

# FY-1C 资料在云顶粒子热力学相态分析中的应用研究<sup>\*</sup>

刘 健<sup>1,2)</sup> 董超华<sup>2)</sup> 朱元竞<sup>1)</sup> 朱小祥<sup>1,2)</sup> 张文建<sup>1)</sup>

1) (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

2) (中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘 要** 中国发射的 FY-1C 极轨气象卫星有 10 个探测通道, 包括可见光、近红外和红外波段。在对云顶粒子热力学相态进行数学模拟分析的基础上, 利用 FY-1C 资料对实例进行了分析研究。结果表明 FY-1C 的通道 6 (1.58~1.64  $\mu\text{m}$ ) 适于探测云顶粒子的热力学相态。

**关键词:** 云顶粒子; 热力学相态; 模拟

## 1 引言

云对地球与大气间的能量平衡具有强烈的调节作用。云的性质及其在不同空间和时间尺度上的变化对全球气候变化和各种尺度的天气系统有重要影响。云滴的物理性质可用云滴的谱分布、有效粒子半径、相态及含水量等参数表示。了解云滴的物理性质不仅有助于对天气现象的监测和预报, 同时对人工影响天气的研究也十分有益。

早有研究表明<sup>[1~3]</sup>, 冰和水对辐射的吸收在 8  $\mu\text{m}$  至 10  $\mu\text{m}$  波段上基本相同, 但在 10  $\mu\text{m}$  到 12  $\mu\text{m}$  波段上却出现明显的差异, 因此联合使用 8  $\mu\text{m}$ 、11  $\mu\text{m}$  和 12  $\mu\text{m}$  三个红外探测波段, 有可能分析云顶粒子的热力学相态。目前, 由于我们没有 8  $\mu\text{m}$  的卫星观测资料, 因此无法做这方面工作的深入研究。

国内外已有对不同相态的云在太阳短波段辐射性质的研究结果<sup>[4~8]</sup>。这些研究表明: 由于冰与水在 1.64  $\mu\text{m}$  波段有较明显的吸收性质差异, 即冰粒子在 1.64  $\mu\text{m}$  吸收大, 反射率明显小, 水粒子吸收小, 反射率高, 故 1.64  $\mu\text{m}$  反射率对云顶粒子的热力学相态比较敏感。

1999 年 5 月 10 日我国成功发射了 FY-1C 极轨气象卫星。该星携带的仪器有 10 个探测通道, 光谱波段覆盖可见光、近红外和红外, 例如通道 1 (0.58~0.68  $\mu\text{m}$ ) 位于可见光波段, 通道 4 (10.3~11.3  $\mu\text{m}$ ) 为红外窗区, 通道 6 (1.58~1.64  $\mu\text{m}$ ) 位于近红外波段。这些探测通道为研究云顶粒子的热力学相态提供了宝贵的资料。

本文根据模拟计算结果, 分析了云顶粒子热力学相态的物理基础和 FY-1C 通道 1、4 和 6 的光谱特性, 然后结合实例, 利用 FY-1C 观测资料对云顶粒子的热力学相态进

行了分析, 结果证明综合利用 FY-1C 1.64  $\mu\text{m}$  等资料可以判识出云顶粒子热力学相态。

## 2 云顶粒子热力学相态分析的物理基础

云的辐射性质可用它们的几何特征和单次散射性质加以描述。单次散射特性又可用折射指数、粒子大小分布和粒子形状等参数表示。粒子的散射性质和粒子的吸收、发射辐射能力间的关系可用吸收系数  $\kappa$  表示:

$$\kappa = \frac{4\pi m_i}{\lambda},$$

式中  $m_i$  为折射指数的虚部, 代表粒子的吸收大小,  $\lambda$  是波长。

为便于分析云的热力学相态, 我们利用 OPAC<sup>[9]</sup> 数据首先分析水和冰在 0.25~2  $\mu\text{m}$  波段其折射指数虚部随波长的变化 (图 1)。由图 1 可见, 当波长小于 1.0  $\mu\text{m}$  时, 无论水还是冰对辐射的吸收都非常小, 但在 1.64  $\mu\text{m}$  附近, 水和冰的吸收辐射能力明显加强, 且两者出现较大差异, 水的吸收辐射能力小于冰。这说明当水云和冰云粒子具有相同的粒子大小及分布时, 在 0.65  $\mu\text{m}$  波长 (FY-1C 通道 1), 云的反射辐射对云的热力学相态依赖性很小, 而在 1.64  $\mu\text{m}$  波长, 云的热力学相态对云的反射辐射大小有明显的影 响, 冰云的反射辐射比水云小。

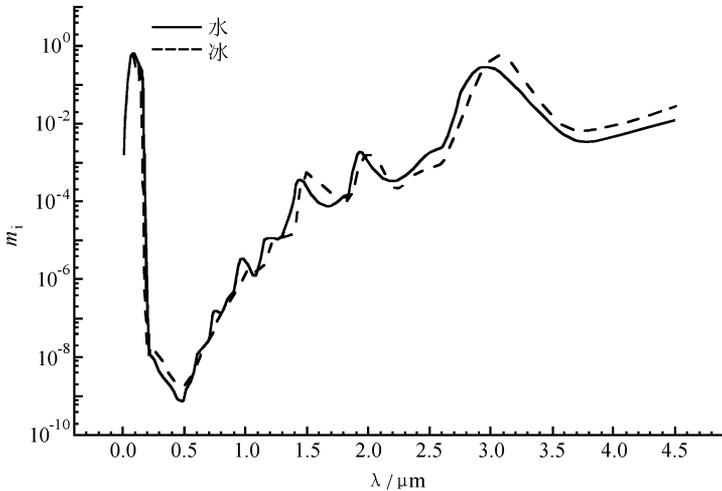


图 1 水和冰在 0.0~4.5  $\mu\text{m}$  波段上的折射指数虚部随波长的变化

除了折射指数外, 云的单次散射辐射性质还与云粒子的大小及分布有关。利用 OPAC 数据, 我们绘制了水云和冰云的单次散射反照率 ( $\omega_0$ ) 随粒子有效半径 ( $r_e$ ) 和波长 ( $\lambda$ ) 的变化曲线, 并示于图 2。图 2 中的粒子有效半径  $r_e$  的定义为

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} r^3 \frac{dN}{dr} dr}{\int_0^{\infty} r^2 \frac{dN}{dr} dr}, \quad (2)$$

式中  $N$  为每立方厘米的体积中粒子总的数密度。其中水云用修正的  $\Gamma$  分布描述<sup>[9]</sup>,

$$\begin{cases} \frac{dN}{dr} = N a r^a \exp\left[-\frac{\alpha}{\gamma} \left(\frac{r}{r_{\text{mod}}}\right)^\gamma\right] = N a r^a \exp(-B r^\gamma), \\ B = \frac{\alpha}{\gamma r_{\text{mod}}^\gamma}, \end{cases} \quad (3)$$

式中  $r_{\text{mod}}$  为众数半径, 常数  $\alpha$  和  $\gamma$  为描述粒子大小分布的斜率,  $a$  是保证对所有半径进行积分的粒子分布归一化常数。

冰云粒子的分布用方程 (4) 描述<sup>[9]</sup>,

$$\begin{cases} \frac{dN}{dx} = N f a_1 x^{b_1} I, & x < x_0, \\ \frac{dN}{dx} = N f a_2 x^{b_2} I, & x > x_0, \end{cases} \quad (4)$$

式中  $x$  是冰晶粒子最大维的长度,  $N$  是每立方厘米的体积中粒子总的数密度,  $I$  是冰中水含量,  $f$  是附加因子,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  是计算系数。

从图 2 可以看出, 在 FY-1C 通道 1 所在的  $0.65 \mu\text{m}$  波长, 冰云和水云的单次散射反照率没有明显的区别, 而在通道 6 所在的  $1.64 \mu\text{m}$  波长, 水云的单次散射反照率明显大于冰云。此外无论是水云还是冰云, 单次散射反照率均随粒子有效半径的增大而减小。

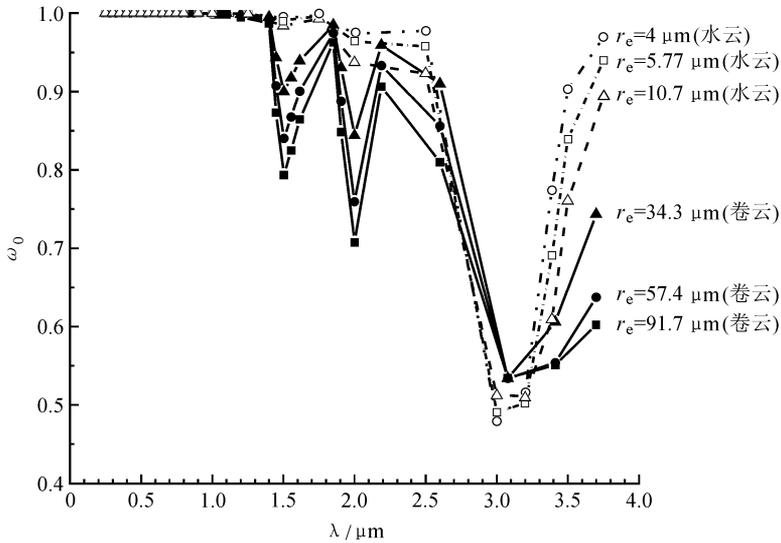


图 2 不同种类的水云和冰云的单次散射反照率随波长的变化

### 3 FY-1C 光谱通道特性的模拟计算分析

我们利用 SBDART 辐射传递模式<sup>[10]</sup> 计算云在 FY-1C 通道 1 ( $0.65 \mu\text{m}$ )、通道 6 ( $1.64 \mu\text{m}$ ) 反射率和通道 4 ( $11 \mu\text{m}$ ) 亮度温度随云粒子有效半径 ( $r_e$ ) 及云光学厚度 ( $\tau$ ) 的变化。计算中采用中纬度夏季大气廓线和 FY-1C 相应探测波段的光谱响应函数。计算结果分别示于图 3 到图 6。从图 3 可以清楚地看到 FY-1C 通道 1 反射率与云粒子有效半径的关系不明显, 无论云粒子有效半径如何变化, 反射率的变化均很小, 尤其在

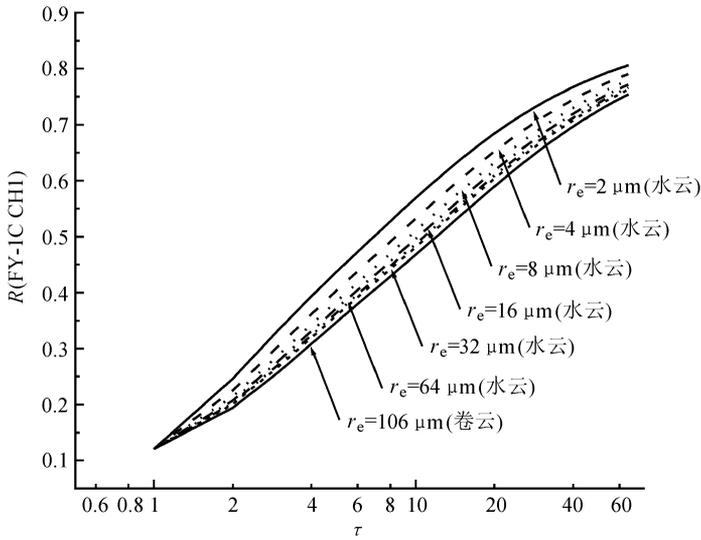


图 3 模拟计算的 FY-1C 通道 1 反射率 ( $R$ ) 与云的光学厚度 ( $\tau$ ) 和云粒子有效半径 ( $r_e$ ) 的关系

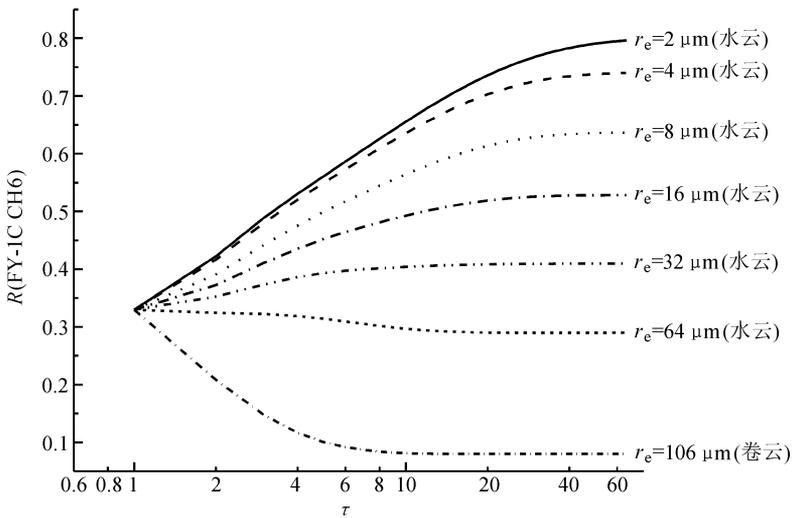


图 4 模拟计算的 FY-1C 通道 6 反射率 ( $R$ ) 与云的光学厚度 ( $\tau$ ) 和云粒子有效半径 ( $r_e$ ) 的关系

云的光学厚度很大 ( $\tau > 50$ ) 或很小 ( $\tau < 4$ ) 时, 云的反射率几乎与云粒子有效半径的大小无关。但反射率随云光学厚度的变化却很显著, 云的光学厚度越大, 通道 1 反射率越大, 两者基本成线性变化关系。由图 4 可以看出通道 6 反射率随云粒子有效半径的变化很明显, 云粒子有效半径越大, 通道 6 反射率越小。当云的光学厚度小于 20、粒子有效半径小于  $32 \mu\text{m}$  时, 通道 6 反射率随光学厚度的增大而显著增大, 基本成线性关系; 当云粒子有效半径大于  $32 \mu\text{m}$ , 随光学厚度的增大, 通道 6 反射率反而减小; 当云的光学厚度大于 20 后, 通道 6 反射率不再随光学厚度的增大而明显变化。

图 5 是模拟计算的 FY-1C 通道 1 和通道 6 反射率与云粒子有效半径和光学厚度的函数关系。可以明显地看出, 对具有一定光学厚度的云 ( $\tau > 4$ ), 随云粒子有效半径增

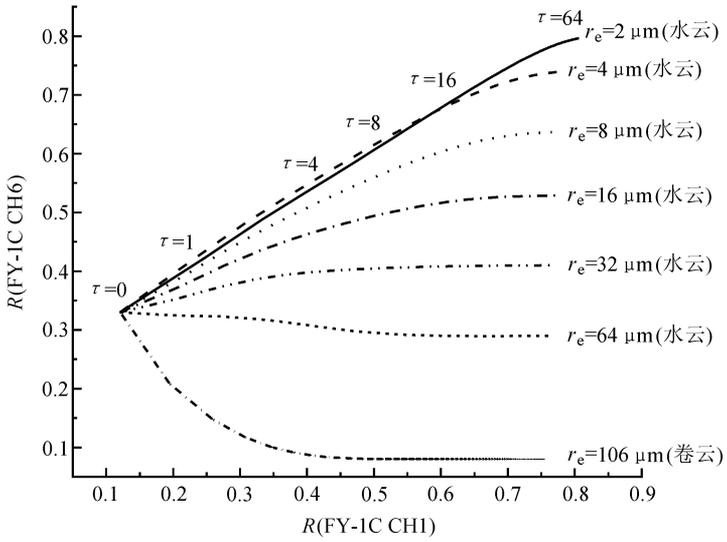


图 5 模拟计算的 FY-1C 通道 1、6 反射率 (R) 与水云粒子的有效半径 ( $r_e$ ) 和光学厚度 ( $\tau$ ) 间的函数关系

大, 云在通道 6 的反射率明显小于通道 1 的反射率。但当云的光学厚度很小 ( $\tau < 2$ ) 时, 不同水云粒子有效半径所引起的反射率的变化很小。

综上所述, 当云具有一定的光学厚度时, 云顶粒子尺度越大, 通道 1 反射率和通道 6 反射率间的差异也越大, 且通道 6 反射率小于通道 1 反射率, 反映出冰云和水云在通道 6 反射率上存在明显的差异。

图 6 反映了水云的有效半径、光学厚度和亮度温度间的关系。可以看出, 当云的有效粒子半径小于  $32 \mu\text{m}$  时, 随亮度温度降低, 光学厚度增大, 云在通道 6 的反射率增大; 当云的有效粒子半径大于  $32 \mu\text{m}$  时, 云在通道 6 的反射率反而随光学厚度的增

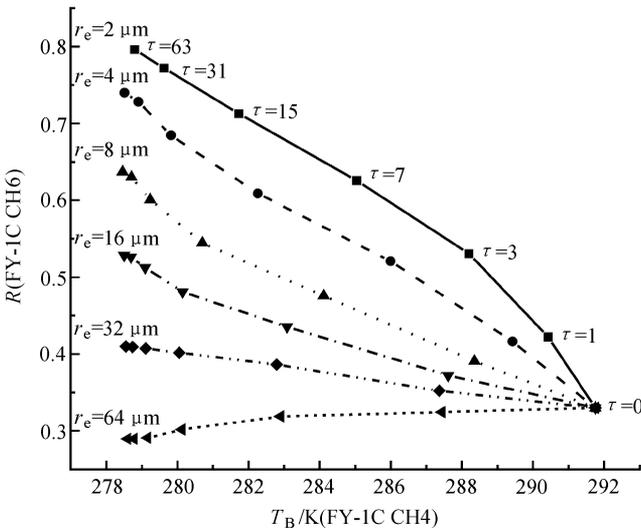


图 6 模拟计算的 FY-1C 通道 6 反射率 (R) 和通道 4 亮度温度 ( $T_B$ ) 与水云粒子的有效半径 ( $r_e$ ) 和光学厚度 ( $\tau$ ) 间的函数关系

加而减小。

#### 4 FY-1C 观测资料在云顶粒子热力学相态分析中的个例应用研究

我们以 1999 年 7 月 16 日 09 时左右 (北京时) 的 FY-1C 观测资料为例, 分别计算其通道 1 和 6 反射率及通道 4 亮度温度 (图 7, 见图版)。云相态分类结果图像示于图 7d。对于反射率图则以 256 个灰度等级表示反射率的大小, 图像色调越白, 表示反射率越大。分析图 7, 我们发现通道 6 和通道 1 图像有明显差异, 例如通道 1 图像上半部为灰白色云区, 而通道 6 反射率则很小, 成灰黑色; 图像下半部的云区在通道 6 的反射率与通道 1 的反射率差别不太大。根据上述几节的计算分析, 可以初步判断出图 7 上半部以冰云为主, 下半部则以水云分布为主。

为了进一步说明不同相态云对通道 1 和 6 的敏感性, 我们在图像中沿  $116^{\circ}\text{E}$  取一条剖面, 并分析这条剖线上 (共有 512 个象元, 象元为自上向下排列) 每个象元的通道 1、6 反射率和通道 4 亮度温度 (图 8)。可以看出在第 128 个象元前后, 通道 6 反射率 (30%) 与通道 1 反射率 (90%) 相差近 3 倍, 同时通道 4 的亮度温度低于 220 K。根据前面的模拟计算结果分析, 可以判定这些象元观测到的云相态为冰。而第 384 个象元前后的观测点, 通道 6 反射率与通道 1 反射率几乎相同, 通道 4 的亮度温度高于 280 K, 说明这些象元表示的云相态为水。这一分析印证了前面对云相态的初步判断。

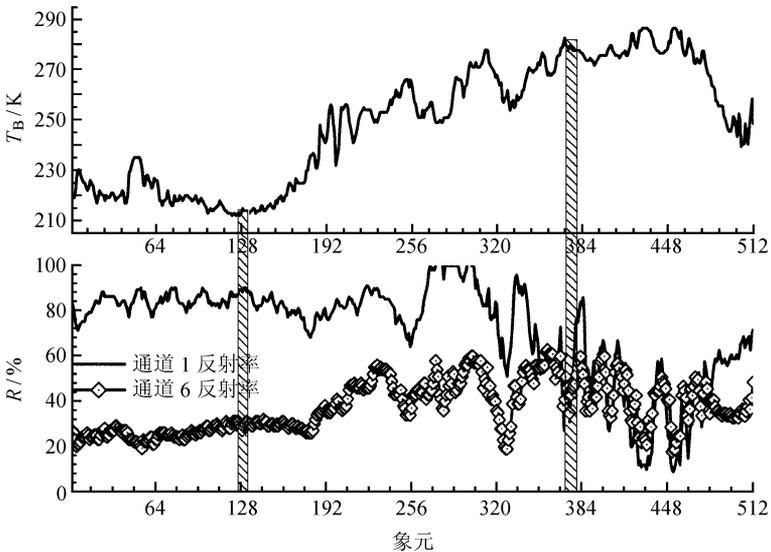


图 8 FY-1C 仪器扫描线沿  $116^{\circ}\text{E}$  上各象元的通道 1 和通道 6 反射率 ( $R$ ) 以及通道 4 亮度温度值 ( $T_B$ )

根据理论计算和实例统计分析, 我们可以设计一个云顶粒子相态的简单判识方法。对一个观测区域, 首先对象元进行云检测, 即判断象元为晴空还是云。如果是云, 则比较其通道 1 和 6 的反射率, 如通道 6 值明显低于通道 1, 且通道 4 的亮度温度又低于 220 K, 则认为此象元是冰云, 如果云在通道 4 的亮度温度与晴空时的平均亮度温度差小于 18 K, 则认为是水云。除上述两种情况外, 其他云象元 (如中层云) 的相态常常

难以判别, 判识的误差也会较大, 因为这些云可能是由过冷却水云组成, 其通道 4 的亮度温度可以低至 233 K<sup>[11]</sup>。

云顶粒子相态的判识阈值可大致归纳如下:

低层的水云:

$$\begin{cases} [\overline{T}_{B,cl}^{11} - BT_{cd}^{11}] > 18 \text{ K}, \\ [R_{cd}^{0.65} - \overline{R}_{cl}^{0.65}] > \sigma_{cl}^{0.65}, \\ [R_{cd}^{1.6} - \overline{R}_{cl}^{1.6}] > \sigma_{cl}^{1.6}; \end{cases} \quad (5)$$

卷云:

$$\begin{cases} [\overline{T}_{B,cl}^{11} - T_{B,cl}^{11}] > \sigma_{cl}^{11}, \\ [R_{cd}^{1.6} - \overline{R}_{cl}^{1.6}] < \sigma_{cl}^{1.6}; \end{cases} \quad (6)$$

除上述两类云外的其他云:

$$\begin{cases} 233 \text{ K} < T_{B,cl}^{11} < [\overline{T}_{B,cl}^{11} - 18 \text{ K}], \\ [R_{cd}^{1.6} - \overline{R}_{cl}^{1.6}] > \sigma_{cl}^{1.6}; \end{cases} \quad (7)$$

式中  $T_{B,cd}^{11}$  和  $T_{B,cl}^{11}$  分别是云象元和晴空象元在通道 4 的亮度温度,  $R_{cd}^{1.6}$  和  $R_{cl}^{1.6}$  分别是云象元和晴空象元在通道 6 的反射率,  $\sigma_{cl}^{1.6}$  是晴空象元通道 6 反射率的标准方差,  $\sigma_{cl}^{11}$  是晴空象元通道 4 亮度温度的标准方差。

图 7d 是根据以上判识结果得到的云分类图, 图 7d 中白色代表冰云, 黄色代表水云, 绿色是晴空。对比分析图 7 所示的通道 1、通道 6 反射率和多通道合成图像, 云的分布形势和相态分布基本正确。

## 5 结论

通过模拟计算和分析以及结合 FY-1C 多光谱数据对实际个例的分析研究, 可得到以下初步结论:

(1) FY-1C 通道 1、4 和 6 对云的辐射和反射特性不同。简单地讲, 对于具有相同粒子大小及分布的冰云和水云, 通道 1 ( $0.65 \mu\text{m}$ ) 的反射率都比较大, 且没有大的差异; 相反, 对于冰云在通道 6 ( $1.64 \mu\text{m}$ ) 的反射变小, 与通道 1 形成反差。通道 4 是  $11 \mu\text{m}$  红外窗区, 对云敏感, 用于区分云和晴空区。

(2) 个例分析说明, 综合利用 FY-1C 多通道资料, 可以比较有效地判断云的存在及云的相态。这一结果不仅利于对云的分类, 同时也有助于提高利用卫星资料反演其他地球物理参数精度。

## 参 考 文 献

- 1 Ackerman, S. A., W. L. Smith, J. D. Spinhirne et al., The 27-28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: Spectral properties of cirrus clouds in the 8-12  $\mu\text{m}$  window, *Mon. Wea. Rev.* 1990, **118**, 2377~2388.
- 2 Strabala, K. I., S. A. Ackerman, and W. P. Menzel, Cloud properties inferred from 8-12  $\mu\text{m}$  data, *J. Appl. Meteor.*, 1994, **2**, 212~229.
- 3 Michael, D. K., SI-Chee Tsay, Steven Platnick et al., MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. AT-

- BD-MOD-05 MOD06 -Cloud product, December, version 5, 1997.
- 4 Hansen, J. E. , and J. B. Pollack, Near-infrared light scattering by terrestrial clouds, *J. Atmos. Sci.* , 1970, **27**, 265~281.
  - 5 Curran, R. J. , and M. L. C. Wu, Skylab near-infrared observations of clouds indicating supercooled liquid water droplets, *J. Atmos. Sci.* , 1982, **39**, 635~647.
  - 6 Pilewskie, P. , and S. Twomey, Cloud phase discrimination by reflectance measurements near 1.6 and 2.2  $\mu\text{m}$ , *J. Atmos. Sci.* , 1987, **44**, 3419~3420.
  - 7 汪宏七、赵高祥, 云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响, *应用气象学报*, 1996, **7** (1), 36~44.
  - 8 陈洪滨、孙海冰, 冰-水球形粒子在太阳短波段的吸收和衰减, *大气科学*, 1999, **23** (2), 233~238.
  - 9 Hess, M. , P. Koepke, and I. Schult, Optical properties of aerosols and clouds; the software and package OPAC, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 1998, **79**(5), 831~844.
  - 10 Ricchiuzzi, P. , S. Yang, C. Gautier et al. , SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 1998, **79**, 2101~2114.
  - 11 Baum, A. B. , P. F. Soulen, K. I. Strabala et al. , Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 2. Cloud thermodynamic phase, *J. Geophys. Res.* , 2000, **105**(D9), 11781~11792.

## Thermodynamic Phase Analysis of Cloud Particles with FY-1C Data

Liu Jian<sup>1,2)</sup>, Dong Chaohua<sup>2)</sup>, Zhu Yuanjing<sup>1)</sup>, Zhu Xiaoxiang<sup>1,2)</sup>, and Zhang Wenjian<sup>1)</sup>

1) (*Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

2) (*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

**Abstract** Chinese meteorological satellite FY-1C was successfully launched on May 10, 1999. It has ten spectral channels. Some of them, such as channel 1 (0.58~0.68  $\mu\text{m}$ ), channel 4 (10.3~11.3  $\mu\text{m}$ ) and channel 6 (1.58~1.64  $\mu\text{m}$ ), can be used for cloud particles phase detection. Case study shows that 1.6  $\mu\text{m}$  can be used to analyze the thermodynamic phase of cloud particles.

**Key words:** reflectance; thermodynamic phase of cloud; model calculation