

# 冰晶性质对卷云辐射特征影响的模拟研究

李 娟<sup>1</sup> 毛节泰<sup>2</sup>

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 北京大学物理学院大气科学系)

**提 要:** 介绍了 SBDART 辐射模式和 libRadtran 程序包, 并利用这两个模式模拟分析了当卷云内冰晶性质如有效半径、冰晶含量以及形状变化时, 卷云反照率的变化。模拟分析表明, 在相同条件下, 不同形状冰晶构成的卷云反照率有所不同, 同种冰晶构成的卷云在不同波长的反照率也不同。总的来说, 不论是由何种形状冰晶构成的卷云, 随着卷云内冰晶含量增大, 有效半径减小, 卷云反照率增大。这些工作将有助于增进对 libRadtran 程序包和卷云性质的了解。

**关键词:** 冰晶 SBDART libRadtran

## Simulation about Influences of Ice Property Changes on Cirrus Radiative Properties

Li Juan<sup>1</sup> Mao Jietai<sup>2</sup>

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081;

2. Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University)

**Abstract:** SBDART radiative model and libRadtran software package are introduced. Cirrus reflectance changes with ice crystal properties are analyzed. These properties include ice effective radius, ice content and ice shape, etc. Simulations show that cirrus reflectance is different when it is made of different ice crystals. In all, the results are that cirrus reflectance increases with increases ice content and decreases ice effective radius for the cloud which consists of any kind of ice crystals.

**Key Words:** ice particles SBDART libRadtran

资助项目: 国家气象中心自筹资金项目“全球中期数值预报系统改进与升级研发”

收稿日期: 2005年4月30日; 修定稿日期: 2005年11月7日

## 引 言

卷云主要由冰晶构成,通常反照率较高。它对全球辐射收支很重要,其辐射强迫的变化是影响全球气候和辐射平衡最不确定的因子之一<sup>[1,2]</sup>。

卷云辐射特征受很多因素影响,如冰晶粒子尺度和冰晶含量等。另外,不同形状冰晶构成的云反照率也有所不同。目前对于具有随意几何形状的粒子散射还没有严格的理论解,但对一些特殊形状的冰晶有单次散射的精确解。如 Cai 等发展了射线光学理论来计算六角形冰晶构成的冰云的光学特性<sup>[3]</sup>, Stephens 对空间随意取向和长轴在水平面内随意取向的长圆柱冰晶云的辐射传输作了计算<sup>[4]</sup>。Yang 利用光散射程序计算得到 6 种形状冰晶的消光系数,单散射反照率 and 不对称因子<sup>[5]</sup>,不同形状、尺度的冰晶在不同波段有不同的光学特征。关于卷云反照率性质的研究,Kinne 分析发现,光学厚度相同时,小粒子构成的卷云比大粒子构成的卷云反照率高<sup>[6]</sup>。国内也曾有过相关讨论。佟彦超等利用矩阵算法计算了不同太阳天顶角、不同光学厚度的卷云在短波波段的反射率特征<sup>[7]</sup>,刘春雷等采用 MonteCarlo 模式,计算了不同粒子密度分布情况下,卷云在  $0.55\mu\text{m}$  波段的反射率变化<sup>[8]</sup>。

本文介绍了 SBDART 辐射传输模式以及 libRadtran 程序包,其中 libRadtran 国内尚无相关文献说明。另外,利用这两个模式对卷云辐射性质作了模拟分析。首先利用 SBDART 模式模拟了假设卷云内为等效冰晶球粒子时,在不同冰晶有效半径和含量情况下,短波波段的卷云反照率的变化。由于各种形状冰晶的光学性质不同,文中利用 libRadtran 对不同尺度的由多种形状冰晶构成的云在短波波段的反照率作了进一步的模

拟分析。

## 1 假设冰晶为等效球形粒子,冰晶有效半径和含量变化对云辐射性质的影响

### 1.1 SBDART 模式介绍

SBDART 是 Paul Richiazzi 和 Shiren Yang 等用 Fortran 编写的一个辐射模式<sup>[9]</sup>,其主要目的是为了更好的处理有云大气条件下的辐射计算。该模式结合 LOWTRAN 和 DISORT 的算法和优点,不仅使用多流的算法,而且在使用上非常方便。SBDART 中囊括了影响紫外、可见、红外辐射的各种重要过程,采用近几年被广泛使用并值得信赖的各种物理模式,并结合了经典的离散纵坐标辐射传输模式、低分辨率的大气辐射传输模式以及水滴和冰晶的 Mie 散射计算结果,适合于做各种敏感性试验、卫星遥感反演计算和大气辐射能量平衡变化等方面的科学研究,是一个比较准确的辐射传输模式。模式计算中假设冰晶为等效球形粒子,并进而模拟云辐射特征。

### 1.2 模拟结果

利用 SBDART 模式模拟得到冰晶尺度变化对卷云光学性质的影响,如图 1。

模拟计算中,选取中纬度夏天的大气廓线,并设太阳位于天顶,设置云顶高度  $H_{\text{cd}}$  在 7km,冰晶含量  $I_{\text{wc}}$  为  $0.1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,并设冰晶的有效半径  $r_e$  为  $2\sim 128\mu\text{m}$  不等。分析了可见光波段卷云有效半径为不同值时的云反照率。从图 1 可以看出,在整个可见光波段,当冰晶含量不变时,云反照率随着粒子有效半径的减小而增大。当粒子有效半径为  $2\mu\text{m}$  时,反照率最大,最大值可以达到 90% 以上,此时波长位于  $1\mu\text{m}$  左右。当粒子半径为  $128\mu\text{m}$  时,卷云反照率最小。也

就是说, 由较多小粒子构成的卷云反照率比由较少大粒子构成的卷云大。

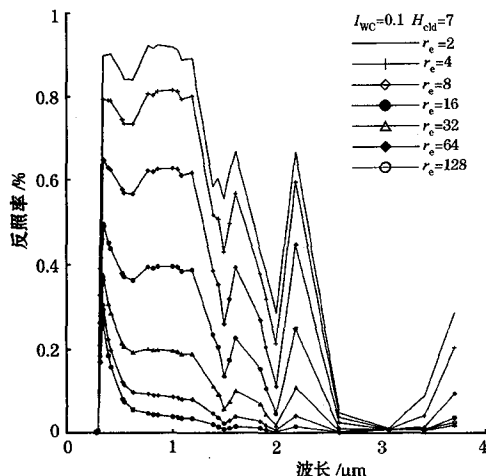


图1 不同尺度的等效球形冰晶粒子构成的卷云在短波波段的反照率

图2为冰晶含量变化后, 卷云反照率的变化图。模拟计算中, 选取中纬度夏天的大气廓线, 设置云顶高度在7km, 冰晶有效半径为  $50\mu\text{m}$ 。冰晶含量为  $0.01 \sim 1\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。图2显示, 在有效半径不变的情况下, 当云内冰晶含量增大时, 在整个可见光波段, 云反照率增大。

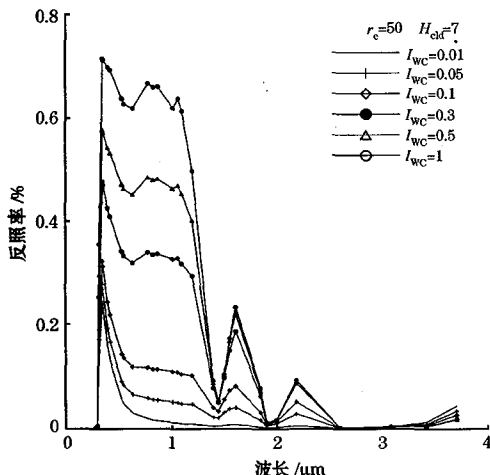


图2 不同含量的等效球形冰晶粒子构成的卷云在短波波段的反照率

## 2 考虑冰晶形状时, 冰晶有效半径和含量变化对云辐射性质的影响

分析 SBDART 模式的模拟结果可知, 等效球形冰晶粒子构成的卷云在整个短波波段的反照率, 当冰晶含量不变时, 随粒子有效半径的增大而减小, 当有效半径不变时, 随冰晶含量的增大而增大。由于各种形状的冰晶光学性质不同, 因此仅在假设冰晶为等效球形粒子情况下所作的工作是不够的, 我们需要对不同尺度各种形状的冰晶构成的云在短波波段的反照率作进一步的模拟分析。

### 2.1 libRadtran 程序包介绍

LibRadtran 是一个辐射传输程序包<sup>[5]</sup>, 用来计算太阳短波以及地球大气的长波辐射。libRadtran 的核心程序是 uvspec 辐射传输模式。该模式可以使用多流的算法, 用于辐射过程的模拟和计算地球辐射收支等。模式计算中, 用户根据需要可以给定大气特征参数, 包括气体、气溶胶、水云、冰晶云和地面的一些辐射性质等。该模式的优点在于它对冰云辐射性质的考虑较为详细, 包含了6种形状冰晶的辐射特征, 即消光系数、单散射反照率和不对称因子, 这些值取自 Yang<sup>[5]</sup>。6种冰晶的形状包括, 板状 (plate)、实心柱体 (solid-column)、空心柱体 (hollow-column)、4瓣玫瑰形 (rosette-4)、6瓣玫瑰形 (rosette-6)、团状 (rough-aggregate)。不同形状的冰晶辐射性质不同。

### 2.2 模拟结果

由于不同形状的冰晶辐射性质不同, 因此, 由各种冰晶构成的卷云反照率也有所差异。下面以  $0.55\mu\text{m}$  和  $0.8\mu\text{m}$  波段为例, 对由不同形状冰晶构成的卷云反照率的变化

作了模拟分析,同时考虑了云内冰晶有效半径和冰晶含量的变化。

图 3 和图 4 是利用 uvspec 模式计算得到的由各种形状不同尺度的冰晶构成的卷云分别在  $0.55\mu\text{m}$  和  $0.8\mu\text{m}$  波长的反照率。计算中设云高  $7\text{km}$ , 冰晶含量为  $0.1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 粒子有效半径为  $2\sim 120\mu\text{m}$ 。从图 3、图 4 看出,对于同种冰晶构成的卷云,当粒

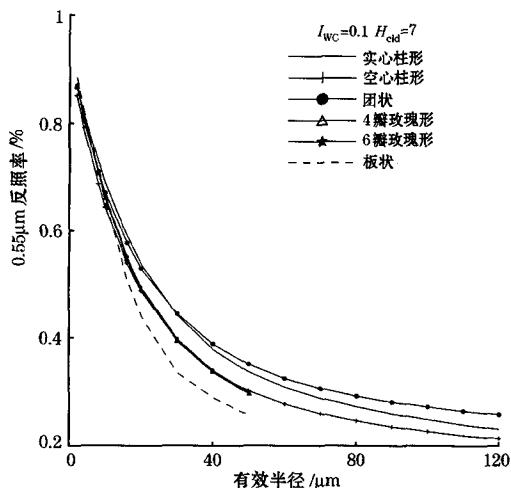


图 3 不同形状不同尺度的冰晶构成的卷云在  $0.55\mu\text{m}$  波长的反照率

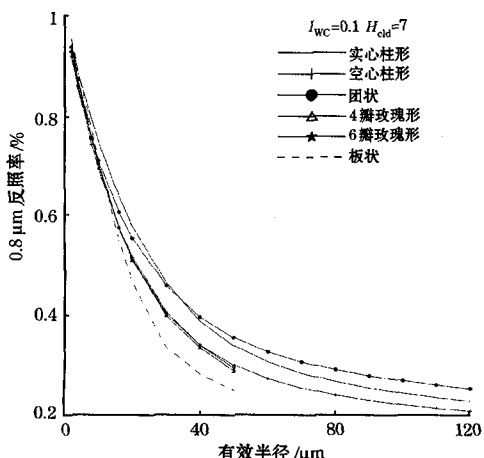


图 4 不同形状不同尺度的冰晶构成的卷云在  $0.8\mu\text{m}$  波长的反照率

子有效半径较小时,  $0.8\mu\text{m}$  的反照率大于  $0.55\mu\text{m}$  的相应值, 随着有效半径逐渐增大, 各种卷云在  $0.55\mu\text{m}$  的反照率逐渐接近  $0.8\mu\text{m}$  的相应值。6 种卷云中, 有效半径比较大时, 团状冰晶构成的卷云反照率最大。总的来看, 不论是何种形状冰晶构成的卷云, 当云粒子有效半径增大时, 这两个波段的云反照率减小。由于冰晶的形状不同, 其光学性质也不同, 因此, 变化曲线有一定的差异, 但总体趋势不变。

图 5 和图 6 分别是模拟计算得到的由不同形状冰晶构成的卷云在  $0.55$  和  $0.8\mu\text{m}$  波长的反照率。计算中设云高  $7\text{km}$ , 冰晶的有效半径为  $50\mu\text{m}$ , 冰晶含量为  $0.01\sim 1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。当冰晶含量较大时, 各种冰晶云在  $0.8\mu\text{m}$  的反照率比  $0.55\mu\text{m}$  的相应值略大。6 种卷云中, 团状冰晶构成的卷云反照率最大, 其次是实心柱体、空心柱体、6 瓣玫瑰形、4 瓣玫瑰形, 最小的是板状冰晶构成的卷云。在这两个波段, 不论是何种形状冰晶构成的卷云, 当冰晶含量增大时, 云的反照率增大。

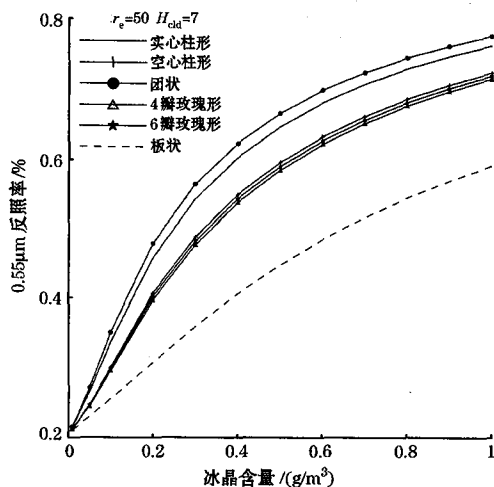


图 5 不同冰晶含量由不同形状冰晶构成的卷云在  $0.55\mu\text{m}$  波长的反照率

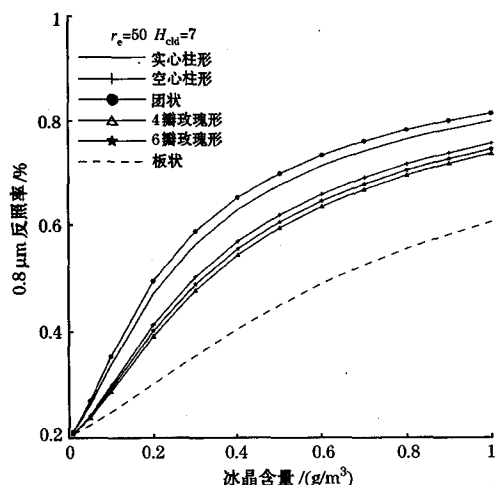


图6 不同冰晶含量由不同形状冰晶构成的卷云在  $0.8\mu\text{m}$  波长的反照率

总体来看,不论是何种形状冰晶构成的卷云,当冰晶含量增大,粒子有效半径减小时,在  $0.55\mu\text{m}$  和  $0.8\mu\text{m}$  波长的反照率增大。由于冰晶形状不同,其光学性质也不同,因此,变化曲线有一定的差异,但总体趋势不变。

### 3 总结

本文介绍了 SBDART 辐射模式和 libRadtran 程序包,并作了相关模拟分析。利用 SBDART 模式所作的模拟分析表明,当卷云为等效球形冰晶粒子构成时,冰晶含量增加,尺度变小可以导致卷云在整个短波波段的反照率增大。利用 libRadtran 所作的模拟分析表明,对于同种形状冰晶构成的卷云,在相同有效半径和含量情况下,不同波

长的反照率不同。当波长、有效半径和冰晶含量相同时,不同形状冰晶构成的卷云反照率也不同。总的来说,不论是何种形状冰晶构成的卷云,当冰晶含量增大,粒子有效半径减小时,卷云反照率增大。通过本文的模拟分析,可以促进对 libRadtran 程序包和卷云辐射性质的了解。

### 参考文献

- 1 Stephens G. L., Tsay S. C., Stackhouse P. W., et al. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climate feedback. *J. Atmos. Sci.*, 1990, 47: 1742—1753.
- 2 Wylie D. P., Menzel W. P., Woolf H. M., et al. Four years of global cirrus cloud statistics using HIRS. *J. Climate*, 1994, 7: 1972—1986.
- 3 Cai Q. M., Liou K. N. Theory of polarized light scattering by hexagonal ice crystals. *Appl. Opt.*, 1982, 21: 3569—3580.
- 4 Stephens G. L. Radiative transfer through arbitrarily shaped optical media I: A general method of solution. *J. Atmos. Sci.*, 1988a, 45: 1818—1836.
- 5 Ping yang, Liou K. N., Wyser K. Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals. *J. G. R.*, 2000, 105 (D4): 4699—4718.
- 6 Kinne S., Liou K. N., et al. The effects of the non-sphericity and size distribution of ice crystals on the radiative properties of cirrus clouds. *Atmos. Res.*, 1989, 24: 273—284.
- 7 佟彦超, 刘长盛. 卷云与水云的短波透射与反射特性. *大气科学*, 1998, 22 (1): 32~38.
- 8 刘春雷, 姚克亚. 卷云中粒子的密度变化对可见光波段能量传输的影响. 1997, 21 (5): 599~606.
- 9 Paul Ricchiazzi, Yang S., Gautier C., et al. SB-DART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. *Bulletin of the Amer. Mete. Society*, 1998, 79 (10): 2101—2114.