

文章编号:1001-9014(2004)05-0408-05

## 卫星资料在多层云系特征识别中的应用研究

刘健<sup>1</sup>, 朱元竞<sup>2</sup>, 赵柏林<sup>2</sup>, 董超华<sup>1</sup>

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 北京大学大气科学系, 北京 100871)

**摘要:**利用 FY-ID、NOAA 仪器的多光谱探测通道数据, 采用 1.6 $\mu\text{m}$  反射率和 11 $\mu\text{m}$  亮度温度双通道散点图及 3.75 $\mu\text{m}$  与 11 $\mu\text{m}$  亮度温度差分析方法, 对密实卷云、卷云覆盖在水云上、密实水云等几种云覆盖情况进行判识检测试验. 研究表明综合运用多探测通道数据, 可简单地识别典型的多层云系.

**关键词:**多层云; 反射率; 亮度温度; 卫星

**中图分类号:**P40 **文献标识码:**A

## APPLICATION STUDY ON DETECTING MULTILAYER CLOUD'S PROPERTIES BY SATELLITE DATA

LIU Jian<sup>1</sup>, ZHU Yuan-Jin<sup>2</sup>, ZHAO Bo-Lin<sup>2</sup>, DONG Chao-Hua<sup>1</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

2. Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Multilayer cloud system, such as density cirrus, thin cirrus cloud overlaying a low-level water cloud and density water cloud was detected by using bispectral methods that scatter plot of the near-infrared 1.6 $\mu\text{m}$  channel reflectance and the 11 $\mu\text{m}$  brightness temperatures and brightness temperature difference between 3.75 $\mu\text{m}$  and 11 $\mu\text{m}$  channel data from FY-ID and NOAA. Results show that the methods have a promising facility for identifying areas containing typical multilayer cloud system by multi channel data.

**Key words:** multi layer cloud; reflectance; brightness temperature; satellite

### 引言

在全球辐射能量平衡和气候变化系统中, 卷云被认为是一个重要的影响因子<sup>[1]</sup>. 现有的大多数利用卫星资料分析卷云的前提是假设卷云为单一云层, 但地面和飞机观测均显示在锋面云系中经常出现卷云覆盖在对流云或层云上的多层云系<sup>[2-4]</sup>, 尤其是前两篇文章提到卷云覆盖在层云或高层云上的概率高达 50%. 由于卷云的高度、粒子大小、粒子形状及散射特性具有很大的变率, 使得利用卫星遥感数据对卷云的分析十分困难.

目前已有不少利用卫星多光谱数据判识多层云的方法, 如 Baum 等人<sup>[5,6]</sup>利用模糊逻辑理论对 AVHRR 数据进行多层云的自动检测, 但这种方法适用于象元矩阵, 而非独立的象元. Ou 等人<sup>[7]</sup>描述

了一种包含低云、卷云或低云上还有卷云覆盖的象元判识方法, Ou 利用 AVHRR 数据, 采用统计方法, 设定云检测阈值, 对象元进行云检测, 首先分出晴空象元和云象元, 进而对云象元进行分类, 把云象元分为卷云、卷云/低云和低云三类, 此方法的不足之处在于云分类的结果直接与所设定的阈值相关. Baum 等人<sup>[8]</sup>利用 MAS 的 1.63 $\mu\text{m}$  反射率和 11 $\mu\text{m}$  亮度温度双通道数据, 采用散点图分析方法, 对卷云覆盖在低云上的多层云进行判识, 由于利用了 1.63 $\mu\text{m}$  反射率数据, 因此此方法在夜间无法使用.

本文根据辐射传输模式的模拟计算结果, 分析单层卷云、低层水云及卷云覆盖在低层水云之上两层云时可见光、近红外和红外通道光谱特性, 发挥极轨气象卫星空间分辨率较高、探测通道多的特点, 利用卫星多通道遥感数据对多层云系进行识别分析研

收稿日期: 2003-10-24, 修回日期: 2004-05-24

Received date: 2003-10-24, revised date: 2004-05-24

基金项目: 国家重点基础研究(G1998040909); 国家自然科学基金(49794030)和教育部博士站基金(20020001027)资助项目

作者简介: 刘健(1969-), 女, 江苏无锡人, 博士, 副研究员, 主要从事大气遥感与大气探测研究

究,并选取 2002 年 16 号台风作为个例,对其云系特征进行判别检测试验。

## 1 多层云(卷云覆盖在水云上)判别方法的物理基础

图 1 是 2002 年 6 月 23 日 NOAA/AVHRR 0.65 $\mu\text{m}$  反射率图像。目视图 1,所选区域中包含有密实云、大片低层云、透明丝缕状卷云、以及晴空的地和水体。选定一小区域(图像中黑框)中象元 1.6 $\mu\text{m}$  反射率和 11.0 $\mu\text{m}$  亮度温度散点图示于图 2。区域中象元散点图分布犹如一个三角形,三角形的 3 个顶点 A、B、C 分别具有高反射率较高亮度温度、低反射率低亮度温度和低反射率高亮度温度的特点,分别对应于密实低云、密实卷云和晴空象元。除了 3 个顶点外,还有大量的象元分布在三角形的三个边及内部。这些象元 1.6 $\mu\text{m}$  反射率和 11.0 $\mu\text{m}$  亮度温度性质介于晴空、密实水云和密实冰云之间。它们的性质,将在下面利用模式模拟计算结果加以说明。

我们利用 SBDART 辐射传输模式<sup>[9]</sup>计算卷云覆盖在低层水云上云在 1.6 $\mu\text{m}$  反射率和 11.0 $\mu\text{m}$  亮度温度随云光学厚度( $\tau$ )的变化。计算中采用中纬度夏季大气廓线和 FY-1D 卫星相应探测波段的光谱响应函数,低层水云粒子有效半径取 8 $\mu\text{m}$ ,上层卷云的粒子有效半径设为 106 $\mu\text{m}$ 。计算结果示于图 3,图中实线代表卷云光学厚度,点画线为水云光学厚度。分析图 3,可得到如下结论:当只有一层低云时,随低云光学厚度的增加,云 1.6 $\mu\text{m}$  反射率增大;当只有一层卷云时,随云光学厚度的增加,云 1.6 $\mu\text{m}$  反射率减小;随云光学厚度的增加,11 $\mu\text{m}$  亮度

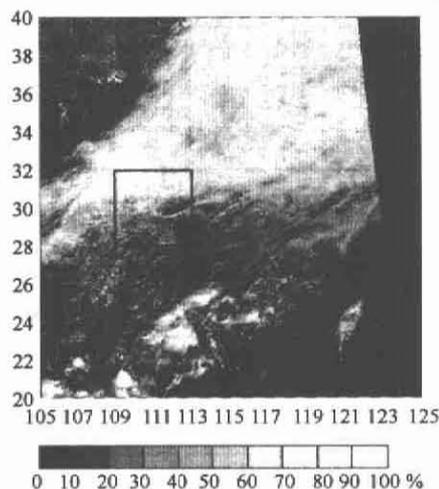


图 1 2002 年 6 月 23 日 0.65 $\mu\text{m}$  反射率图像  
Fig. 1 Reflectance images at 0.65 $\mu\text{m}$  on June 6, 2003

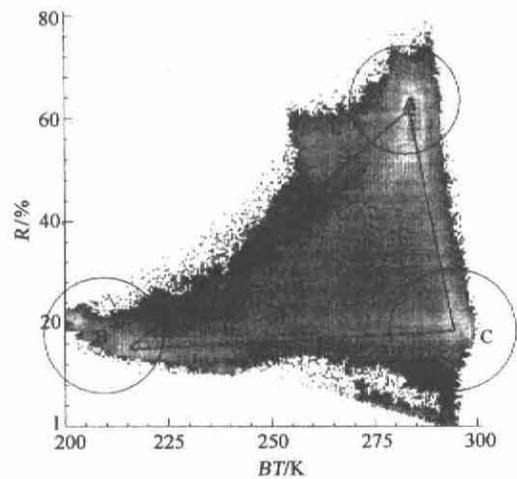


图 2 图 1 所选区域象元 NOAA1.6 $\mu\text{m}$  反射率和 11.0 $\mu\text{m}$  亮度温度散点图

Fig. 2 Scatter plot of reflectance at 1.6 $\mu\text{m}$  versus brightness temperature at 11.0 $\mu\text{m}$  for selected pixels

温度降低。当低云光学厚度固定时,随卷云光学厚度的增大,1.6 $\mu\text{m}$  反射率和 11 $\mu\text{m}$  亮度温度均减小;11 $\mu\text{m}$  亮度温度随云光学厚度的增加,并且无论是 1.6 $\mu\text{m}$  反射率还是 11 $\mu\text{m}$  亮度温度随低层水云光学厚度的增加,变化的敏感性逐渐降低。对比图 3 和图 2,可推知图 2 $\Delta abc$  三角形的 AC 边对应于单层不同光学厚度的水云,BC 边对应于单层不同光学厚度的卷云,AB 边则是卷云覆盖在低层水云上状况。

根据上面辐射传输模式的计算结果,结合已有的研究<sup>[10,11]</sup>,可知 1.6 $\mu\text{m}$  反射率主要与云顶粒子相态及粒子尺度有关,冰云粒子 1.6 $\mu\text{m}$  反射率小于水云粒子;大粒子 1.6 $\mu\text{m}$  反射率小于小粒子。11 $\mu\text{m}$  亮度温度的大小与云光学厚度密切相关,云光学厚度越厚,云 11 $\mu\text{m}$  亮度温度越低。由此可推知,晴空象元具有最高的 11 $\mu\text{m}$  亮度温度和较低的 1.6 $\mu\text{m}$  反射率;卷云具有最低的 11 $\mu\text{m}$  亮度温度和较小的 1.6 $\mu\text{m}$  反射率;而低云具有最高的 1.6 $\mu\text{m}$  反射率和较高的 11 $\mu\text{m}$  亮度温度,当出现卷云覆盖在低云上的多层云时,多层云的 11 $\mu\text{m}$  亮度温度和 1.6 $\mu\text{m}$  反射率会介于卷云和低云之间。

红外探测通道数据同样可以用于多层云的识别。Baum 等人<sup>[12]</sup>、Coakley<sup>[13]</sup>、刘健等人<sup>[14]</sup>的研究表明,当云为单一层次时,象元在 11.0 $\mu\text{m}$  亮度温度与 3.75 $\mu\text{m}$ 、11.0 $\mu\text{m}$  亮度温度差散点图上,形成单一拱形结构,晴空象元和密实云象元分别位于拱形曲线的高温、低温两个端点,半透明云象元位于拱形曲线的顶点;当云出现多层次时,亮度温度与亮度温

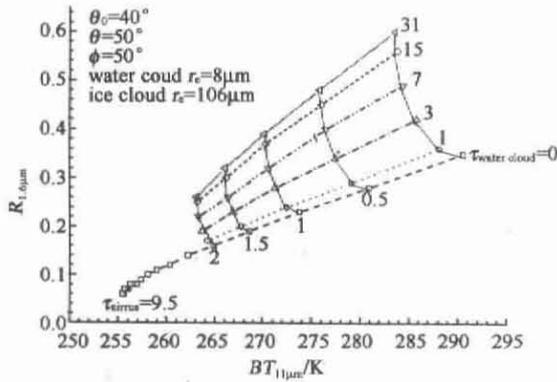


图3 上层为卷云,下层为水云时  $1.6\mu\text{m}$  反射率和  $11.0\mu\text{m}$  亮度温度随光学厚度的变化

Fig. 3  $1.6\mu\text{m}$  and  $11\mu\text{m}$  brightness temperature (BT) as a function of optical thickness for a case when cirrus overlies low water cloud

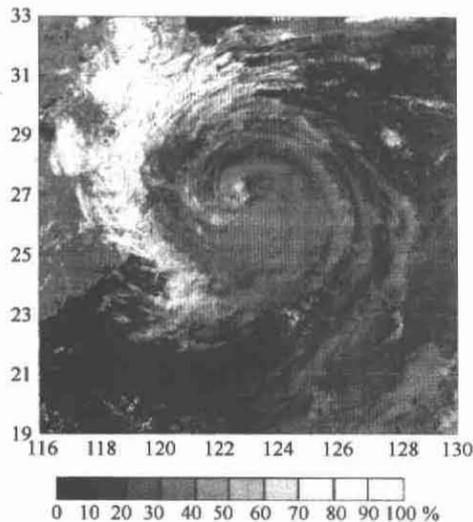


图4 2002年9月7日FY-1D卫星  $1.6\mu\text{m}$  反射率图像  
Fig. 4  $1.6\mu\text{m}$  reflectance of FY-1D on Sep. 7, 2002

度差散点图上不再是单一拱形结构,而会出现分支,对两层云而言,存在2个拱形结构(图略)。

## 2 多层云判别方法在台风云系识别中的应用

台风是我国主要的灾害性天气之一,气象卫星是监测台风活动的一个有效手段,静止气象卫星可在高时间分辨率上监测台风的运动,而极轨气象卫星,因其具有较高空间分辨率,可在台风云系精细结构分析研究上发挥作用。

热带气旋的发展,表现为对流螺旋云带变得更加弯曲,并且逐渐形成一个紧密的中心或眼。随着气旋的继续加强,环绕风暴中心的云越加浓密而使眼

区变得更加清楚。在卫星分析技术中,与热带气旋强度有关的云系特征被区分为描述云系中心(眼)的特征和描述中心周围密蔽云区的特征。台风中心的眼区多为晴空区或被低云覆盖,眼区的外围为密实云区,这部分云区正是强对流天气的发生区,清楚地了解这部分云区的发展变化,对预报由台风导致的灾害性天气,具有很好的指导意义。在密蔽云区的外围则是台风螺旋云带,这部分云区中,多数情况下卷云下存在低云,为两层云系。

2002年第16号热带气旋“森拉克”(SINLAKU)于2002年8月29日06h(世界时)开始编号,起编时中心位于北纬  $18.3^\circ\text{N}$ ,东经  $155.3^\circ\text{E}$ ,起编后向西北方向移动。8月31日增强为台风,并转向西北偏西方向移动。于9月7日10h30min在浙江省苍南一带沿海地区登陆。“森拉克”登陆后继续向偏西方向移动,进入福建北部,强度逐渐减弱。9月8日00h(世界时)其中心已移动到江西省抚州境内,减弱为热带低压,并继续向偏西方向移动。9月9日12h此热带低压移至湖北宜昌附近,与北方冷锋结合,“森拉克”结束编号。

图4是9月7日00h(世界时)FY-1D  $1.6\mu\text{m}$  反射率图像。在  $1.6\mu\text{m}$  反射率图像上,台风眼区云表现白亮,为低层水云;紧密围绕台风眼区的云,颜色灰暗,是台风眼区周围强对流云墙之所在,云发展深厚,云顶为冰相云;在密实云墙外围,洋面上出现了丝缕状卷云,螺旋结构明显,云顶粒子相态为冰相,陆地上空云为水相。图5是云判别结果图像。

常规台风分析中,为了突出红外云图上热带气旋云系的主要特征,常采用增强显示的方法,即将云系中不同云顶亮度温度用不同的灰度显示。经试验和筛选,运用BD增强曲线增强显示热带气旋云系。图6是利用BD增强曲线方法处理的2002年9月7日FY-1D图像。多云识别图像上(图5),黄色水云和青色薄卷云对应于增强图像上亮度温度高于  $-29^\circ\text{C}$  的黄色云区;增强图像上云顶亮度温度低于  $-29^\circ\text{C}$  的云区与多云识别图像上密实冰云区有很好的对应关系,反映出多云/云相态识别结果具有合理性。

图7是16号台风9月6日~9月8日发展过程图像。从9月6日到9月8日,台风外围的水云区逐渐扩大,反映出台风逐渐减弱。9月7日台风登陆后,9月8日08h(北京时)FY-1D图像上已没有密实冰云,代之以大片的水云和多云。6h后的NOAA多云识别图像上看到云的整体结构更加松散,台

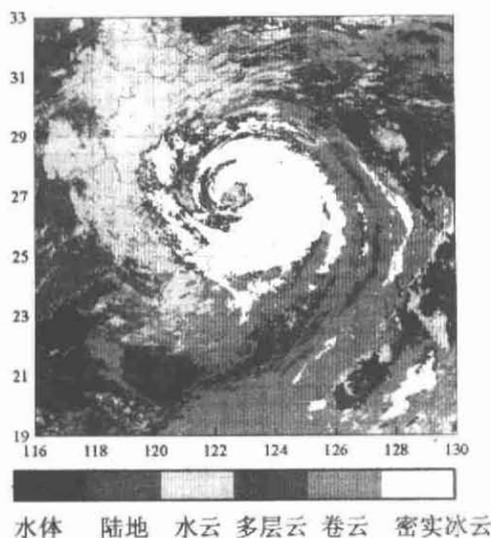


图5 2002年9月7日FY-1D多层云识别图像  
Fig. 5 Multilayer cloud detection image of FY-1D on Sep. 7, 2002

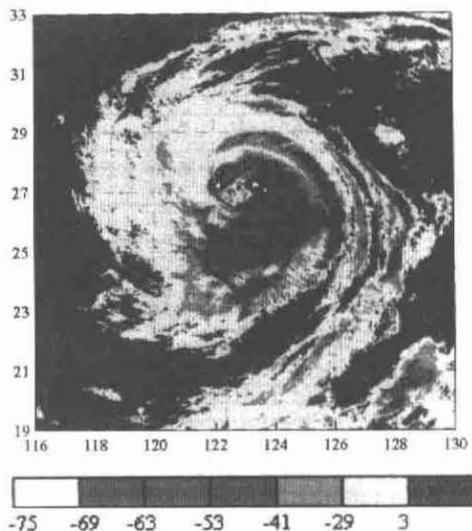


图6 2002年9月7日FY-1D通道4亮度BD增强图  
Fig. 6 BD enhancement image of FY-1D's 11.0mm brightness temperature on Sep. 7, 2002

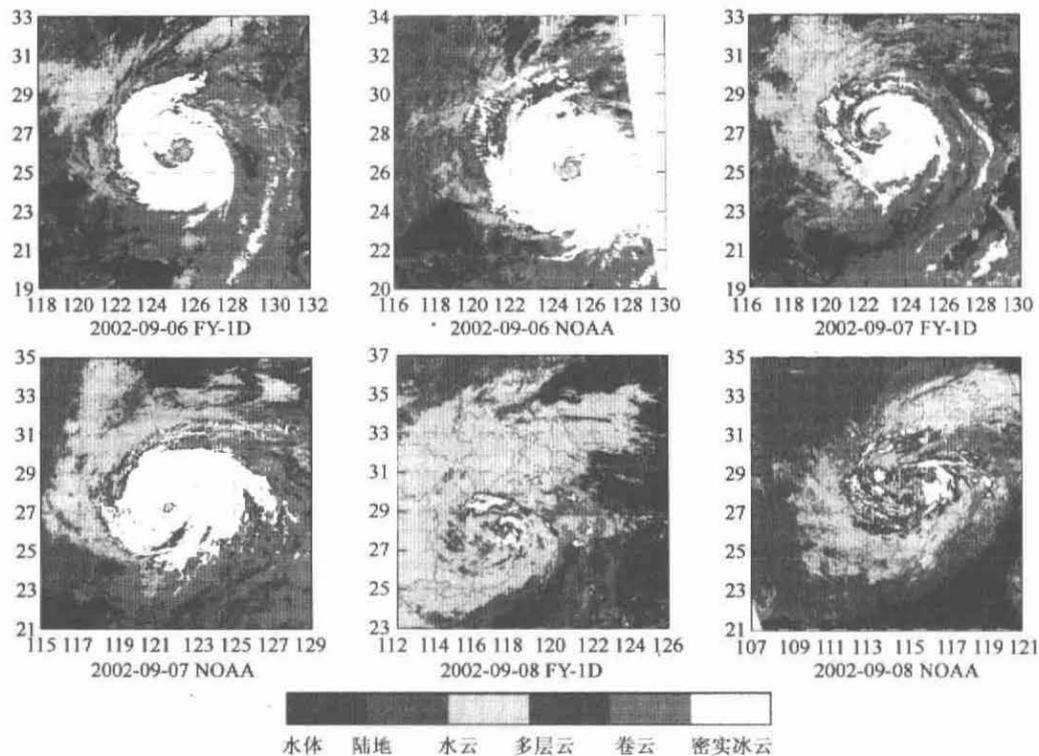


图7 2002年9月6日~9月8日FY-1D,NOAA两颗卫星多时次多层云识别图像  
Fig. 7 Multilayer cloud detected images of FY-1D and NOAA from Sep. 6, 2002 to Sep. 8, 2002

风消亡.从图中可见,多时次台风具有明显的眼区,且被水云填充.根据台风定位原则,利用多层云识别图像,计算台风中心,对于有眼台风,多层云识别图像上可以清晰看到被水云覆盖的眼区范围,台风中

心就可根据眼区水云的中心位置进行确定.

### 3 结语

本文探讨了利用FY-1D、NOAA多通道资料判

识单/多层云,尤其是卷云覆盖在低层水云上的方法.通过模拟计算分析,产结合卫星多光谱数据对实际个例进行分析研究,可得到以下初步结论:

1) 云的辐射特性在  $0.65\mu\text{m}$ 、 $1.6\mu\text{m}$  和  $3.75\mu\text{m}$ 、 $11.0\mu\text{m}$  波段各有特色,因此可用多通道数据分析多层云结构.在  $1.6\mu\text{m}$  和  $11.0\mu\text{m}$  双通道散点图上,晴空、密实低层水云 and 密实冰云构成三角形结构的三个顶点,不同光学厚度的水云、冰云和多层云则是三角形的三边.因此综合利用可见光、近红外和红外通道数据可对典型的多层云进行简单有效的识别.根据云光学厚度的不同,象元在红外通道亮度温度与亮度温度差散点图上形成拱型结构.晴空象元和密实云象元分别位于拱形结构的高温、低温两个端点.半透明云具有亮度温度差的最大值.如果存在多层云,则在亮度~亮度温度差散点图上会出现两个(或多个)拱型结构.

2) 利用多层云、云相态识别方法分析 2002 年 16 号台风云系结构.分析结果表明,判识方法可有效识别热带气旋的眼区、密实云墙及外围卷云等结构特征.

## REFERENCES

- [1] Liou K N. Influence of cirrus clouds on weather and climate process: A global perspective[J], *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**(5): 1167—1199.
- [2] Hahn, Warren C J S G, London J. *et al.* Atlas of simultaneous occurrence of different cloud types over the ocean [R]. *NCAR Tech. Note TN-201 + STR*, 1982, 212.
- [3] Hahn, Warren C J S, London J. *et al.* Atlas of simultaneous occurrence of different cloud types over land [R]. *NCAR Tech. Note TN-241 + STR*, 1984, 216.
- [4] Tian L, Curry A. Cloud overlap statistics[J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(D7): 9925—9935.
- [5] Baum G A, Uital T, Poellot M, *et al.* Satellite remote sensing of multiple cloud layers[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**(23): 4210—4230.
- [6] Baum B A, Tovinkere V, Titlow J, *et al.* Automated cloud classification of hlobal AVHRR data using a fuzzy logic approach[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1997, **36**(11): 1519—1540.
- [7] Ou S C, Liou K N, Baum B A. Determination of multiplay-er cirrus cloud systems using AVHRR data: Verification based on FIRE-II IFO composite measurements[J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1996, **35**(2): 178—191.
- [8] Baum B A, Spinhirne J D. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUC-CESS 3. Cloud Overlap[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D9): 11793—11804.
- [9] Ricchiazzi P, Yang S, Gautier C, *et al.* SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere[J]. *Bullrtin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(10): 2101—2114.
- [10] LIU Jian, DONG Chao-Hua. Using satellite data to analysis properties of cloud particles size on the top of cloud[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘健,董超华. 卫星资料在云顶粒子尺度特征分析中的应用. *红外与毫米波学报*), 2002, **4**(2): 124—128.
- [11] Liu jian, Dong Chaohua, Zhu xiaoxiang. Thermodynamic phase anlysis of cloud particles with FY-1C data[J]. *Meteorology and Atmospheric physics*, 2002, **80**(1-4): 65—71.
- [12] Baum B A, Arduini R F, Wielicki B A, *et al.* Multilevel cloud retrieval using multispectral HIRS and AVHRR data: Nighttime oceanic analysis [J]. *J. Geo. Res.*, 1994, **99**(D3): 5499—5514.
- [13] Coakley J A. Properties of multilayered cloud system from satellite imagery[J]. *J. Geo. Res.*, 1983, **88**(2): 10818—10828.
- [14] LIU Jian, XU Jian-Min, FANG Zong-Yi. Analysis of the cloud properties using NOAA/AVHRR date[J]. *Q. J. Appl. Mete* (刘健,许健民,方宗义. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料试做云性质的分析. *应用气象学报*), 1998, **9**(4): 449—455.