

卷云高度对大气的红外光谱辐射影响的研究

曹亚楠^{1,2}, 陈秀红¹, 魏合理¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用通用大气辐射传输软件(CART)计算了不同高度卷云大气红外光谱辐射亮温,着重分析了卷云高度对不同红外波段红外亮温谱、卷云有效尺度以及光学厚度反演的影响。研究发现:对流层顶以下,大气窗口波段的亮温随着卷云高度的变化和大气温度廓线基本一致,790~960 cm⁻¹波段亮温的斜率随卷云高度的增加而变大。亮温差 BTD[900~1 231 cm⁻¹]对薄卷云和小的有效尺度随卷云高度的变化较明显。对于厚卷云,亮温差 BTD[900~1 559 cm⁻¹]随卷云高度的变化基本上不依赖于卷云有效尺度和光学厚度。在卷云参数的光学定量遥感中需考虑卷云高度变化的影响。

关键词: 卷云高度; 通用大气辐射传输软件; 红外光谱

中图分类号: O43; P407.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)08-1965-06

Study of the effects of cirrus altitude on the atmospheric infrared spectral radiation

Cao Yanan^{1,2}, Chen Xiuhong¹, Wei Heli¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The brightness temperatures of IR spectral radiation of cirrus atmosphere with different cirrus altitude were computed by a combined atmospheric radiative transfer (CART) model. The effects of cirrus altitude on brightness temperature spectra of different IR bands and on the retrieval of optical thickness and effective size of cirrus were analyzed. The results show that the variation of IR brightness temperature with cirrus altitude in the atmospheric window region is consistent with the atmospheric temperature profile below the tropopause. The slope of the brightness temperature from 790 cm⁻¹ to 960 cm⁻¹ bands increases with the altitude of cirrus clouds. Variation of brightness temperature difference between 900 cm⁻¹ and 1 231 cm⁻¹ bands to cirrus altitude is sensitive to thin cirrus and small effective size. Variation of brightness temperature difference between 900 cm⁻¹ and 1 559 cm⁻¹ bands to cirrus altitude is basically not dependent on effective size and optical thickness for thick cirrus. Thus, the effects of cirrus altitude on the remote sensing of optical quantitation of cirrus parameters should be considered.

Key words: cirrus altitude; CART; IR spectra

收稿日期: 2011-12-22; 修订日期: 2012-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61077081)

作者简介: 曹亚楠(1986-), 女, 博士生, 主要研究方向为卷云红外辐射特性。Email: cyn@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 魏合理(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外辐射大气传输和卷云红外辐射特性等研究。

Email: hlwei@aiofm.ac.cn

0 引言

卷云常年覆盖地球大约 20%~30%^[1], 位于地球大气对流层中上层和平流层下层, 在全球能量平衡、辐射收支、天气和气候变化中起着重要的作用。卷云对大气是制冷还是加热与当时的天气状况有关, 同时与卷云的光学和微物理参数(如卷云的光学厚度、粒子有效尺度、云高、冰水含量、冰晶尺寸和形状等)有关, 卷云的辐射特性是目前大气科学中还没有解决的几个问题之一^[2], 因此研究卷云的光学和微物理参数尤为重要。

许多学者采用不同的方法对卷云进行的研究^[2-6]表明, 红外高分辨率光谱辐射特征带有卷云的特征信息。文中将利用新研制的通用辐射传输软件(CART)模拟计算卷云在不同高度条件下的大气红外光谱辐射特征, 分析卷云高度对红外高分辨率光谱遥感卷云特性的影响。

CART 软件是一套基于我国大气模式的大气辐射传输软件, 可以用来快速计算大气光谱透过率、大气热辐射、大气散射辐射和太阳直接辐照度。在新的版本中, 增加了卷云和水云存在情况下的大气辐射计算功能。文中利用 CART 软件计算了 AFGL 中纬度夏季大气模式卷云情况下的大气顶向上辐射亮温, 并着重分析了卷云高度对不同红外波段红外亮温谱、有效尺度以及光学厚度反演的影响, 为将来用卫星红外高分辨率光谱数据反演卷云的信息提供了基础。

1 CART 软件计算卷云情况下大气顶向上亮温原理^[7]

将从地表到大气顶分为 50 层, 云层内考虑云、大气分子和气溶胶的散射作用, 云层以外考虑大气分子和气溶胶的作用。将云辐射分为热辐射、散射太阳和地表反射辐射两部分来处理。云散射太阳辐射和地表辐射采用 DISORT 算法计算。

卷云的辐射传输模式, 需要用到卷云的光学性质参数: 消光效率因子、散射效率因子、不对称因子等。为了减轻计算负担, 将光学性质参数化为卷云的物理特性的函数。利用 Yang 等建立的可见光到短波红外^[8]和中波红外到远红外^[9]两个波段的光学特性

数据库进行组合, 得到 5 种形状粒子(平板状、实心柱状、空心柱状、子弹花状和聚合物状的粒子)在可见光到远红外波段, 粒子最大尺度范围从 2~9500 μm 的冰云的光学特性数据库。然后根据冰云的尺度谱分布将它们的光学特性进行平均, 利用插值法得到可见光到远红外波段 1 cm^{-1} 光谱间隔上的平均光学特性。最后, 将它们的平均光学性质拟合为卷云的有效尺度函数, 建立卷云参数化系数数据库。

对于可见光到中红外波段的散射计算, 将波段($2\ 001\sim 25\ 000\text{ cm}^{-1}$)分为 11 个子波段, 其中 $2\ 001\sim 5\ 000\text{ cm}^{-1}$ 波段分成间隔为 $1\ 000\text{ cm}^{-1}$ 的 3 个子波段, $5\ 001\sim 25\ 000\text{ cm}^{-1}$ 波段分为间隔为 $2\ 500\text{ cm}^{-1}$ 的 8 个子波段, 利用分段拟合 DISORT 计算方法建立卷云辐射传输快速计算模式。

根据建立好的卷云光学性质参数化系数数据库, 可以得到卷云的平均消光效率因子、平均吸收效率因子和不对称因子。利用分段拟合 DISORT 计算方法建立多次散射快速计算模式, 计算卷云情况下大气顶向上的红外光谱辐射亮温。

2 数值模拟

在计算卷云大气的红外光谱辐射中, 选择 AFGL 中纬度夏季大气模式, 观测天顶角为 180° (垂直向下观测), 太阳天顶角为 75° , 地面温度为 290.0 K , 卷云高度取 4 km , 9 km 和 17 km , 光学厚度为 $1.5, 8, 10$, 有效尺度为 $30\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$, $80\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$, 选择 900 cm^{-1} , $1\ 231\text{ cm}^{-1}$, $1\ 559\text{ cm}^{-1}$, 667 cm^{-1} 和 $2\ 349\text{ cm}^{-1}$ 波段进行研究。以下讨论均为聚合物粒子的情况。在未说明的情况下, 取卷云光学厚度为 1, 有效尺度为 $50\ \mu\text{m}$ 。下面将从不同高度处卷云大气的红外光谱辐射亮温, 卷云高度对不同红外波段亮温谱的影响, 以及卷云高度对卷云有效尺度和光学厚度反演的影响 3 个部分进行研究。

2.1 不同高度处卷云大气的红外光谱辐射亮温

图 1 为不同卷云高度下的亮温。由于卷云的典型高度为 9 km , 一般可能高度在 $4\sim 20\text{ km}$ 的范围^[10], 取卷云高度为 4 km , 9 km 和 17 km , 粒子有效尺度为 $50\ \mu\text{m}$, 光学厚度为 1。由图可见: $750\sim 1\ 250\text{ cm}^{-1}$ 波段, 大气顶向上的亮温随着卷云高度的增加而明显减小, 这与大气温度随高度的变化有关: 由于对流层大气温

度随高度增加而减小,卷云所处的高度越高,周围气温越低,辐射亮温相对于较低高度处减小。因此在研究中只是假定卷云处于某一高度,在红外波段将会产生一定的误差。

另外,由于卷云大气的红外光谱辐射随着高度的变化而变化,卷云处在不同的高度对大气辐射平衡的作用也大不一样。卷云对全球的辐射平衡和气候有重要的影响^[1]。一方面卷云反射(或散射)太阳辐射,使到达地表和大气的能量减少,冷却大气;另一方面卷云吸收地表和大气发射的长波辐射,加大大气。在大气窗口区,卷云的散射虽然改变光辐射的空间分布^[11],但是卷云对太阳辐射的反射随高度变化不大,而向地球外的红外辐射却随卷云高度有明显的变化,卷云越高,向外辐射的能量越少,将使地球大气增温;卷云越低,向外辐射的能量越多,将使地球大气降温。因此,除了卷云本身的物理特性外,卷云高度的监测和统计对于地球大气辐射平衡和气候效应也是非常重要的。

2.2 卷云高度对不同红外波段亮温谱的影响

为了研究卷云高度对不同红外波段亮温谱的影响,选择 900 cm⁻¹, 1 231 cm⁻¹, 1 559 cm⁻¹, 667 cm⁻¹ 和 2 349 cm⁻¹ 波段进行研究,这些波段的选择依据图 1 卷云大气的光谱辐射特性和冰吸收的光谱特性。如

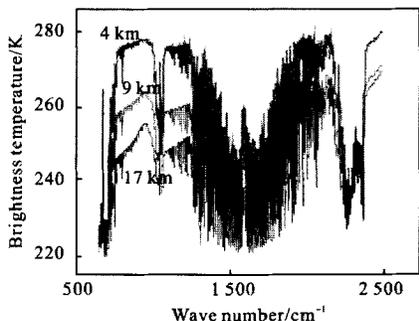


图 1 不同卷云高度亮温谱

Fig.1 Brightness temperature spectra of different cirrus altitudes

表 1 所示,通道 A 和 B 位于大气窗口区,大气吸收都较弱,卷云吸收在这两个通道上相差较大,因此卷云在这两个通道上的吸收和散射的差异带有卷云的有效尺度的信息。通道 C 位于水汽的极强吸收带上,通道 D 和 E 都是 CO₂ 的强吸收带。

由图 2 可见,大气窗口波段、大气吸收波段、冰吸收强弱波段中,在对流层顶以下时,除了 CO₂ 强吸

表 1 不同波带的性质

Tab.1 Properties of different bands

Bands	Wavenumber/cm ⁻¹	Ice absorption	Atmospheric absorption
A	900	Strong	Weak
B	1 231	Relatively weak	Weak
C	1 559	Moderate	Strong
D	667	Weak	Strong
E	2 349	Weak	Strong

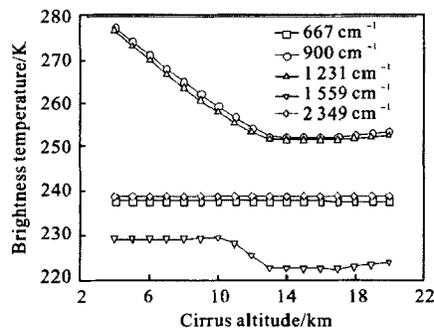


图 2 不同波数处亮温随卷云高度的变化

Fig.2 Variation of brightness temperature with cirrus altitude at different bands

收的 15 μm(667 cm⁻¹)和 4.3 μm(2 349 cm⁻¹)带和大气水汽强吸收波段(1 559 cm⁻¹)外,红外光谱亮温随卷云高度增加而减小,这与大气温度廓线的变化趋势一致(如图 3 所示)。CO₂ 强吸收带处于地球辐射的峰值区,能强烈吸收地球辐射的能量,从而形成温室效应。由于 CO₂ 在大气中混合均匀且含量随着地域和高度的变化不大,高层大气中的 CO₂ 已完全吸收了卷云及其以下层大气的辐射,所以 CO₂ 强吸收带处亮温不随着卷云高度的变化而变化。而在 1 559 cm⁻¹ (大气吸收极强波段) 处,水汽吸收极强,低空水

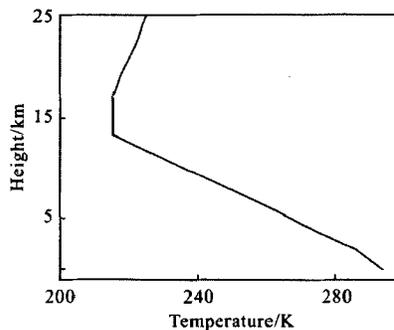


图 3 大气的温度廓线

Fig.3 Atmospheric temperature profile

汽较多,高空处水汽含量不断减少,当卷云处在 10 km 以下的高度,由于水汽的吸收,大气亮温不随卷云高度变化;当卷云高于 10 km 时,水汽含量很少,此时该波段亮温变化减小趋势和大气温度廓线一致。

2.3 卷云高度对卷云光学厚度和有效尺度反演的影响

2.3.1 卷云高度对有效尺度反演的影响

Wei 等^[3]和魏合理^[2]的研究表明:在 790~960 cm^{-1} 之间大气微窗口的亮温的斜率和有效尺度密切相关,该波段亮温的斜率随着粒子有效尺度的减小而增加,且当有效尺度大于 50 μm 时,斜率对有效尺度的灵敏度减小。由于大气温度随高度的变化,亮温随卷云高度变化的趋势和大气温度随高度的变化趋势一致,不同的高度处卷云的粒子有效尺度不同,那么卷云的高度也将会对卷云有效尺度反演产生一定的影响。根据飞机观测,Heymsfield 和 Platt^[12]阐明了冰晶尺度分布和温度的关系:温度越低,冰晶越小,温度越高,冰晶越大。由此可见:卷云高度越高,温度越低,粒子的有效尺度越小,卷云高度越低,温度越高,粒子的有效尺度越大。图 4 计算了 790~960 cm^{-1} 波段 3 个卷云高度的亮温谱。同样的卷云粒子大小,卷云高度越高,亮温变化越快,亮温斜率越大;卷云高度越低,亮温变化越慢,亮温斜率越小。所以,卷云越高,该波段的斜率对卷云粒子尺度的敏感性越大,有助于反演高层卷云的粒子有效尺度。

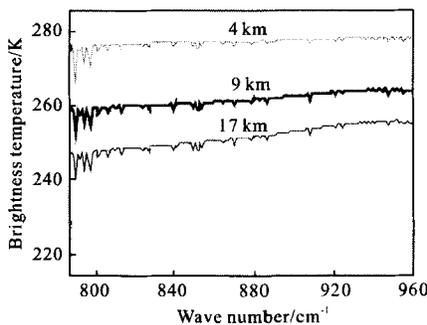


图 4 790~960 cm^{-1} 波段亮温随卷云高度的变化

Fig.4 Variation of brightness temperature with cirrus altitude between 790 cm^{-1} and 960 cm^{-1} bands

图 5 所示为 4 种光学厚度下,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ 随有效尺度和卷云高度的变化。图 6 为 4 种有效尺度下,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ 随卷云高度和光学厚度的变化。由这两幅图可见,亮温差

$\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ 对薄卷云和小的有效尺度随卷云高度的变化较明显,而厚卷云和大的有效尺度对卷云高度相对不敏感。同时,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ 对光学厚度较小的半透明卷云的有效尺度敏感。这是因为 900 cm^{-1} 波段冰晶的吸收强,

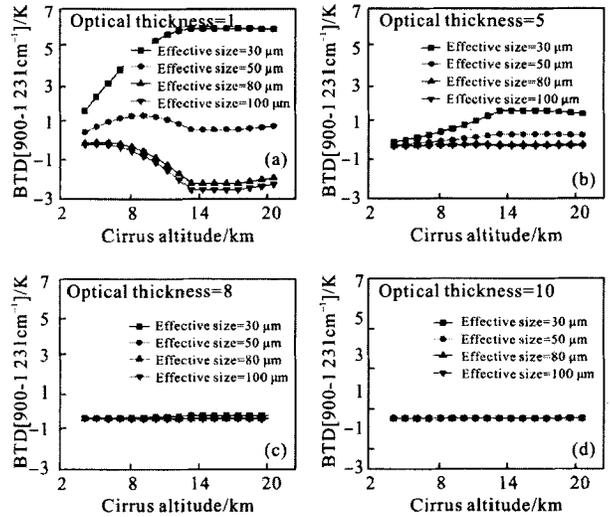


图 5 4 种光学厚度下 $\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ 随有效尺度和卷云高度的变化

Fig.5 Variation of brightness temperature difference $\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ with effective size and cirrus altitude for four cirrus optical thicknesses

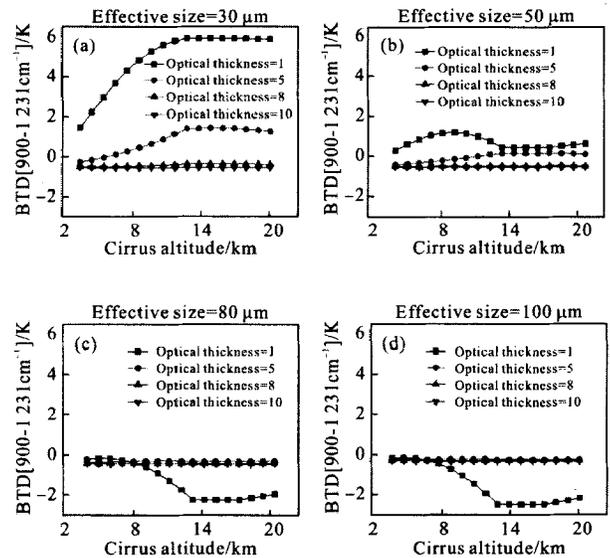


图 6 4 种有效尺度下 $\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ 随光学厚度和卷云高度的变化

Fig.6 Variation of brightness temperature difference $\text{BTD}[900\sim 1231\text{cm}^{-1}]$ with optical thickness and cirrus altitude for four effective sizes

1 231 cm^{-1} 波段冰晶的吸收较弱,这两个波段卷云的单次反照率随有效尺度的变化趋势相反,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1\ 231\ \text{cm}^{-1}]$ 带有卷云有效尺度的信息,与参考文献[2-3]的研究结果一致。

2.3.2 卷云高度对光学厚度反演的影响

图 7 为 4 种有效尺度下 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 随光学厚度和卷云高度的变化情况,图 8 为 4 种光学

厚度下 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 随有效尺度和卷云高度的变化情况。由图 7 和图 8 可见,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 随着卷云高度的增加先减小,当卷云高度大于 12 km 时,亮温差不再变化。在卷云高度从 4 km 增加到 20 km 时,光学厚度较大的情况下亮温差减小了 45 K 左右,而对于光学厚度较小的情况(光学厚度等于 1),亮温差减小较少,为 20 K 左右。可见,不同的光学厚度下,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 的变化是不尽相同的。对厚卷云,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 随卷云高度的变化基本上不依赖于有效尺度。当光学厚度大于 5 时,亮温差 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 不再随着光学厚度的变化而变化。

3 结 论

通过使用通用大气辐射传输软件(CART)计算了 AFGL 中纬度夏季大气模式下,观测天顶角为 180° (垂直向下观测),太阳天顶角为 75° ,地面温度为 290.0 K,卷云高度取 4 km, 9 km 和 17 km 卷云大气红外光谱辐射亮温。选择了 900cm^{-1} , $1\ 231\text{cm}^{-1}$, $1\ 559\text{cm}^{-1}$, 667cm^{-1} , $2\ 349\text{cm}^{-1}$ 波段,分析了卷云高度对不同红外波段红外亮温谱的影响。同时,分析了卷云高度对有效尺度和光学厚度反演的影响。研究发现:(1) 由于对流层大气温度随高度增加而减小,卷云所处的高度越高,周围气温越低,辐射亮温相对于较低高度处减小, $750\sim 1\ 250\ \text{cm}^{-1}$ 波段,大气顶向上的亮温随着卷云高度的增加而明显减小。另外,卷云处在不同的高度对大气辐射平衡的作用也大不一样。在大气窗口区,卷云对太阳辐射的反射随高度变化不大,而向地球外的红外辐射却随卷云高度有明显的变化,卷云越高,向外辐射的能量越少,将使地球大气增温;卷云越低,向外辐射的能量越多,将使地球大气降温。(2) 在对流层顶以下,大气窗口区红外光谱亮温随卷云高度增加而减小,这与大气温度廓线的变化趋势基本一致。 CO_2 强吸收带处亮温不随着高度的变化而变化,且该波段同一高度处亮温比大气窗口区要小。对于水汽的强吸收带 $1\ 559\ \text{cm}^{-1}$,低空亮温随高度变化小,高空亮温变化减小趋势和大气温度廓线一致。(3) 卷云高度越高, $790\sim 960\ \text{cm}^{-1}$ 亮温斜率变化越大,卷云高度越低,亮温斜率变化越小。这有助于判断高层卷云的粒子有效尺度。亮温差 BTD

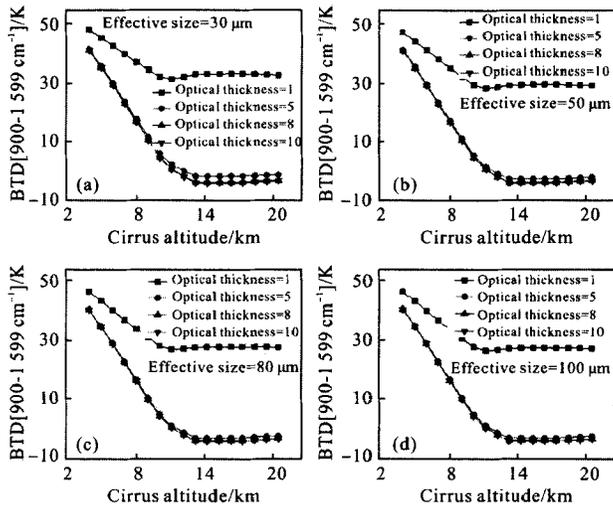


图 7 4 种有效尺度下 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 随光学厚度和卷云高度的变化

Fig.7 Variation of brightness temperature difference $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ with optical thickness and cirrus altitude for four effective sizes

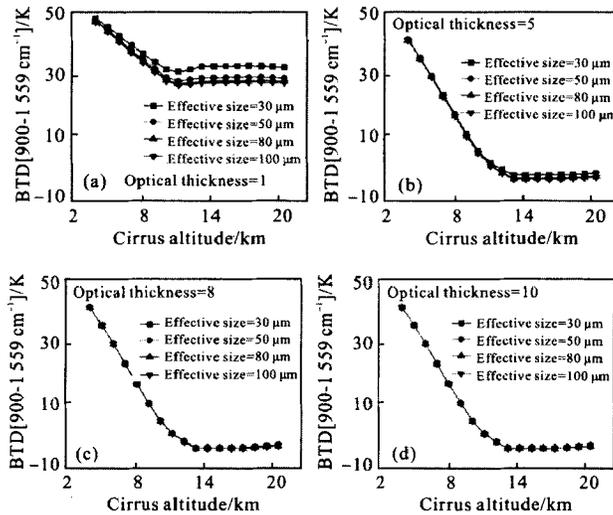


图 8 4 种光学厚度下 $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ 随有效尺度和卷云高度的变化

Fig.8 Variation of brightness temperature difference $\text{BTD}[900\sim 1\ 559\ \text{cm}^{-1}]$ with effective size and cirrus altitude for four cirrus optical thicknesses

[900~1 231 cm^{-1}] 对薄卷云和小的有效尺度随卷云高度的变化较明显, 而厚卷云和大的有效尺度对卷云高度相对不敏感。不同的光学厚度下, 亮温差 BTD [900~1 559 cm^{-1}] 随卷云高度的变化是不尽相同的。亮温差 BTD [900~1 559 cm^{-1}] 随卷云高度的变化基本上不依赖于有效尺度。当光学厚度大于 5 时, 亮温差 BTD [900~1 559 cm^{-1}] 不再随着光学厚度的变化而变化。

卷云的高度影响着卷云光学厚度和有效尺度的反演, 因此对于卷云高度的反演尤为重要。利用卫星高分辨率红外数据反演卷云的高度有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Liou K N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective[J]. *Mon Weather Rev*, 1986, 114: 1167-1199.
- [2] Wei Heli. The studies of infrared radiative properties of cirrus clouds and the applications to the remote sensing[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 83-86. (in Chinese)
魏合理. 卷云红外辐射特性和遥感应用研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005: 83-86.
- [3] Wei H, Yang P, Li J, et al. Retrieval of ice cloud optical thickness from atmospheric infrared sounder (AIRS) measurements [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2254-2267.
- [4] Bantges R J, Russell J E, Haigh J D. Cirrus cloud top-of-atmosphere radiance spectra in the thermal infrared [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1999, 63: 487-498.
- [5] Sunggi Chung, Steven Ackerman, Paul F Van Delst. Model calculations and interferometer measurements of ice-cloud characteristics [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 634-644.
- [6] Huang Hunglung, Yang Ping, Wei Heli, et al. Inference of ice cloud properties from high spectral resolution infrared observations [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2004, 42(4): 842-853.
- [7] Chen Xiuhong. Development of the combined atmospheric radiative transfer software [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 111-114. (in Chinese)
陈秀红. 通用大气辐射传输软件 CART 研制[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2010: 111-114.
- [8] Yang P, Liou K N, Wyser K, et al. Parameterization of scattering and absorption properties of individual ice crystals [J]. *JGR*, 2000, 105: 4699-4718.
- [9] Yang P, Wei H, Huang H L, et al. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near-through far-infrared spectral region [J]. *Appl Opt*, 2005, 44: 5512-5523.
- [10] David R D, Lawrence F R. A summary of the physical properties of cirrus cloud [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29: 970-978.
- [11] Zhao Yanjie, Wei Heli, Xu Qingshan, et al. Simulation of radiative properties of ice particles at 1.315 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 782-786. (in Chinese)
赵燕杰, 魏合理, 徐青山, 等. 1.315 μm 波长冰晶粒子辐射特性的模拟研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 782-786.
- [12] Heymsfield A J, Platt C M R. A parameterization of the particle size spectrum of ice clouds in terms of the ambient temperature and the ice water content[J]. *J Atmos Sci*, 1984, 41: 846-855.