云的平均透过率随云厚衰减较慢,当云厚达到 1000 m 时才衰减了 10%。各种水云在波段 I 和 II 的平均透过率差异几乎相同,在波段 III,差异稍微大些。对波段 III,若设定 1% 的透过率阈值,雨层云在 35 m 云厚时平均透过率就接近 1%,而晴空积云在 125 m 云厚时平均透过率才接近 1%。

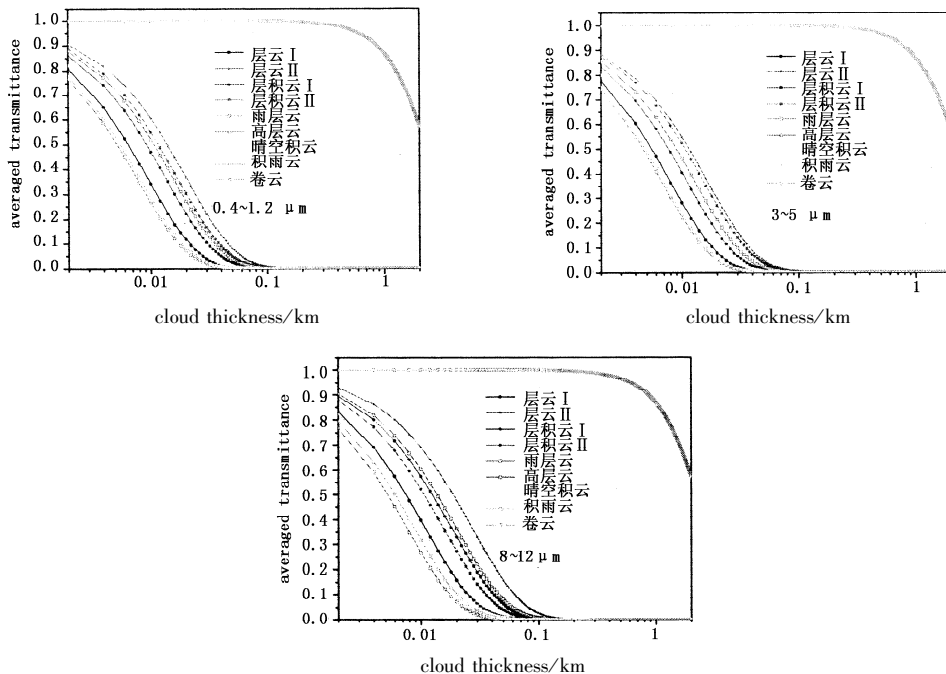


图 7 三波段各种水云的衰减特性

Fig. 7 extinction properties of water clouds for three wave bands

5 小结

本文计算了水云的单次散射特性,分析了不同粒子半径水云的散射特性(消光效率因子、单次散射反照率和不对称因子)随波长的分布情况,波长小于 $10\ \mu\text{m}$ 时消光效率因子、单次散射反照率和不对称因子迅速变化,大于 $100\ \mu\text{m}$ 时趋于平缓,散射相函数也迅速减小,可认为当粒子半径计算到 $100\ \mu\text{m}$ 时足以描述水云的光学特性。

根据实际观测资料拟合到的 90 种尺度谱分布对水云的单次散射特性进行平均,建立一个水云从可见光到远红外波段单一波长上的平均单次散射特性数据库。运用这个数据库,分析了 8 种典型水云的平均单次散射特性,以及在不同波段上的平均透过率特性。水云的这些散射特性数据在中等分辨率云中辐射传输计算、气候模式和遥感应用中都可以得到广泛的应用。

致谢:中科院大气物理研究所的王宏七老师为本文提供了 90 种水云的尺度谱分布,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] David L M. Parameterization of the Mie extinction and absorption coefficient for water clouds[J]. *J. Atmos. Sci.*, 2000, 57:1311 - 1326.
- [2] Steven A A, Stephens GL. The absorption of solar radiation by cloud droplet: An application of anomalous diffraction theory[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1987, 44:1574 - 1588.
- [3] 汪宏七,赵高祥. 水云的短波光学性质参数化研究[J]. *科学通报*, 1998, 43:1771 - 1775.
- [4] 汪宏七,赵高祥. 水云宽带长波光学性质参数化[J]. *自然科学进展*, 2001, 11:1092 - 1098.
- [5] Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms[J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19:1505 - 1509.
- [6] 北京大学地球物理系大气物理教研室云物理教学组编. 云物理学基础[M]. 北京: 农业出版社, 1981: 44 - 45.
- [7] William R C, Liz Zarovy. Atmospheric thermodynamics and microphysics of clouds[J]. 8 MWF - ATS 101, 2003.
- [8] David L M, Arnott W P, Schmitt C, et al. Contributions of photon tunneling to extinction in laboratory grown hexagonal columns[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2001, 70:761 - 776.
- [9] Baran A J, Haveman S, Francis P N, et al. A study of the absorption and extinction properties of hexagonal ice columns and plates in random and preferred orientation, using exact T-matrix theory and aircraft observations of cirrus[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2001, 70: 505 - 518.
- [10] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN 4 user's manual[M]. Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command, Hanscom AFB MA, 1997:1731 - 3010.