

doi: 10.3788/gzxb20144306.0601001

# 利用 MODIS 资料模拟计算水云大气红外辐射特性

曹亚楠<sup>1,2</sup>, 魏合理<sup>1</sup>, 徐青山<sup>1</sup>, 戴聪明<sup>1</sup>, 陈秀红<sup>1</sup>

(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, 合肥 230031)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:** 利用 MODIS 二级云产品和大气产品资料, 采用通用大气辐射传输软件模拟计算了水云存在的情况下 8.55  $\mu\text{m}$ 、11.03  $\mu\text{m}$  和 12.02  $\mu\text{m}$  波段水云大气顶亮温, 并对三波段的 MODIS 云顶观测亮温和模拟计算的亮温进行了对比分析. 结果表明: 利用 MODIS 卫星观测云参量、大气参量和空间几何参量, 结合通用大气辐射传输软件模拟计算的亮温和 MODIS 云顶亮温分布基本一致, 亮温差较小, 主要分布在  $-10\text{ K}\sim 10\text{ K}$  附近. 模拟计算的三个通道亮温差 BTD(8.55~11.03  $\mu\text{m}$ ) 和 BTD(11.03~12.02  $\mu\text{m}$ ) 的变化符合水云的情况.

**关键词:** 大气辐射; 通用大气辐射传输软件; 数值模拟; 水云; 大气光学; 卫星观测; MODIS; 云参量; 大气参量

中图分类号: O43; P407.6; P412.27; P413.2+2; P422; P426.5 文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)060601001-8

## Simulation of Atmospheric Radiative Properties at IR Bands under Water Clouds Based on MODIS Data

CAO Yan-an<sup>1,2</sup>, WEI He-li<sup>1</sup>, XU Qing-shan<sup>1</sup>, DAI Cong-ming<sup>1</sup>, CHEN Xiu-hong<sup>1</sup>

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The combined atmospheric radiative transfer model based on MODIS level2 cloud products and atmospheric products was used to simulate brightness temperature at the top of atmosphere with water clouds at 8.55  $\mu\text{m}$ , 11.03  $\mu\text{m}$  and 12.02  $\mu\text{m}$  bands. The brightness temperatures between model and MODIS observation at 8.55  $\mu\text{m}$ , 11.03  $\mu\text{m}$  and 12.02  $\mu\text{m}$  bands were compared and analyzed. Results show that brightness temperature simulated by Combined Atmospheric Radiative Transfer model based on satellite cloud parameters, atmosphere parameters and space geometric parameters is basically consistent with MODIS observation. The brightness temperature difference between them is quite small. And brightness temperature difference between model and MODIS is mostly at the range of  $-10\text{ K}\sim 10\text{ K}$ . Varieties of brightness temperature BTD(8.55~11.03  $\mu\text{m}$ ) and BTD(11.03~12.02  $\mu\text{m}$ ) of model were accordant with conditions under water clouds.

**Key words:** Atmospheric radiation; Combined atmospheric radiative transfer model; Simulation; Water clouds; Atmospheric optics; Satellite observations; MODIS; Cloud parameters; Atmospheric parameters

**OCIS Codes:** 010.1615; 010.5620; 350.5610; 290.1090; 290.5890

## 0 引言

云作为影响全球能量平衡、气候和天气变化的重

要因素, 其辐射特性也越来越多地引起人们关注. 一般采用数值模拟方法对有云大气的辐射特性进行研究. 数值模拟可以定量和定性地研究云特性的变化情况,

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61077081)资助

第一作者: 曹亚楠(1986-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气红外辐射特性. Email: cyn@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者): 魏合理(1965-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为红外辐射大气传输和卷云红外辐射特性. Email: hlwei@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2013-09-17; 录用日期: 2014-01-27

<http://www.photon.ac.cn>

但是在实际大气条件下需要输入实际的大气参量廓线和云参量,如云光学厚度、有效尺度和云顶高度等.曹亚楠等<sup>[1]</sup>利用 MODIS 二级云产品对北京上空的卷云云顶高度、光学厚度和有效尺度等进行了统计分析,并且得出卷云参量的概率分布情况.为进一步进行卫星辐射的数值模拟研究提供了基础.

卫星辐射的数值模拟是实现卫星资料直接同化的重要环节.卫星辐射资料的直接同化,通常采用辐射传输模式模拟卫星辐射<sup>[2-5]</sup>.由于缺乏云参量资料,很多研究多是基于晴空条件进行的.如陈仁升等<sup>[2]</sup>采用 NCEP/NCAR 再分析资料,使用 Bird 模型计算了晴空条件下的直接辐射和散射辐射,通过简化 MODTRAN 模型中云对短波辐射处理,实现了对我国黑河流域总辐射较为理想的模拟.傅炳珊等<sup>[3]</sup>将极轨卫星产品 TOVS 资料作为初始资料,利用 MODTRAN3 分别计算了晴空和有云情况下 5 个层次的观测波段的太阳直接辐射和散射辐射,并和探空资料计算的辐射值进行了比较,发现晴空情况下基本一致,有云存在一定误差.随着卫星探测技术的发展,通过卫星观测资料反演可以得到云、大气和气溶胶等产品.卫星观测资料提供了云、大气和气溶胶等参量的时空分布,同时也为利用卫星资料研究大气的辐射传输特性提供了技术支持.目前,云参量卫星资料已经应用到数值模拟计算中的研究.鄢俊一等<sup>[4]</sup>利用美国“风暴分析预报中心”开发的中尺度模式 ARPS 的资料分析系统 ADAS,把地面报文资料和卫星红外云图资料成功地加入到数值模式中,分析表明加入卫星资料的综合云分析过程,明显提高了预报和模拟效果.卿文武等<sup>[5]</sup>利用 NCEP/NCAR 再分析资料、EOS-AURA 卫星和 FY-2C 气象卫星反演资料,在 Bird 模型基础上对晴空条件下的太阳直接辐射进行了计算,结合 FY-2C 气象卫星总云量和云类反演数据,引入一个线性方程,对实际天气状况下的直射日曝辐量进行了计算.但现有的研究主要是基于卫星资料对太阳直接辐射进行现有的研究,对于有云大气顶的辐射情况研究较少.

为了对给定地区实际天气状况下有云大气辐射进行研究,本文采用 MODIS 云产品 MYD06 和大气产品 MYD07 数据,结合通用大气辐射传输软件(Combined Atmospheric Radiative Transfer model, CART)<sup>[6-7]</sup>模拟计算给定地区大气顶水云情况下大气辐射特性.选择 MODIS 三个长波通道进行水云大气辐射特性的研究:第 29 通道  $1\ 170\ \text{cm}^{-1}$  ( $8.55\ \mu\text{m}$ ) 波段,带宽为  $1\ 149\sim 1\ 190\ \text{cm}^{-1}$ ;第 31 通道  $907\ \text{cm}^{-1}$  ( $11.03\ \mu\text{m}$ ) 波段,带宽为  $886\sim 928\ \text{cm}^{-1}$ ;第 32 通道  $832\ \text{cm}^{-1}$  ( $12.02\ \mu\text{m}$ ) 波段,带宽为  $815\sim 850\ \text{cm}^{-1}$ ,并对模式模

拟计算的亮温和 MODIS 对应波段的实际测量的云顶亮温进行了比较分析.

## 1 资料及数据预处理

中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)是美国地球观测系统(Earth Observing System, EOS)计划中 Terra 和 Aqua 卫星携带的重要传感器<sup>[8]</sup>.利用 MODIS 资料开展云的研究主要包括云检测、云顶参量反演、云物理和光学特性参量等反演. MODIS 数据产品经过不同的处理阶段可得到不同级的产品,其中二级产品就是在一级产品的基础上应用相应的算法得到地球物理参量数据.研究选用 MODIS 的 MYD06 云产品数据和 MYD07 大气产品数据.

MYD06 云产品<sup>[9]</sup>提供的数据有云顶压强、云顶温度、地表压强、地表温度、云的光学厚度、云的有效尺度、经纬度、太阳天顶角和方位角、卫星观测天顶角和方位角、云相态以及 7 个通道的云顶亮温等. MYD07 大气产品提供的数据有太阳天顶角和方位角、卫星观测天顶角和方位角、地表温度、地表压强、反演的温度廓线(20 层)以及反演的露点温度廓线(20 层)等.本研究中,MYD06 云产品中光学厚度和有效尺度的分辨率为  $1\ \text{km}$ ,其他数据分辨率为  $5\ \text{km}$ .

为了研究某地区实际大气条件下有云大气辐射特性,选择同一时刻云产品和大气产品数据,如 MYD07\_L2\_A2007220\_0450\_005\_2010112092134.hdf, MYD06\_L2\_A2007220\_0450\_005\_2007224020924.hdf.选择  $200\times 200$  大小的数据进行研究.利用卫星数据预处理软件读取每个像元的大气参量、云特性参量及空间几何参量.空间几何参量包括:每个像元的观测天顶角和方位角、经纬度以及太阳天顶角和方位角.

利用卫星预处理程序对 MYD06 云产品读取云的有效尺度、光学厚度、云顶压强、云顶温度、云相态、地表压强和地表温度,并由文献<sup>[10]</sup>公式计算出云顶高度.所研究的区域中各参量如图 1.

利用卫星预处理程序读取 MYD07 大气产品每个象元的 20 层的温度和湿度廓线,并插值成 35 层.由于大气辐射传输软件 CART 将大气分为 50 层,读取的 MOD07 数据,在  $20\ \text{km}$  以上的大气廓线用美国标准大气廓线.获得的大气廓线为 50 层,包括温度(K),压强(hPa),大气密度( $\text{mole}/\text{m}^3$ ),水汽密度(ppmv),臭氧密度(ppmv).其中臭氧密度(ppmv)用美国标准大气廓线数据.图 2 是所研究区域的第 20 个的像元的大气廓线.

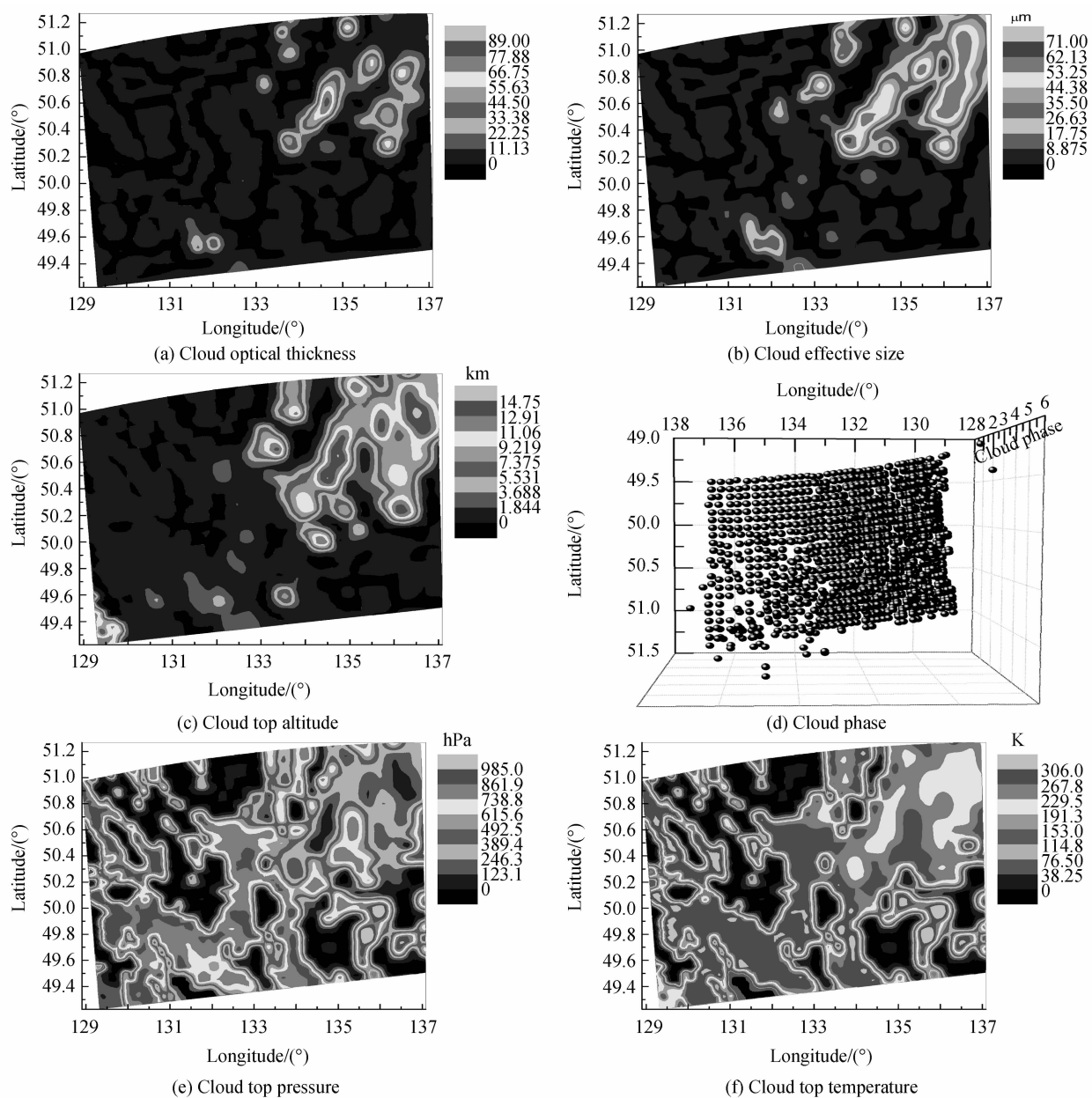
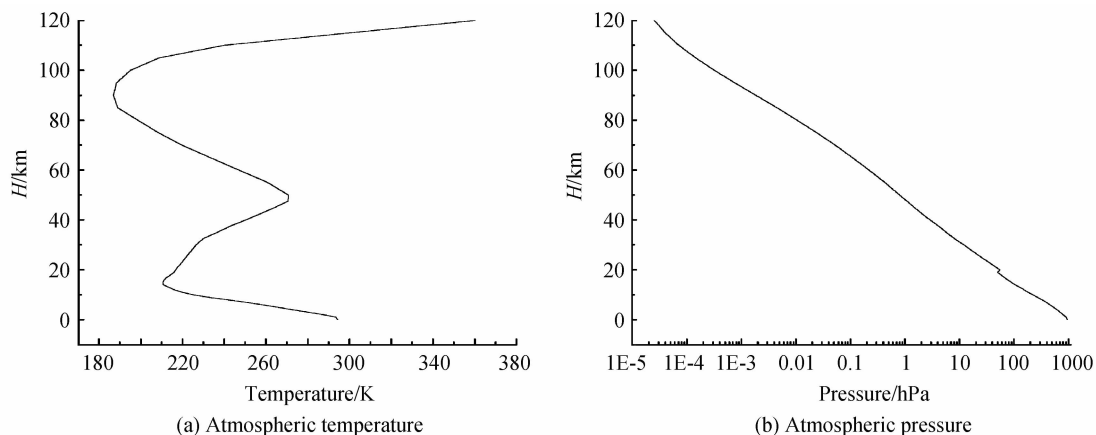


图 1 MODIS 云产品参量  
Fig. 1 Cloud parameters from MODIS products



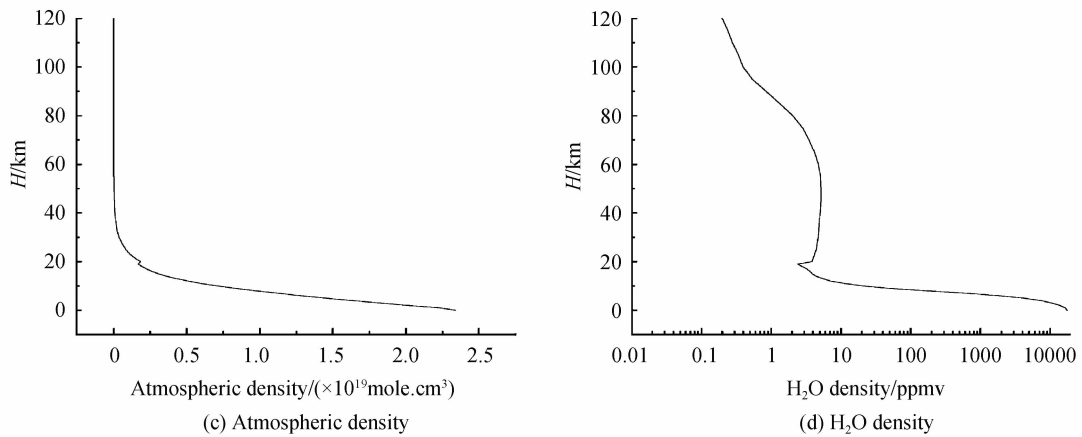


图2 第20个像元的大气廓线  
Fig.2 Atmospheric profile of the twentieth pixel

## 2 大气顶大气辐射特性模拟计算研究

### 2.1 通用大气辐射传输软件——CART

通用大气辐射传输软件(Combined Atmospheric Radiative Transfer model, CART)是一套基于我国大气模式的中分辨率大气辐射传输计算软件<sup>[6-7]</sup>,可以快速计算大气光谱透射率、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,增加了计算卷云和水云大气辐射的功能.云辐射传输模式中云层内考虑云粒子(水滴或冰晶粒子)、大气分子和气溶胶共同的散射作用,云层以外考虑了大气分子和气溶胶的作用.计算的总的辐射包括了热辐射(路径程辐射、地表发射辐射和热辐射散射辐射)、散射太阳辐射和地表反射辐射.

在水云辐射传输模式构建中<sup>[11]</sup>,需要水云的光学性质参量,包括消光效率因子、单次散射反照率和散射相函数等参量.水云的光学特性利用球形 Mie 散射理论<sup>[12]</sup>计算得到.根据水云的尺度谱分布将光学特性平均并利用插值法得到可见到远红外波段  $1\text{ cm}^{-1}$  光谱间隔上的平均光学特性.最后将它们的光学性质拟合成水云的有效半径的函数,建立水云在  $1\text{ cm}^{-1}$  光谱间隔上的光学性质参量化系数数据库.

将水云参量化系数数据库作为内部数据库,当给定云的有效尺度和类型时,可根据拟合的函数和内部数据库计算得到云的平均光学性质参量.当给定云在可见光波段的光学厚度  $\tau_{\text{vis}}$  时,任意波长上云的光学厚度  $\tau_c$  为

$$\tau_c = \frac{\langle Q_{e,\lambda} \rangle}{\langle Q_{e,\text{vis}} \rangle} \tau_{\text{vis}} = \tau_{\text{cs}} + \tau_{\text{ca}} = \frac{\langle Q_{s,\lambda} \rangle + \langle Q_{a,\lambda} \rangle}{\langle Q_{e,\text{vis}} \rangle} \tau_{\text{vis}} \quad (1)$$

式中  $\tau_{\text{cs}}$  和  $\tau_{\text{ca}}$  分别表示云的散射和吸收光学厚度,  $\langle Q_{e,\text{vis}} \rangle$  为可见光波段云的平均消光效率因子,  $\langle Q_{s,\lambda} \rangle$  和  $\langle Q_{a,\lambda} \rangle$  分别是任意波长云的平均散射效率因子和吸收效率因子.云层高度上的光学厚度、单次散射反照率和散射相函数为

$$\tau = \tau_{\text{ms}} + \tau_{\text{ma}} + \tau_{\text{mc}} + \tau_{\text{as}} + \tau_{\text{aa}} + \tau_{\text{cs}} + \tau_{\text{ca}} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{\tau_{\text{ms}} + \tau_{\text{as}} + \tau_{\text{cs}}}{\tau_{\text{ms}} + \tau_{\text{ma}} + \tau_{\text{mc}} + \tau_{\text{as}} + \tau_{\text{aa}} + \tau_{\text{cs}} + \tau_{\text{ca}}} \quad (3)$$

$$p = \frac{\tau_{\text{ms}} * p_m + \tau_{\text{as}} * p_a + \tau_{\text{cs}} p_c}{\tau_{\text{ms}} + \tau_{\text{as}} + \tau_{\text{cs}}} \quad (4)$$

式中  $\tau_{\text{ms}}$ ,  $\tau_{\text{ma}}$ ,  $\tau_{\text{mc}}$ ,  $\tau_{\text{as}}$ ,  $\tau_{\text{aa}}$ ,  $\tau_{\text{ca}}$  分别表示分子散射、分子吸收、分子连续吸收、气溶胶散射和吸收光学厚度,以及云的散射和吸收光学厚度,可通过晴空大气辐射传输模式计算;  $p_m$ ,  $p_a$  和  $p_c$  分别表示分子、气溶胶和云的散射相函数.

辐射传输的边界条件是:上边界为大气顶,入射源为太阳的平行光辐照度.下垫面边界条件为地表,由地面温度、地表反照率和地表发射率表征.在本文的计算中,地表温度采用 MODIS 的产品中的地表温度,由于地表类型复杂,发射率假定为海水型地表发射率,地表反照率为海水型地表反射率.在厚的水云的情况下,红外波段地表对大气顶向上的热辐射可以忽略.

将云和大气参量,用离散纵坐标法(Discrete Ordinates Radiative Transfer program, DISORT)计算得到给定波段的辐亮度,利用基于 DISORT 按光学厚度重排的快速算法<sup>[13]</sup>,快速得到给定波段的各个波数点上的光谱辐亮度,并积分得到总辐亮度.红外波段通常用亮温来表示辐射量,亮温是指物体的辐射能量用同辐射量的黑体温度表示,也成为等效黑体温度.本文把计算的波段内的辐亮度转化为等效亮温,并以亮温来分析.

### 2.2 模拟结果与分析

由大量水滴组成的水云,一方面要反射太阳短波辐射,另一方面,吸收低层大气和地表发射的长波辐射,并以较低的温度向外发射辐射.因而云和辐射的相互作用对地气系统的冷却和加热作用对天气变化和气候变化的影响不可忽视.

在有云条件下大气辐射传输过程中需要设定四类基本参量:几何参量、地表参量、大气参量和云参量.其

中,几何参量包括太阳天顶角和方位角、观测天顶角和方位角;地表参量包括地表类型和地表温度;大气参量包括大气温度廓线、水汽含量和臭氧廓线等;影响辐射传输过程的云参量主要有云的光学厚度、有效尺度、云相态、云顶高度和云顶温度等.在输入参量的获取中,只计算了云相态是1的不透明水云或者云相态为4的透明水云.

由于实际天气情况下,云不仅可能是冰云和水云,还可能是混合相云,同时云层也可能是多层. Ramaswamy 等<sup>[14]</sup>就指出卷云下面没有其他云时,卷云的存在会加热大气;当卷云位于厚云之上时,卷云长波冷却大气,所以有云存在的实际大气辐射相当复杂.本研究为了简化模式,假设云层为一物理薄层,且云层相态单一,为水云.将以上各参量作为输入参量输入到大气辐射传输模式中.由于 MODIS 二级云产品的云相态有7种:0表示晴天;1表示不透明水云;2表示不透明冰云;3表示冰水混合相态;4表示透明水云;5表示透明冰云;6表示不确定.本文研究云相态为1或4的水云的情况.图3为研究地区水云随着经纬度的分布情况.可见所研究区域上空的水云都是云相态为1的不透明水云.故仅研究该地区上空水云的云相态为1的不透明水云的情况.

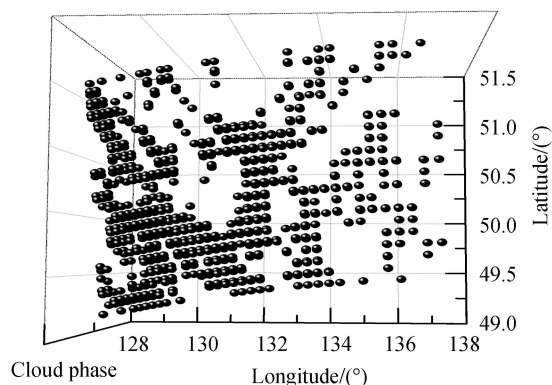
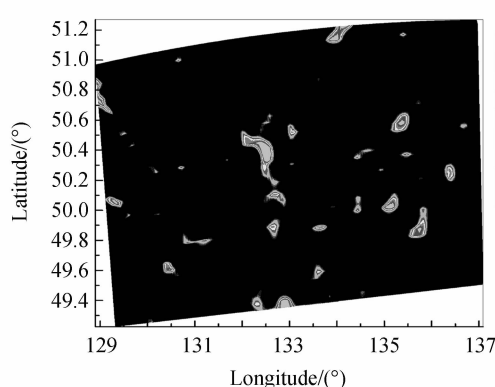


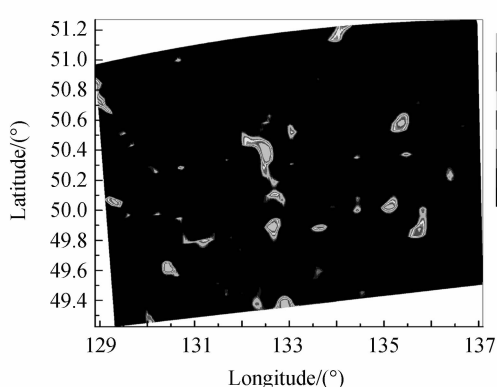
图3 水云的分布情况  
Fig. 3 The distribution of water clouds

对高空卫星观测来说,观测视场中云相态很复杂,可能包括单一相态的低层水云、冰云和半透明卷云等,或者多相态的组合,不同相态的云对大气辐射的作用不尽相同,需要对云相态进行识别.基于水滴和冰晶粒子的单次散射和多次散射性质的不同,文献<sup>[15]</sup>利用 8.52、11 和 12  $\mu\text{m}$  波段的亮温差进行云热相态的识别.这三个波段的亮温准确与否对云相态的判断有着重要的影响.为了研究模式模拟结果的准确性,选择 MODIS 3 个通道进行研究:第 29 通道  $1\ 170\ \text{cm}^{-1}$  (即 8.55  $\mu\text{m}$ ) 波段,带宽为  $1\ 149\sim 1\ 190\ \text{cm}^{-1}$ ;第 31 通道  $907\ \text{cm}^{-1}$  (即 11.03  $\mu\text{m}$ ) 波段,带宽为  $886\sim 928\ \text{cm}^{-1}$ ;第 32 通道  $832\ \text{cm}^{-1}$  (即 12.02  $\mu\text{m}$ ) 波段,带宽为  $815\sim 850\ \text{cm}^{-1}$ ,研究某地区实际大气条件下大气顶辐射情况.图4给出了三波段 MODIS 观测的云顶亮温和模拟计算的水云大气顶的亮温谱分布情况.由图4可以看出 MODIS 这三个波段云顶亮温和对应的模拟计算的亮温谱在研究地区的分布中相差不大,基本一致.

为了进一步研究基于卫星资料模拟计算的三波段水云大气顶的亮温,对 MODIS 和模拟计算的水云的亮温间关系进行了研究.研究中假定云为单一相态厚度均匀物理薄层,但是实际的云厚度是不均匀的,且有一定的空间分布,实际大气中的云不一定是单一的薄层,可能是一层,也可能是单一相态的云或者不同相态的云构成的多层云.对于不透明的云,卫星观测的是最高层云的云顶辐射,而高层云下面存在的云会对大气辐射产生影响,云层下层的不同相态的云对大气辐射也会产生不同的影响.另外云厚不同红外波段地表温度对水云大气的辐射会产生一定的影响:地表温度越高,地表向上发射的红外辐射越多,水云吸收的来自云下的红外辐射越多,向外发射的辐射越多,从而使得大气顶亮温会越大.当光学厚度较小情况下,透过水云的红外辐射较多,观测到的红外辐射包括来自地表的信息.当光学厚度较大时地表温度对水云大气的辐射没有影响.这是因为水云光学厚度越大,来自地表发射的红外辐射被水云吸收而不能被透射,所以卫星观测到的红



(a) 8.55  $\mu\text{m}$  band



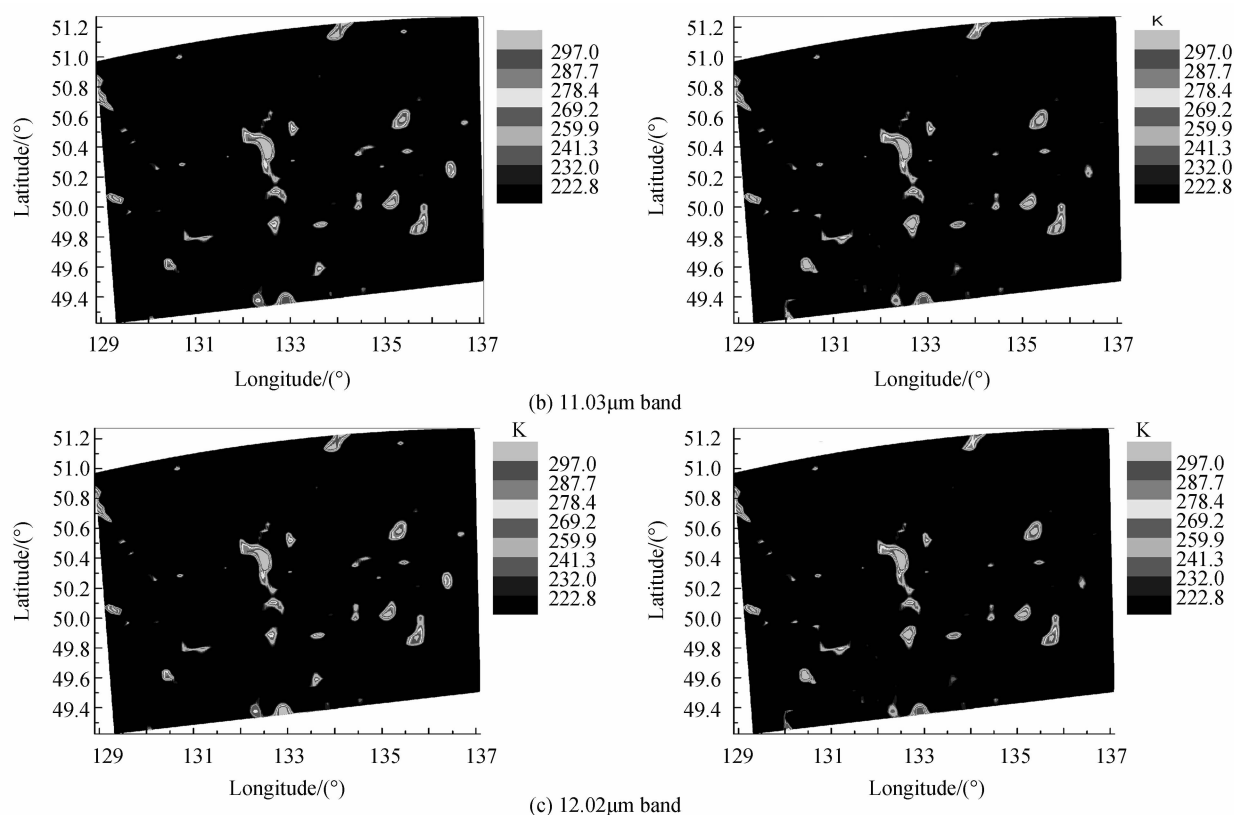


图 4 三波段 MODIS(左)和模拟计算(右)的有水云区域的亮温分布

Fig. 4 The distributions of brightness temperature of MODIS(left) and model(right) under water clouds at three bands

外辐射没有来自地表的信息, 这样云光学厚度不同, 地表温度不同会对卫星观测结果产生一定的影响. 此外, 云对大气的制冷和加热作用也与云的光学和物理参量有关(如光学厚度、有效尺度、云高和云水含量等). 综合上述原因, 不符合假设条件的像元模拟计算的结果和卫星观测的辐射值差别较大, 在图 5 图中亮温差概

率分布中有所体现. 图 5 是 8.55、11.03、12.02  $\mu\text{m}$  三波段 MODIS 产品和模拟计算的亮温差概率分布情况, 从图中可以看出模拟计算的亮温和 MODIS 云顶亮温基本一致, 模拟计算的亮温差主要分布在  $-10\text{ K} \sim 10\text{ K}$  之间. 在少数象元处亮温差较大, 原因如上分析.

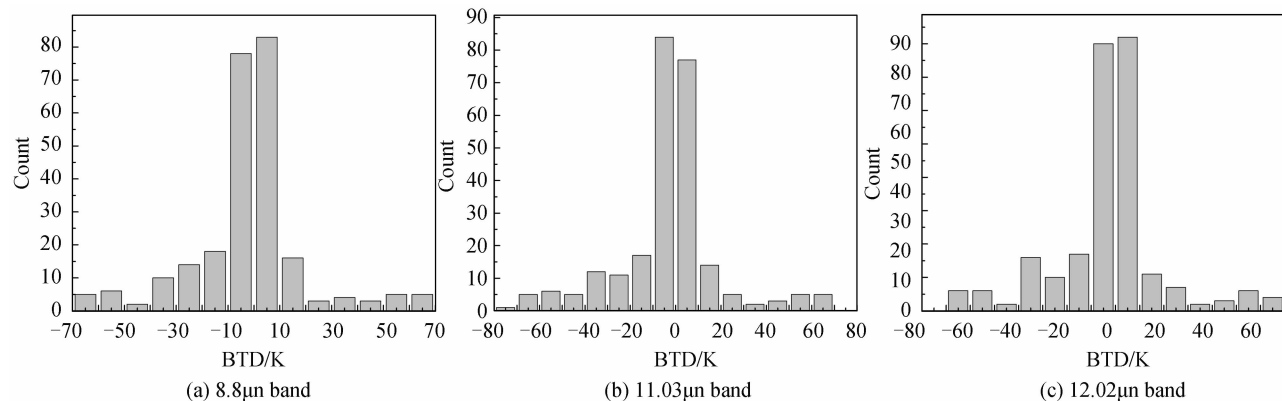


图 5 MODIS 三个波段观测的亮温和模拟计算的水云的亮温差分布图

Fig. 5 The distributions of brightness temperature difference at the top of water clouds between MODIS observation and simulation at three bands

文献[15]利用 8.52、11 和 12  $\mu\text{m}$  波段的亮温差进行云热相态的识别. 在此, 模拟计算了这三个通道亮温差 BTD(8.55~11.03  $\mu\text{m}$ ) 和 BTD(11.03~12.02  $\mu\text{m}$ ) 的变化情况, 并把计算结果随 11.03  $\mu\text{m}$  通道亮温的变

化示于图 6 中. 如图 6(b) 所示, 模拟计算的 BTD(8.55~11.03  $\mu\text{m}$ ) 一般小于 0, 这和文献[14]结果一致. 但是图 6(a) 显示水云的情况下 MODIS 云顶亮温的亮温差 BTD(8.55~11.03  $\mu\text{m}$ ) 基本上小于 0, 有少

量则大于 0, 大于 0 基本上发生在  $11\ \mu\text{m}$  通道亮温小于  $250\text{K}$  时, 这种情况很可能是冰云或冰、水共存的混合相云. 可见卫星观测到的云顶亮温可能由于观测视场中有多种云相态类型出现或者观测视场中薄卷云位于低层云层(如水云)上使得观测值的准确性降低, 这和文献[15]的研究结果一致. 利用模式模拟计算水云的辐射具有一定的准确性和可靠性.

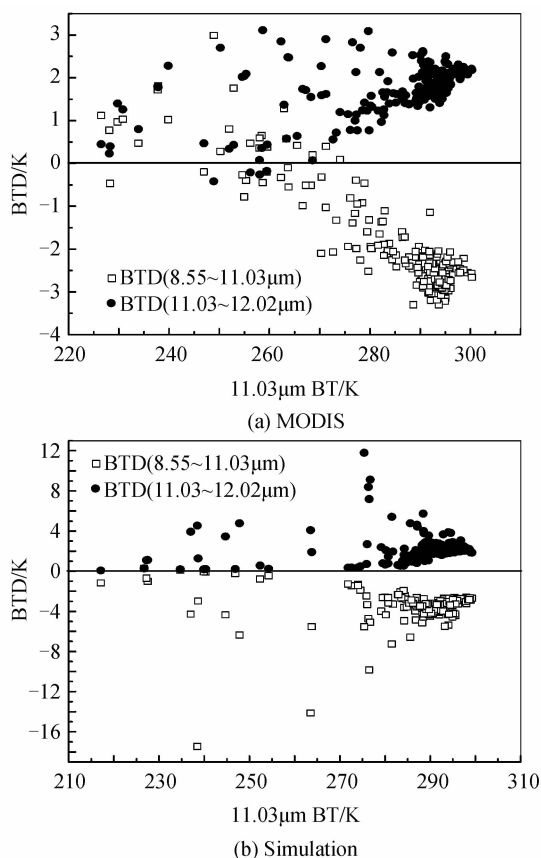


图 6 8.55、11.03 和  $12.02\ \mu\text{m}$  波段 MODIS 产品和模拟计算亮温差随  $11.03\ \mu\text{m}$  亮温的变化

Fig. 6 Brightness temperature difference (BTD) of MODIS and simulation among  $8.55$ ,  $11.303$  and  $12.02\ \mu\text{m}$  bands versus the brightness temperature for water clouds

### 3 结论

采用 MODIS 云产品 MYD06 和大气产品 MYD07 数据, 结合水云情况下的通用大气辐射传输软件 (CART) 模拟计算实际大气下给定地区大气顶辐射特性. 选择 MODIS 3 个通道进行研究: 第 29 通道  $1\ 170\ \text{cm}^{-1}$  (即  $8.55\ \mu\text{m}$ ) 波段, 带宽为  $1\ 149\sim 1\ 190\ \text{cm}^{-1}$ ; 第 31 通道  $907\ \text{cm}^{-1}$  (即  $11.03\ \mu\text{m}$ ) 波段, 带宽为  $886\sim 928\ \text{cm}^{-1}$ ; 第 32 通道  $832\ \text{cm}^{-1}$  (即  $12.02\ \mu\text{m}$ ) 波段, 带宽为  $815\sim 850\ \text{cm}^{-1}$ , 研究某地区实际大气条件下大气顶辐射情况, 并将模式模拟计算的平均亮温和 MODIS 云顶亮温进行了比较分析. 结果表明: 通过对所研究区域的模拟计算亮温和 MODIS 云顶亮温产品进行对比,

可见模拟计算的结果和 MODIS 云顶亮温分布基本一致, 亮温差一般在  $-10\ \text{K}\sim 10\ \text{K}$  以内. 计算的三个通道亮温差 BTD ( $8.55\sim 11.03\ \mu\text{m}$ ) 和 BTD ( $11.03\sim 12.02\ \mu\text{m}$ ) 的变化符合水云的情况. 利用 MODIS 卫星观测云参量、大气参量和空间几何参量, 结合通用大气辐射传输软件 (CART) 模拟计算实际大气条件下某地区水云大气辐射特性和 MODIS 云顶亮温具有较好的一致性, 模拟计算值具有一定的准确性和可靠性, 可以作为实况值加以应用, 为具体地区实际天气下水云大气辐射研究提供了一种新方法.

#### 参考文献

- [1] CAO Ya-nan, WEI He-li, XU Qing-shan. Statistics analysis of cirrus properties in Beijing region based on MODIS cloud products [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, **8**(4): 271-281.  
曹亚楠, 魏合理, 徐青山. 基于 MODIS 云产品的北京地区卷云特性统计分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2013, **8**(4): 271-281.
- [2] CHEN Ren-sheng, KANG Er-si, JI Xi-bin, et al. An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: a case study in Heihe river basin [J]. *Energy*, 2007, **32**: 1148-1157.
- [3] FU Bing-shan, CHEN Wei-min, ZhANG Feng-ying. Evaluation of solar direct and scattered radiation over Southeast China using Tiros Operational Vertical Sounder data [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2002, **25** (6): 807-815.  
傅炳珊, 陈渭民, 张凤英. 利用 TOVS 资料计算我国东南地区的太阳直接辐射和散射辐射[J]. *南京气象学院学报*, 2002, **25** (6): 807-815.
- [4] YAN Jun-yi, WANG Hong-qing, ZhANG Yan, et al. Applying satellite data to mesoscale model ARPS [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, **42** (6): 791-795.  
鄢俊一, 王洪庆, 张焱, 等. 卫星资料在中尺度模式 ARPS 中的应用[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006, **42**(6): 791-795.
- [5] QING Wen-wu, SUN Wei-min, CHEN Ren-sheng. Estimation direct irradiance based on several satellite data in northwest China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27** (10): 1758-1765.  
卿文武, 孙卫民, 陈仁升. 利用卫星资料估算我国西北地区直接辐射[J]. *自然资源学报*, 2012, **27**(10): 1758-1765.
- [6] WEI He-li, CHEN Xiu-hong, RAO Rui-zhong. 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.
- [7] WEI He-li, CHEN Xiu-hong, DAI Cong-ming. 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.
- [8] KING M D, MENZEL W P, KAUFMAN Y J, et al. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, **2**(41): 442-458.
- [9] LIU Zhong, LING Feng, ZhANG Qiu-wen. MODIS remote sensing data processing and acquisition of atmosphere products

- [J]. *Remote Sensing Information*, 2005, **2**: 52-57.
- 刘忠, 凌峰, 张秋文. MODIS 遥感数据产品处理流程与大气数据获取[J]. 遥感信息, 2005, **2**: 52-57.
- [10] 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 6-7.
- [11] CHEN Xiu-hong. Development of the combined atmospheric radiative transfer software[D]. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics the Chinese Academy of Sciences, PhD. Thesis, Hefei, 2010.
- 陈秀红, 通用大气辐射传输软件 CART 研制[D]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所. 博士论文, 合肥, 2010.
- [12] WISCOMBE W J. Improved Mie scattering algorithms[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(9): 1505-1509.
- [13] CHEN Xiu-hong, WEI He-li, YANG Ping, *et al.* An efficient method for computing atmospheric radiances in clear-sky and cloudy[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, **112**(1): 109-118.
- [14] RAMASWAMY V, RAMANATHAN V. Solar absorption by cirrus clouds and the maintenance of the tropical upper troposphere thermal structure [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, **46**: 2293-2310.
- [15] BAUM B A, SOULEN P F, STRABALA K I, *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.