

基于大气红外探空仪和中分辨率成像光谱仪观测的冰云大气红外辐射特性研究

曹亚楠^{1,2} 魏合理^{1,3} 边建⁴

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 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 中国科学技术大学环境光学学院, 安徽 合肥 230031
⁴ 合肥学院数学与物理系, 安徽 合肥 230031

摘要 利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)二级云产品、大气红外探空仪(AIRS)二级大气产品和 AIRS L1B 红外高光谱数据,采用通用大气辐射传输(CART)模式,选择 $9\ \mu\text{m}$ (带宽为 $1070\sim 1135\ \text{cm}^{-1}$)、 $11.03\ \mu\text{m}$ (带宽为 $886\sim 928\ \text{cm}^{-1}$)和 $12.02\ \mu\text{m}$ (带宽为 $815\sim 850\ \text{cm}^{-1}$)波段对冰云大气顶的亮温进行了模拟与分析。对反演冰云参数和 MODIS 云产品下的模拟亮温分别与 AIRS 观测亮温间关系进行了分析与比较,并对反演冰云参数下的模拟亮温和 AIRS 观测亮温的亮温差的概率分布进行了研究。结果表明:基于反演的冰云光学厚度和云顶高度的三波段模拟亮温和 AIRS 实际观测亮温分布一致,模拟计算和 AIRS 实际观测亮温间相关系数达 0.98 以上。 $11.03\ \mu\text{m}$ 和 $12.02\ \mu\text{m}$ 波段模拟计算和 AIRS 实际观测亮温间亮温差主要分布在 $0\sim 5\ \text{K}$, $9\ \mu\text{m}$ 波段亮温差主要分布在 $0\sim \pm 0.5\ \text{K}$ 。建立在反演冰云参数基础上的实际大气条件下的大气辐射特性模拟研究具有准确性和可靠性。

关键词 大气光学;大气辐射;通用大气辐射传输模式;卫星观测;遥感

中图分类号 P351.3; P407.6; P412.27; P413.2+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0901003

Study of Atmospheric Radiative Properties at Infrared Bands under Ice Clouds Based on Atmospheric Infrared Sounder and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Observation

Cao Yanan^{1,2} Wei Heli^{1,3} Bian Jian⁴

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ School of Environmental Sciences and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

⁴ Hefei University, Department of Mathematics and Physics, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Combined atmospheric radiative transfer (CART) model based on moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) level2 cloud products, atmospheric infrared sounder (AIRS) level 2 atmospheric products and AIRS L1B product is used to simulate and analyze brightness temperature at the top of ice clouds atmosphere at $9\ \mu\text{m}$ (band from $1070\ \text{cm}^{-1}$ to $1135\ \text{cm}^{-1}$), $11.03\ \mu\text{m}$ (band from $886\ \text{cm}^{-1}$ to $928\ \text{cm}^{-1}$) and $12.02\ \mu\text{m}$ (band from $815\ \text{cm}^{-1}$ to $850\ \text{cm}^{-1}$) bands. Brightness temperatures between AIRS observation and simulation brightness temperatures with retrieved ice clouds parameters and MODIS cloud product at three bands are compared and analyzed. The probability distribution of brightness temperature difference between simulation with retrieved ice clouds parameters and AIRS observation is studied. Results show that distribution of brightness temperature simulated

收稿日期: 2014-04-22; **收到修改稿日期**: 2014-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61077081)、国家自然科学基金青年基金(41105021)

作者简介: 曹亚楠(1986—),女,博士研究生,主要从事卷云红外辐射特性方面的研究。E-mail: cyn@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 魏合理(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事红外辐射大气传输和卷云红外辐射特性等方面的研究。E-mail: hlwei@aiofm.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

based on retrieved ice clouds optical thickness and cloud top height is consistent with AIRS observation at three bands. Correlation coefficient of brightness temperature between them is bigger than 0.98. The brightness temperature difference between model simulation and AIRS observation at 11.03 μm and 12.02 μm bands is at the range from 0 to 5 K, and 0 to ± 0.5 K at 9 μm band. It is definitely accurate and reliable to simulate atmospheric radiative properties under actual atmospheric conditions with retrieved ice clouds parameters.

Key words atmospheric optics; atmospheric radiation; combined atmospheric radiative transfer model; satellite observations; remote sensing

OCIS codes 010.1290; 010.1615; 010.5620; 010.02820

1 引 言

冰云作为影响全球能量平衡、气候和天气变化的重要因素,很多研究者对冰云大气的辐射特性进行了模拟研究。尤其是对由高空的细小冰晶组成、比较稀薄且光学厚度较小的卷云进行了研究。如李娟等^[1]利用平面平行辐射传输的模式(SBDART)和地球大气太阳辐射和热辐射的辐射传输模式(libRadtran)模拟分析了当卷云内冰晶性质变化时卷云反照率的变化;赵燕杰等^[2]利用离散纵坐标法耦合大气分子吸收,模拟计算了卷云大气的反射特性;曹亚楠等^[3-4]基于通用大气辐射传输(CART)软件研究了中红外以及可见到近红外波段卷云大气的辐射特性。这些研究都是通过数值模拟定量和定性地获得了卷云特性的变化情况。

随着探测技术的发展,机载和星载观测资料提供了云、大气和气溶胶等参数的时空分布,同时也为研究实际大气辐射特性提供了技术支持。Stackhouse等^[5]利用一个二流辐射传输模式研究了卷云大气的辐射传输,并将模拟结果和第一个国际卫星云气候学计划区域实验(FIRE)的密集实地观察(IFO)结果进行了比较。Kahn等^[6]利用考虑多次散射的高分辨率快速辐射传输模式(CHARTS)模拟计算卷云大气顶亮温谱,并且对大气红外探空仪(AIRS)和中分辨率成像光谱仪(MODIS)观测亮温谱携带的卷云有效尺度的信息进行了研究。Kahn等^[7]利用考虑多次散射的CHARTS模拟计算,分析了卷云大气顶的红外高分辨率光谱受云参数(如有效尺度、冰水路径、云高、云厚、粒子形状等)的影响。Huang等^[8]基于逐线积分和离散纵坐标法的卷云大气辐射传输模式利用红外高光谱数据对冰云的光学厚度和有效尺度进行了反演,利用反演的参数、探空廓线和云高等参数模拟计算了冰云的辐射光谱,模拟结果和高分辨率干涉仪(HIS)实际观测的光谱吻合很好。Qing等^[9]开发了一个薄卷云热红外辐射传输模式用于有云卫星数据的同化应用。Garnier等^[10]基于星载激光雷达(CALIPSO)

的红外图像光谱仪(IIR)数据,利用快速辐射传输模式(FASRAD)反演了高云的有效发射率和光学厚度。Wang等^[11]基于AIRS和MODIS观测利用云高分辨率光谱辐射传输模式(HRTM)模拟计算了大气顶向上的辐射,并反演了卷云的性质。这些研究大多基于大气辐射传输模式,利用机载或星载观测资料对冰云的性质进行反演或对冰云大气的辐射光谱进行了模拟计算和比较研究。但是目前对于将反演的冰云性质应用于实际冰云大气中来研究冰云大气的辐射光谱研究较少。

为了对实际冰云大气辐射特性进行研究,本文采用Aqua卫星提供的MODIS云产品MYD06、AIRS二级大气产品和AIRS L1B产品,结合通用大气辐射传输模式^[12-13],模拟计算实际大气情况下冰云大气辐射特性。选择红外大气窗区8~12 μm 波段三个波段进行冰云大气辐射特性的研究:11.03 μm 波段,带宽为886~928 cm^{-1} ; 12.02 μm 波段,带宽为815~850 cm^{-1} ; 9 μm 波段,带宽为1070~1135 cm^{-1} 。本文从模拟亮温和实际观测亮温的分布情况、线性相关性、概率分布三方面来研究实际大气情况下冰云大气辐射特性。

2 资 料

中分辨率成像光谱仪MODIS是美国地球观测系统(EOS)系列卫星之上的一个重要遥感传感器,MODIS星下点的空间分辨率为250~1000 m,光谱覆盖了可见到近红外(0.415~14.235 μm)36个光谱波段。MODIS数据产品经过不同的处理阶段可得到不同等级不同方面的产品。选用Aqua卫星上的MODIS的MYD06云产品数据提供的云顶压强、云顶温度、云的光学厚度、云的有效尺度、云相态等云参数以及地表压强和地表温度等参数^[14],其中MODIS云顶高度是通过计算大气压强随着高度的变化获得。

作为美国地球观测系统EOS系列卫星的一部分,大气红外探空仪AIRS用于提供高精度的温度、

湿度和其他气体廓线^[15]。研究中采用 AIRS L1B 产品提供的大气顶卫星观测到的辐射强度,根据比较观测值和通过 CART 模拟计算值的差,不断迭代获得有效的卷云光学厚度和云顶高度。在本文研究中,每个像元的大气廓线是从 AIRS 二级大气产品读取的大气参数插值得到的。AIRS 二级大气产品提供 15 层水汽密度廓线、28 层温度和臭氧廓线,通过插值获得 50 层包括大气温度、气压、臭氧和水汽密度廓线,作为每个像元的大气廓线。

选择时间上最接近的 AIRS L1B、AIRS L2 产

品和 MODIS 二级云产品数据进行研究,如 AIRS L1B 产品、AIRS 二级大气产品和 MODIS 二级云产品分别选择 2010 年 6 月 18 日 6:35 的数据,MODIS 二级云产品选择 Collection 5.1 版本数据实现 AIRS 和 MODIS 经纬度、云参数和地表参数等的匹配,把冰云的这些参数作为输入参数输入到 CART 中进行模拟计算。匹配后的云参数和地表温度如图 1 所示。这里仅研究冰云的辐射特性,取 MODIS 云相为 2(不透明冰云)或 5(透明冰云)的像元加权平均匹配到 AIRS 像元相应的产品上。

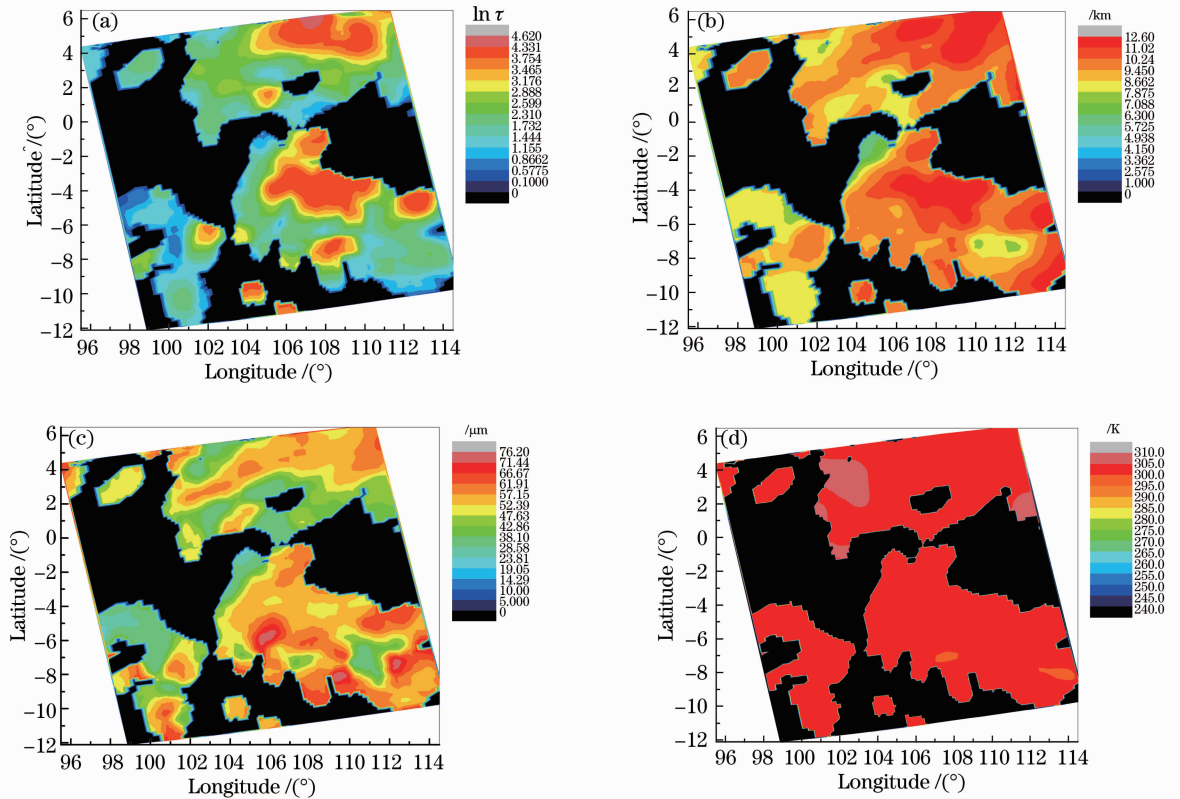


图 1 匹配的云参数和地表参数。(a)光学厚度;(b)云顶高度;(c)有效尺度;(d)地表温度

Fig. 1 Cloud parameters and surface parameter collocated. (a) Optical thickness; (b) cloud top height; (c) effective size; (d) surface temperature

3 数值模拟与分析

将上述经过匹配的冰云参数、地表参数和插值获得的大气廓线以及几何角度作为输入参数,利用 CART 软件对实际大气条件下冰云大气的红外辐射特性进行研究。由于地表类型复杂,假定地表类型为陆地型,对冰云红外大气辐射特性进行模拟计算。其中,通过迭代法不断调节 AIRS 在 $1070 \sim 1135 \text{ cm}^{-1}$ 波段红外高分辨率亮温与模拟亮温间亮温差达到阈值,从而反演出冰云的光学厚度和云顶高度。以下进行几方面的比较:把利用 $1070 \sim$

1135 cm^{-1} 波段反演的冰云光学厚度和云顶高度作为输入参数进行模拟计算的亮温和 AIRS 实际观测的亮温分布情况进行比较;把利用反演的冰云光学厚度和云顶高度与 MODIS 云产品参数分别作为输入参数模拟计算的亮温和 AIRS 实际观测亮温进行比较;对反演冰云光学厚度和云顶高度作为输入参数模拟计算的亮温和 AIRS 实际观测亮温的亮温差的概率分布进行研究。通过以上三方面内容来研究实际大气情况下冰云大气红外辐射特性。在未说明的情况下,文中所说的模拟计算是指建立在反演的

冰云参数基础上的模拟计算。

3.1 模拟计算和 AIRS 实际观测亮温分布

对于红外波段,文献[16]根据冰云在 $11\ \mu\text{m}$ 和 $12\ \mu\text{m}$ 两个波长上吸收的差别来遥感冰云的性质,如有效尺度和光学厚度。另外, 8.5 、 11 、 $12\ \mu\text{m}$ 用于确定云相态^[17],所以两个波段冰云吸收的准确与否对冰云性质的反演尤为重要。对于大气顶的观测来说, $11.03\ \mu\text{m}$ (带宽为 $886\sim 928\ \text{cm}^{-1}$)、 $12.02\ \mu\text{m}$ (带宽为 $815\sim 850\ \text{cm}^{-1}$)两波段亮温在不同的冰云的光学厚度、有效尺度以及云顶高度下不尽相同,即受冰云参数的影响。而 $9\ \mu\text{m}$ (带宽 $1070\sim 1135\ \text{cm}^{-1}$)波

段冰云大气顶的亮温主要受冰云的光学厚度以及云顶高度的影响,所以研究中选择了该波段反演的冰云的光学厚度和云顶高度作为输入参数对实际冰云大气下云顶亮温进行研究。下面选择 9 、 11 、 03 、 $12.02\ \mu\text{m}$ 三个波段,利用反演的冰云参数和 MODIS 云产品参数结合 CART 软件对实际大气条件下冰云的红外辐射特性进行研究。图 2 为三波段 AIRS 实际观测(左)和反演的的光学厚度和云顶高度下模拟计算(右)的亮温分布图。图 2(a)与(b)、(c)与(d)和(e)与(f)分别是 11.03 、 12.02 、 $9\ \mu\text{m}$ 三波段的情

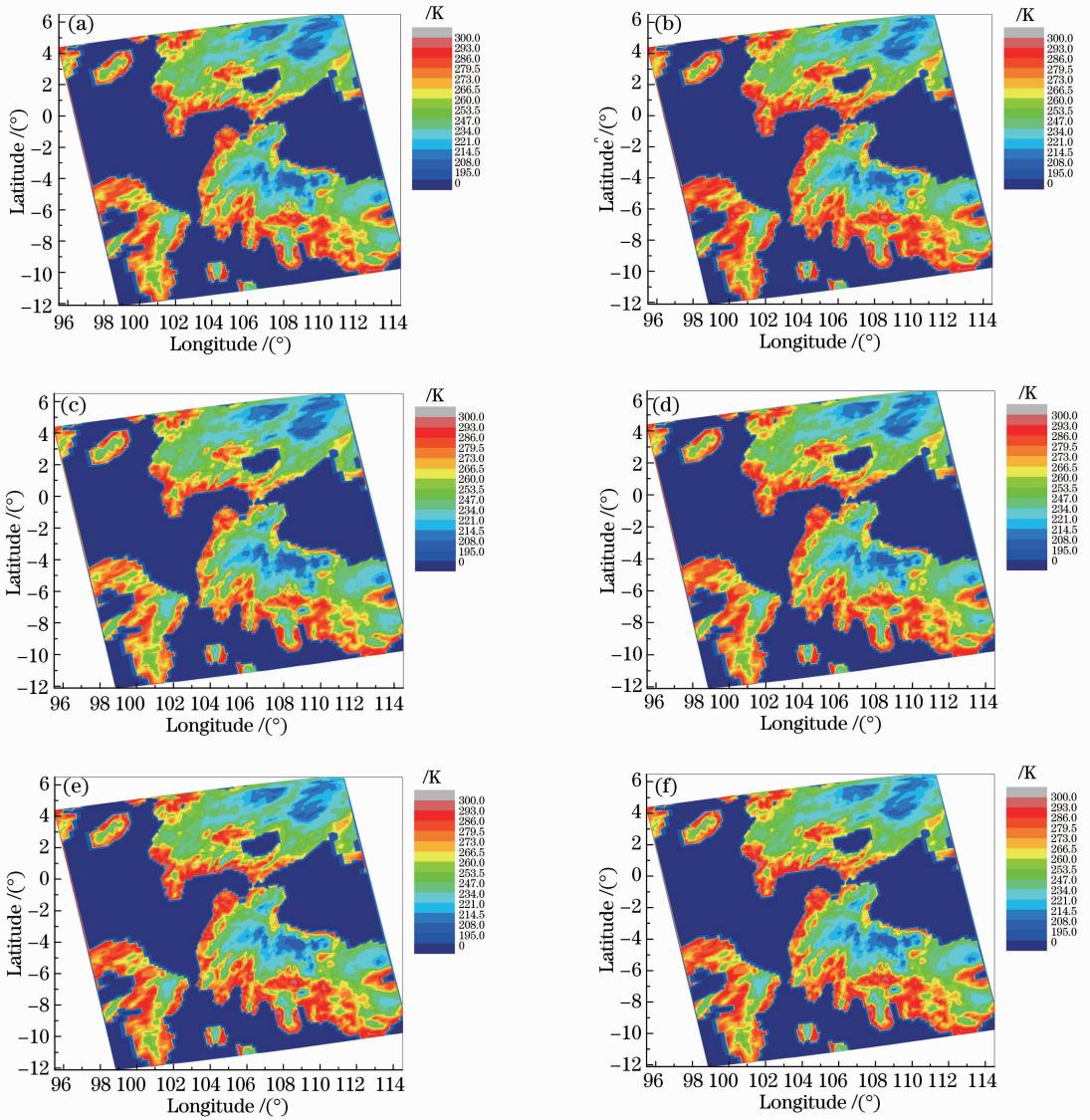


图 2 三波段 AIRS 观测(左)和反演的的光学厚度和云顶高度下模拟计算(右)的亮温分布。(a),(b) $11.03\ \mu\text{m}$ 波段;
(c),(d) $12.02\ \mu\text{m}$ 波段;(e),(f) $9\ \mu\text{m}$ 波段

Fig. 2 Distributions of brightness temperature of AIRS observation (left) and simulation (right) based on retrieved optical thickness and cloud top height at three bands. (a), (b) $11.03\ \mu\text{m}$ band; (c), (d) $12.02\ \mu\text{m}$ band; (e), (f) $9\ \mu\text{m}$ band

况。图中深蓝色的区域为假定为晴朗无云的天空。从图 2(a)~(f) 三个波段的模拟计算和 AIRS 实际观测的亮温分布对比可以看出,低亮温对应较厚的冰云、高亮温对应薄冰云、模拟和 AIRS 实际观测的亮温分布一致。

3.2 模拟计算和 AIRS 实际观测亮温的线性相关性

为了进一步研究基于 CART 软件模拟计算实

际大气条件下冰云大气红外辐射特性的准确性和可行性,研究了反演和 MODIS 光学厚度和云顶高度下三波段实际观测和模拟计算的亮温之间的关系,图 3 为反演冰云参数和 MODIS 冰云参数下三波段模拟计算和 AIRS 实际观测的亮温散点关系图。从图 3(a)、(c)、(e) 可以看出,当反演的冰云光学厚度和云顶高度作为输入参数时,11.03 μm 、12.02 μm

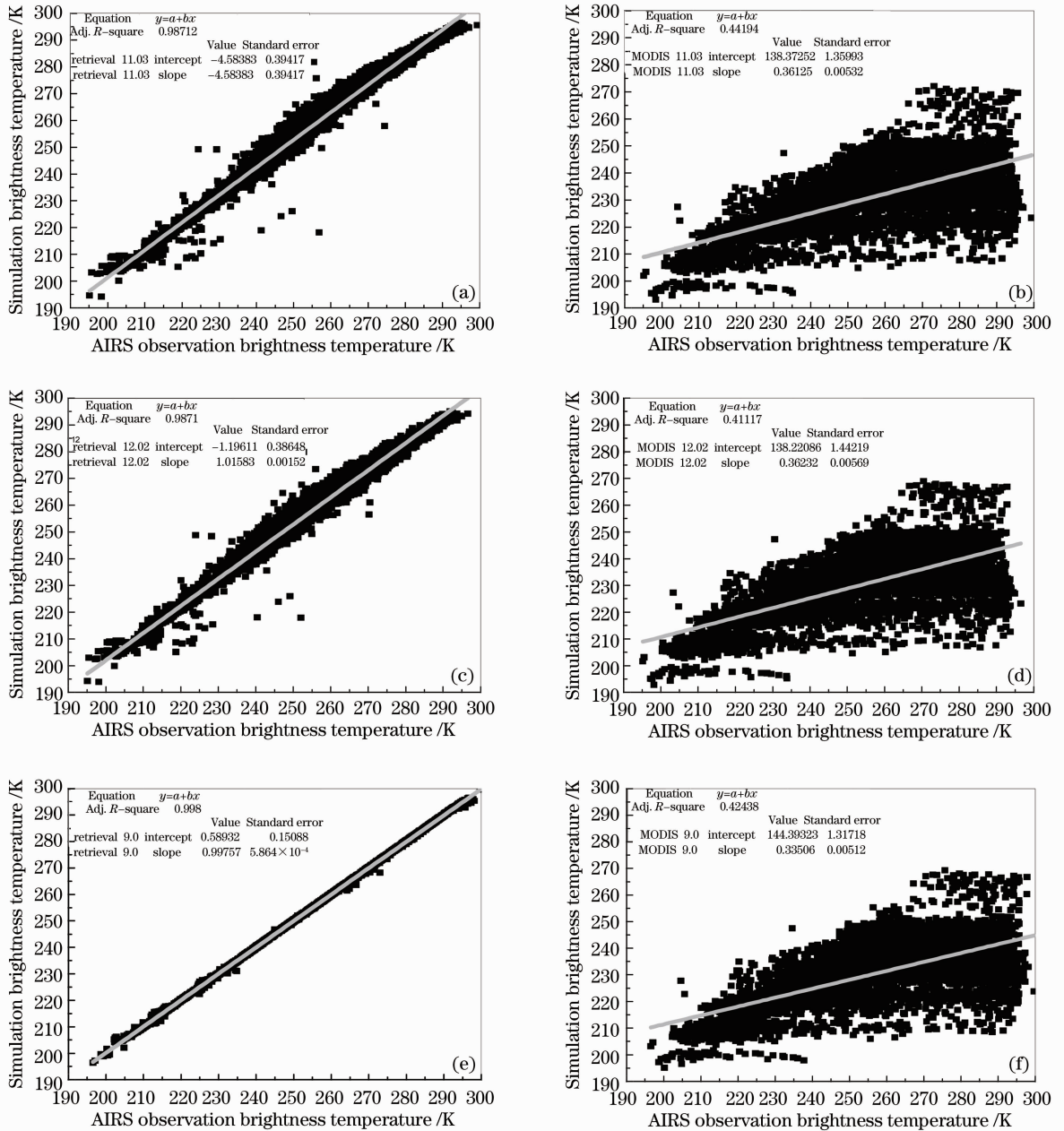


图 3 三波段以反演参数(左)和 MODIS 云参数(右)为基础的模拟分别与 AIRS 观测亮温间的散点关系图。

(a), (b) 11.03 μm 波段; (c), (d) 12.02 μm 波段; (e), (f) 9 μm 波段

Fig. 3 Scattering diagrams of brightness temperature of AIRS observation and simulation based on cloud parameters and cirrus top height from retrieval (left) and MODIS (right) at three bands. (a), (b) 11.03 μm band; (c), (d) 12.02 μm band; (e), (f) 9 μm band

波段模拟计算和 AIRS 观测的亮温间线性相关系数达 0.98 以上,9 μm 波段模拟计算和 AIRS 观测的亮温间线性相关系数达 0.99 以上,具有良好的线性相关性。从图 3(b)、(d)、(f)可以看出,当 MODIS 的冰云光学厚度和云顶高度作为输入参数时,三波段模拟计算和 AIRS 观测的亮温间线性相关系数约为 0.4,线性相关性较差。CART 模式中冰云的性质是利用 Yang 等^[18-19]建立的两个光学特性数据库进行组合,得到了 5 种粒子:平板状、实心柱状、空心柱状、子弹花状和聚合物状粒子的光学特性数据库,而 MODIS Collection 5 产品采用光滑的冰晶粒子进行研究。所以不同的冰晶粒子的微物理性质的选择也会对模拟结果产生一定的影响。总的来说,相对于 MODIS 云产品提供的冰云光学厚度和利用 MODIS 云产品计算出的云顶高度来说,基于红外波段(1070~1135 cm^{-1} 波段)反演的冰云光学厚度和云顶高度,结合 CART 模拟计算实际大气条件下冰云大气红外辐射和实际观测吻合较好,可见利用红外波段反演的冰云参数,结合 CART 模拟计算实际大气条件下冰云大气红外辐射的方法准确可行。而直接用 MODIS 匹配的云参数,可能是由于 AIRS 的空间分辨力比 MODIS 低很多,其平均的云参数特性与 AIRS 的等效云参数有一定偏差。

3.3 模拟计算和 AIRS 实际观测亮温的亮温差概率分布

为了进一步研究基于 AIRS 和 MODIS 卫星观测资料,以反演的冰云光学厚度和云顶高度作为输入参数模拟计算实际大气条件下冰云大气红外辐射特性的准确性,对模拟计算和 AIRS 观测亮温差的概率分布进行了研究与分析,如图 4 所示。从图中可以看出 11.03 μm 和 12.02 μm 波段两者亮温差分布在 0~5 K 之间概率最大,而 9 μm 波段亮温差分布在 0~ ± 0.5 K 之间概率最大。9 μm 波段亮温差相对于 11.03 μm 和 12.02 μm 波段来说较小,这是因为 9 μm 波段,即 1070~1135 cm^{-1} 波段冰云大气顶亮温主要随着冰云的光学厚度和云顶高度的变化而变化,这也是选择该波段反演冰云的光学厚度和云顶高度的原因,而在反演冰云时通过调整云高和冰云光学厚度使观测和计算的亮温差最小,因此该波段用反演的参数模拟计算的亮温与 AIRS 实际观测的亮温差最小。而 11.03 μm (886~928 cm^{-1})和 12.02 μm (815~850 cm^{-1})波段冰云大气顶亮温不仅受冰云光学厚度和云顶高度的影响,还随着冰云有效尺度的变化而变化。冰云有效尺度越大,亮温的斜率越小,有效尺度越小,亮温的斜率越大。本研究中选择 MODIS 云产品中冰云的有效尺度,会对 11.03 μm (886~928 cm^{-1})和 12.02 μm (815~850 cm^{-1})波段模拟计算的结果产生一定的影响。

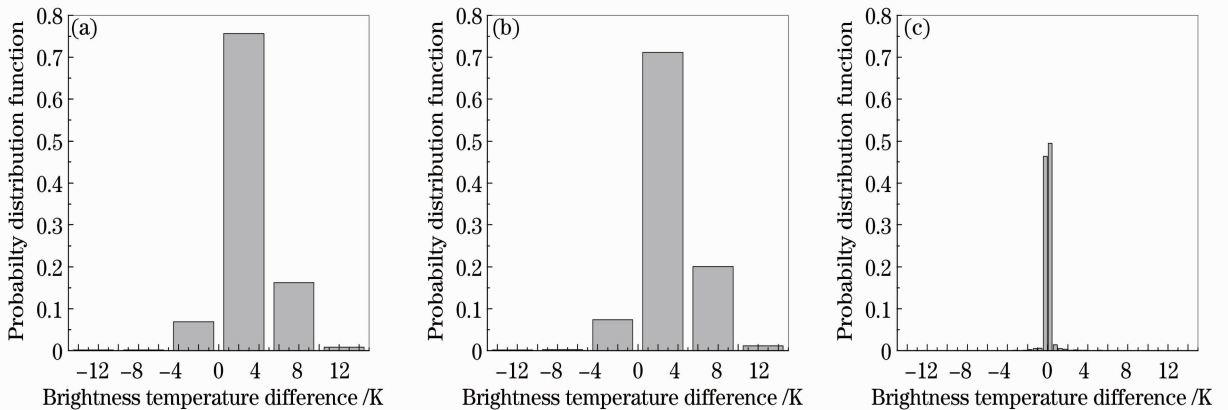


图 4 三波段反演光学厚度和云顶高度基础上的模拟计算和 AIRS 观测亮温差概率分布。(a) 11.03 μm 波段; (b) 12.02 μm 波段; (c) 9 μm 波段

Fig. 4 Probability distribution of brightness temperature difference between AIRS observation and simulation based on retrieved optical thickness and cloud top height at three bands. (a) 11.03 μm band; (b) 12.02 μm band; (c) 9 μm band

4 结 论

采用 MODIS 二级云产品 MYD06、AIRS 二级大气产品和 AIRS L1B 产品,结合 CART 软件,模

拟计算实际大气条件下冰云大气红外辐射特性。其中用于模拟计算的 MODIS 冰云参数(如光学厚度、有效尺度、云顶高度和云相态)根据 AIRS 和 MODIS 经纬

度进行匹配。选择红外大气窗区 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段三个波段： $11.03\ \mu\text{m}$ (带宽为 $886\sim 928\ \text{cm}^{-1}$)、 $12.02\ \mu\text{m}$ (带宽为 $815\sim 850\ \text{cm}^{-1}$) 和 $9\ \mu\text{m}$ (带宽为 $1070\sim 1135\ \text{cm}^{-1}$) 波段对冰云的红外辐射特性进行研究。将利用红外波段 $1070\sim 1135\ \text{cm}^{-1}$ 波段反演的冰云光学厚度和云顶高度作为输入参数进行模拟计算和利用 MODIS 云产品模拟计算的冰云大气顶亮温分别与 AIRS 观测亮温的分布以及它们之间线性关系进行了分析与比较,并对反演基础上的模拟计算和 AIRS 观测亮温的亮温差的概率分布进行了研究。研究结果表明:基于反演的冰云光学厚度和云顶高度的三波段模拟计算和 AIRS 实际观测亮温分布一致。 $11.03\ \mu\text{m}$ 和 $12.02\ \mu\text{m}$ 波段模拟计算的亮温和 AIRS 实际观测亮温间线性相关系数达 0.98 以上, $9\ \mu\text{m}$ 波段线性相关系数达 0.99 以上,三波段都具有很好的相关性。 $11.03\ \mu\text{m}$ 和 $12.02\ \mu\text{m}$ 波段模拟计算和 AIRS 实际观测亮温间亮温差主要分布在 $0\sim 5\ \text{K}$ 之间, $9\ \mu\text{m}$ 波段亮温差主要分布在 $0\sim \pm 0.5\ \text{K}$ 之间。可见建立在反演冰云参数基础上的冰云实际大气条件下的大气辐射特性模拟研究具有一定的准确性和可靠性。

利用 MODIS 和 AIRS 观测数据,以及利用红外波段反演的冰云光学厚度和云顶高度,结合 CART 模拟计算实际大气条件下冰云大气辐射特性和 AIRS 观测结果具有较好的一致性,模拟计算值准确可靠,这对研究冰云对地气系统的加热和冷却作用的研究有重要的意义。同时也为实际天气下冰云大气辐射特性研究提供了一种新方法。

参 考 文 献

- Li Juan, Mao Jietai. Simulation about influences of ice property changes on cirrus radiative properties [J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(2): 9-13.
李娟,毛节泰.冰晶性质对卷云辐射特征影响的模拟研究[J].气象,2006,32(2):9-13.
- Zhao Yanjie, Wei Heli, Chen Xiuhong, *et al.*. Infrared radiative properties of cirrus clouds in shortwave spectral region [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(9): 1449-1453.
赵燕杰,魏合理,陈秀红,等.卷云短波红外辐射特性[J].强激光与粒子束,2007,19(9):1449-1453.
- Cao Yanan, Chen Xiuhong, Wei Heli. Study of the effects of cirrus altitude on the atmospheric infrared spectral radiation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 1965-1970.
曹亚楠,陈秀红,魏合理.卷云高度对大气的红外光谱辐射影响的研究[J].红外与激光工程,2012,41(8):1965-1970.
- Cao Yanan, Wei Heli, Chen Xiuhong, *et al.*. Simulations of the reflectance of cirrus clouds in shortwave spectral region [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0801004.

- 曹亚楠,魏合理,陈秀红,等.卷云短波反射特性的模拟计算研究[J].光学学报,2012,32(8):0801004.
- Paul W Stackhouse Jr, Graeme L Stephens. A theoretical and observation study of the radiative properties of cirrus: results from FIRE 1986 [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1991, 48(18): 2044-2055.
- B H Kahn, A Eldering, S A Clough, *et al.*. Near micron-sized cirrus cloud particles in high-resolution infrared spectra: an orographic case study [J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(8): 24-1-4.
- B H Kahn, A Eldering, M Ghil, *et al.*. Sensitivity analysis of cirrus cloud properties from high-resolution infrared spectra. Part I: methodology and synthetic cirrus [J]. J Climate, 2004, 17(24): 4856-4870.
- H L Huang, P Yang, H L Wei, *et al.*. Inference of ice cloud properties from high-spectral resolution infrared observations [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2004, 42(4): 842-853.
- Y Qing, K N Liou, S C Ou, *et al.*. Interpretation of AIRS data in thin cirrus atmospheres based on a fast radiative transfer model [J]. J Atmos Sci, 2007, 64(11): 3827-3842.
- A Garnier, J Pelon, P Dubuisson, *et al.*. Retrieval of cloud properties using CALIPSO imaging infrared radiometer. Part I: effective emissivity and optical depth [J]. J Appl Meteorol Clim, 2012, 51(7): 1407-1425.
- C Wang, P Yang, S Platnick, *et al.*. Retrieval of ice cloud properties from AIRS and MODIS observations based on a fast high-spectral-resolution radiative transfer model [J]. J Appl Meteor Climatol, 2013, 52(3): 710-726.
- Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2007, 2(6): 446-450.
魏合理,陈秀红,饶瑞中.通用大气辐射传输软件 CART 介绍[J].大气与环境光学学报,2007,2(6):446-450.
- Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming. Combined atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3360-3366.
魏合理,陈秀红,戴聪明.通用大气辐射传输软件(CART)及其应用[J].红外与激光工程,2012,41(12):3360-3366.
- S Platnick, M D King, S A Ackerman, *et al.*. The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2003, 41(2): 459-473.
- H H Aumann, M T Chahine, C Gautier, *et al.*. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objection, data products, and processing systems [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2003, 41(2): 253-264.
- F Parol, J C Buriez, G Brognies, *et al.*. Information content of AVHRR channels 4 and 5 with respect to particle size [J]. J Appl Meteorol, 1991, 30(7): 973-984.
- B A Baum, 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]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(D9): 11781-11792.
- P Yang, K N Liou, K Wyser, *et al.*. Parameterization of scattering and absorption properties of individual ice crystals [J]. J Geophysical research, 2000, 105(D4): 4699-4718.
- P Yang, H L Wei, H L Huang, *et al.*. Scattering and absorption properties database for nonspherical ice particles in the near-through far-infrared spectral region [J]. Appl Opt, 2005, 44(26): 5512-5523.