

MODIS 多光谱云相态识别技术的应用研究

周著华¹⁾²⁾ 白洁¹⁾ 刘健文¹⁾ 纪飞¹⁾ 齐琳琳¹⁾ 李玮¹⁾

¹⁾(空军装备研究院航空气象防化研究所,北京 100085)

²⁾(解放军理工大学气象学院,南京 211101)

摘要

介绍了卫星多光谱云相态识别的基本原理,并给出了 EOS/ MODIS 云相态识别的流程。针对简单和复杂云场,利用个例并结合无线电探空资料与 MODIS 三通道合成图肯定了多光谱云相态识别的合理性和实际效果。文中对几个特定天气系统(西南涡旋和西太平洋台风)下大面积云场相态分析的结果表明:多光谱云相态识别技术有一定应用价值,且需要引入可见光技术来减少红外波段对多层云覆盖和薄卷云的相态分析误差。

关键词:云相态 三光谱 MODIS

引言

使用卫星红外多光谱方法进行云相态分析的工作在国外已经开展了多年。国内随着诸如航空气象要素预报等对云相态分析结果的需要,开展了利用卫星数据来作云相态分析的工作。该工作第一次是由 Houghton 等^[1]完成的,他们利用了冰与水粒子在 50 μm 和 120 μm 两个远红外波段散射和吸收的不同性质。1974 年 Liou^[2]研究了卷云在卫星通道 10 μm 窗区的发射和透射性质,此窗区后来被用于云相态分析的主要谱段。到后来,有 Booth^[3]提出的红外单光谱云相态分类法,Inoue^[4~5]提出的双光谱窗区分离法。Ackerman 等^[6~8]在研究 1986 年 FIRE 试验期间的卷云个例中,分析了卷云在 8~12 μm 窗区的光谱性质,提出了三光谱云相态分类的技术。这种方法几经改进,已成为迄今为止较为先进的方法。King 等^[9]还利用冰云和水云在可见光通道对辐射表现出不同的整体性质,提出了一种可见光技术,但该方法只适用于简单云场的分析,同时也有着时段的局限性。在 Ackerman 的基础上,还有 MODIS 云顶性质及相态反演小组 Menzel^[10]提出的算法。在对 1996 年 SUCCESS 试验资料充分研究的基础上,Baum 等^[11~13]又对 MODIS ATBD 中的算法作了一些补充。

国内对于 MODIS 资料的接收处理与应用工作已于近年正式开展起来,相关研究包括 MODIS 气溶胶光学厚度反演^[14]和云微物理参数反演^[15]等。MODIS 不仅具有三光谱云相态分析技术所需的光谱覆盖,而且它的多光谱、高分辨率优势更利于分析云区的相态性质,本文便是这方面工作的有效尝试。

1 原理和方法

云粒的辐射性质由其几何形状和单次散射性质决定。云粒的单次散射与其复折射指数($m = m_r - i m_i$)、粒子尺度分布、粒子形状分布有关。而粒子的吸收系数 $k = \frac{4 \pi m_i}{\lambda}$ (λ 是入射波长),所以考察粒子的复折射指数虚部可以估计粒子吸收的大小^[16~17]。图1 是冰水粒子在 8 ~ 13 μm 大气窗区中 m_i 随波长变化曲线,可见,在 8 ~ 10 μm 间存在 m_i 最小值,而且冰与水粒子的指数值相差无几,这意味着那里只有较弱的辐射吸收。在这个区间之外(>10 μm),冰和水的 m_i 值迅速增长,并且液水粒子的吸收在 11 ~ 12 μm 间比其在 10 ~ 11 μm 间增长得多,而冰粒子的吸收却在 10 ~ 11 μm 间比在 11 ~ 12 间增长得多。于是水云的 BTD(11 - 12) (指 11 μm 与 12 μm 波长处的亮温差: bright temperature difference) 应比 BTD(8 - 11) 大;相反,冰云的 BTD(8 - 11) 应比水云的 BTD(11 - 12) 大。

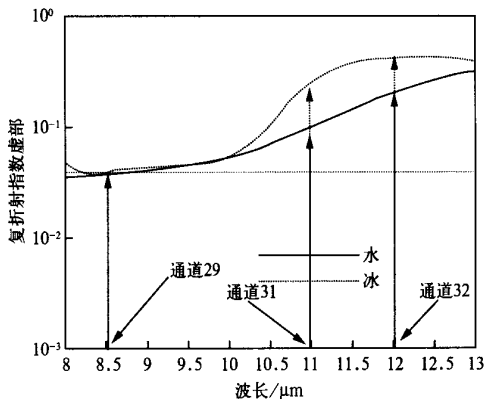


图1 大气窗区冰水粒子复折射指数虚部的变化^[12]
(底部箭头所指为 MODIS 通道 29, 31, 32 中心波长所在处)

因此,三光谱法的核心就是对亮温差点聚图(以 BTD(11 - 12) 为横坐标,以 BTD(8.5 - 11) 为纵坐标)的准确描述。Ackerman^[6,8]指出,在亮温差点聚图中,那些接近于零或是负 BTD(8.5 - 11) 的点和那些 BTD(11 - 12) 小值的点可以认为是晴空区;冰云和水云表现在点聚图上是不同的两团点簇:斜率大于 1 的那些点是冰云,斜率小于 1 的那些点是水云;斜率接近于 1 则是混合云场。

参考了 Ackerman 和 Menzel 等人的研究成果^[6,8,10],本文使用实际接收到的 EOS Terra 卫星 MODIS 通道 29(8.400 ~ 8.700 μm)、通道 31(10.780 ~ 11.280 μm)、通道 32(11.770 ~ 12.270 μm) 的辐射亮温资料(分辨率均为 1 km)进行相态分析,综合流程如下:

① 先对通道 29, 31, 32 亮温资料作 5×5 的平均,算得平均块的 BTD(8.5 - 11) 和 BTD(11 - 12),并得到每块区域的 8.5 μm 辐射标准偏差。

② 以 8.5 μm 辐射标准偏差小于 $0.023 (\text{m W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s r}^{-1}) / \text{cm}^{-1}$ 为标准分出不透明的区域,并对其进行聚类分析。分析中使用如式(1)的简单距离法定出类中心点,其中 Δs 是区域间的 8.5 μm 辐射标准偏差之差, ΔT_{B11} 是区域间的 11 μm 亮温差。当两点间距离 d 小于 1 时,将两点归为一类。

$$d = \sqrt{\Delta s^2 + \Delta T_{B11}^2} \tag{1}$$

③ 计算像元块间的距离,找出聚类中心点,考察中心点在点聚图中的位置进行初始

分类。若中心点位于单位斜率之上,则此类定为不透明的冰云;若在单位斜率之下,则此类定为不透明的水云。若中心点的 $11 \mu\text{m}$ 亮温 $< 230 \text{ K}$ (或大于 275 K),则此类可直接定为冰云(或水云)。然后,对未确定相态的像元块用类似方法继续聚类。

④对 $11 \mu\text{m}$ 亮温大于 255 K 的区域块,按式(2)作极大似然估计。其中 m 是斜率, b 是截距, N 是区域内的点数。式(2)的含义是区域内所有点到直线 $y_i - mx_i - b = 0$ 距离的平方和。如果区域内点的数据服从 Gamma 分布,则区域块作式(2)的测试。我们求得 m, b , 使得 x 最小,然后以直线 $y = mx + b$ 的斜率来表征区域的整体相态特性。若 $m > 1$, 则区域块定为单一相态冰云;若 $m < 1$, 则区域块定为单一相态的水云。

$$x = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - mx_i - b)^2}{1 + m^2} \quad (2)$$

⑤若此时还有未确定相态的区域存在,则可能存在混合场景。对于这些块,若其位于单位斜率 ± 0.3 的范围以内,则定为混合云场景(多相态或多层次);若其位于单位斜率 $+0.3$ 以上,则定为透明的冰云;若其位于单位斜率 -0.3 以下,则定为透明的水云。

另外,在作相态分析之前,必须要作像元的晴空检测。由于在实验过程中发现有些云检测项目还不成熟(如通道 26 薄卷云检测),或不稳定(如通道 20 低云检测),或不能明显提高最终的可信度(如通道 35 高云检测),所以本文借鉴 MODIS 云检测算法^[18-19]的生态分型和可信度思想,首先把区域内像元的地表类型分为 4 种:陆地、水面、沙漠和冰雪覆盖区,然后执行不同的红外阈值检测(使用 MODIS 通道 31)和可见光反射率检测(使用 MODIS 通道 1, 2),分别得到晴空可信度为 $Q_{\text{IR}}, Q_{\text{VIS}}$,从而最终的可信度为 $Q = \sqrt{Q_{\text{IR}} \cdot Q_{\text{VIS}}}$,以此来为相态分析提供云检测输入。

2 个例分析

三光谱法的反演效果已在国外多次试验中(如 SUCCESS)被 MAS(机载 MODIS 仪器)实测数据所检验。但在实际应用中,较多还是采用阈值判别的方法来进行分类,而阈值不具有全球性。为了试验上述算法在本地分析应用中的识别效果,利用实际接收到的 MODIS 资料并结合探空资料,本文对 2002 年 5 月 4 日的几个小区域进行了分析。同时,还对特定天气系统的特定云系进行了分析,以确定多光谱云相态分析技术大面积应用的可行性。

2.1 单站个例

图 2a 是 2002 年 5 月 4 日 03:00(世界时,下同) MODIS 资料的通道 31 图像($28^\circ \sim 46^\circ \text{ N}, 100^\circ \sim 124^\circ \text{ E}$),针对不同类型的云场,文中选了几个小区域(图 2 黑色小方框内加以了标记)进行具体分析。对照图 2a 和图 2b 可见,区域 1 位于气旋中心之上,色泽暗淡但纹理均匀,应该是低层不透明性的水云;区域 2 位于低压中心,含有破碎的低层水云;区域 4 是白亮的厚卷云;区域 10 是薄卷云覆盖的混合云场,且有大面积的晴空区。

区域 1 和区域 4 都是 100×100 的像素域,对它们的 BTDF(8.5 - 11)和 BTDF(11 - 12)数据进行 5×5 平均后,所作点聚图见图 3。图 3 中,两块区域的数据点分成了明显不同

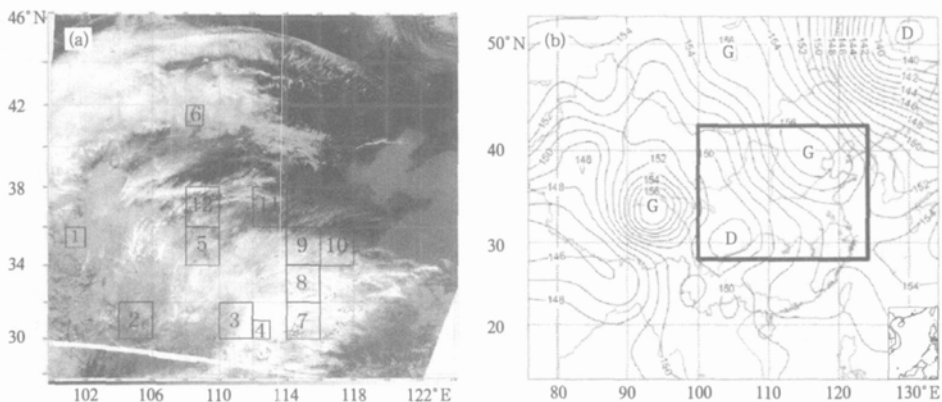


图 2 (a)2002 年 5 月 4 日 03:00 MODIS 通道 31 麦卡脱投影图像
(b) 对应(a)的 00:00 850 hPa 位势高度诊断场

的点簇。“□”形的是区域 4 中的点，整个点簇位于单位斜率之上，表示区域 4 为冰云；“+”形是区域 1 中的点，整个点簇位于单位斜率之下，表示区域 1 为液态的水云。这种两相态单一的云在点聚图上分成截然不同点簇的情形，有力地验证了三光谱法的基本原理。

彩图 4 是区域 2 的点聚图，反演得到像素块的相态特征分别以不同颜色标记。由图可知，区域 2 以透明的水云为主。从该区域中的 56294 号探空站 00:00 探空曲线(图 5)可以看出，在该点的 600 hPa 以下，存在一个温度露点差小值区。这说明该层以下有一个水汽接近饱和区，并以云区存在的可能性较大，同时对应高度的环境温度只在 0℃左右，这与该位置水云的反演结果相符。

区域 10 高层是边缘具有纤维结构的卷层云。通道 31 图像上，区域 10 南半部分浅白的云顶四围较为暗淡，也说明了下面还覆盖了中低状云，而区域北部为大片的晴空区(彩图 6b)。从点聚图可知(彩图 6a)，云场中存在有透明性、不透明性卷云；透明性、不透明性水

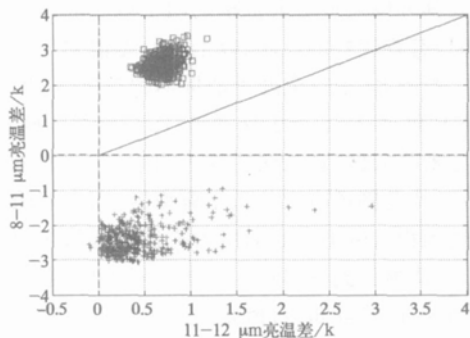


图 3 区域 1(+ 形点)和区域 4(□形点)点聚图

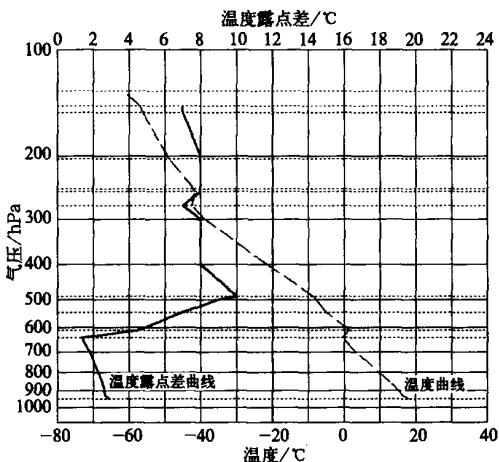


图 5 56294 号探空站 2002 年 5 月 4 日 00:00 探空曲线

云;混合相态(或混合层次)云以及大面积的晴空区。可以看到,由于低云的高度较低,而且厚度较薄且不均匀,来自地面的辐射容易穿透,所以晴空区在图上与低层水云的表现很难分清楚。而不透明性卷云比透明性卷云更靠近单位斜率线,这是因为透明性卷云的辐射标准偏差较大,使得 $BTD(8.5 - 11)$ 更大的缘故。整体上冰云的 $BTD(8.5 - 11)$ 大于水云的 $BTD(8.5 - 11)$,但是 $BTD(11 - 12)$ 的差别则很不明显,这也验证了三光谱法的理论说明。

2.2 区域个例

为了试验多光谱云相态识别技术在大区域云场分析中的应用,文中对图2中 $30^{\circ} \sim 46^{\circ} \text{N}$, $101^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$ 之间的广大区域(2100×1600 像素域)作了分析。反演结果如彩图7所示。结合图2b可知:高压脊附近的区域落入了冰云区(对应云图上的卷层云),涡旋的东部(水汽输送比较丰富而且多上升运动)有着很厚的冰云覆盖,江淮切变线一般因为层次较低,所以对应的都是低层水云区,本文因切变线上层覆盖有卷云,所以反演结果是冰云。图2a 低压中心(区域2)上空则是一片水云区(高层有少量稀薄卷云),狭长的高压中心及其外围对应着大范围的晴空区。渤海湾上空的薄卷云(彩图7右中部,夹杂在晴空区中间)有着较好的反映,以上说明总体的反演结果是令人满意的。

彩图8a是一个处于消散期的台风 MODIS 通道1,4,6合成图,台风中心位于 26°N , 126°E 附近,中心冷云区通道31亮温在 190K 以下。此类台风常常具有明亮且不对称的中心密蔽云区,在云区边缘上出现一些弯曲向外辐射的卷云纹线,范围较大。如彩图8a所示,其右侧还有大片太阳耀斑区,而大片晴空区的通道31亮温都超过了 290K ;台风以及周围积云带的中心对应着亮温极低值区,从中心向外亮温一直在递减;在台风中心的边缘,可清晰见到有多层云覆盖。对太阳耀斑区经过剔除后的相态分析结果见彩图8b,与彩图8a比较可知,台风底层的水汽较为充分,分布着大量的水云。随着高度的升高,对流的加剧,到了密实中心的顶部,便形成一个圆形的冰晶盖。从中心旋出去的积雨云带顶也为冰云覆盖,积雨云团间隔的是水云区,这属于积雨云的低层部分。台风中心和周围云带边缘部分多有薄卷云存在,中心周围下层和积云团的底部都是湿热的水云,它们是不停补充进入台风中心并对流抬升的水汽源。总的来说,彩图8b反映了此类台风云系顶部的相态分布特征。

3 结 语

MODIS 多光谱、高分辨率的特点有助于利用 $8.5 \mu\text{m}$, $11 \mu\text{m}$, $12 \mu\text{m}$ 三个谱段数据来实现云相态的识别,个例中单一水云(区域1)和单一冰云(区域4)在点聚图上的表现充分说明了 Ackerman 三光谱法的理论优势。对于复杂云场(区域2-区域10),本文结合探空资料同样确定了云相态识别有着较好的效果。结合云图的定性说明,特别是借助对 MODIS 通道1、通道4、通道6合成图的描述,特定天气系统(西南涡旋和西太平洋密实冷云区型台风)下的大面积云场相态识别结果在文章中得到了肯定,这说明多光谱云相态识别技术的实际应用是可行的。单层薄卷云覆盖时,相态识别结果尚好。多层云覆盖和薄卷云历来是遥感研究的难点,红外多光谱技术在这方面也不可避免的存在精度误差,可以

考虑在将来引入可见光通道的数据来帮助分析。

参 考 文 献

- 1 Houghton J T, Hunt G E. The detection of ice clouds from remote measurements of their emission in the far infra-red. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1971, **97**: 1 ~ 17.
- 2 Liou K N. On the radiative properties of cirrus in the window region and their influence on remote sensing of the atmosphere. *J Atmos Sci*, 1974, **31**: 522 ~ 532.
- 3 Booth A L. Objective Cloud Type Classification using Visual and Infrared Satellite Data. Preprints, Third Conf On Probability and Statistics in the Atmospheric Science. Boulder, Co, Amer Meteor, 1973. 220 ~ 227.
- 4 Inoue T. A cloud type classification with NOAA 7 split window measurements. *J Geophys Res*, 1987, **92**: 3991 ~ 4000.
- 5 Inoue T. Features of clouds over the tropical Pacific during the Northern Hemispheric winter derived from split window measurements. *J Meteor Soc Japan*, 1989, **67**: 621 ~ 637.
- 6 Ackerman S A, Smith W L. Inferring Cloud Microphysical Properties from High Resolution Spectral Measurements in the 8-13 μm Window Region. Preprints, Seventh Conf on Atmospheric Radiation, San Francisco, CA, Amer Meteor Soc, 1990. 6 ~ 8.
- 7 Ackerman S A, Smith W L, Spinhirne J D, et al. The 27-28 October 1986 FIRE IFO cirrus case study: Spectral properties of cirrus clouds in the 8-12 μm window. *Mon Wea Rev*, 1990, **118**: 2377 ~ 2388.
- 8 Strabala K I, Ackerman S A, Menzel W P. Cloud properties inferred from 8-12 μm data. *J Appl Meteor*, 1994, **33**: 212 ~ 229.
- 9 King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, **30**: 2 ~ 27.
- 10 Menzel W P, Strabala K. Cloud Top Properties and Cloud Phase. Algorithm Theoretical Basis Document. ATBD-MOD-07, NASA Goddard Space Flight Center, 1997.
- 11 Baum B A, Kratz D P, Yang P, et al. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS, I, Data and Models. *J Geophys Res*, 2000, **105**: 11767 ~ 11780.
- 12 Baum B A, Soulen P F, et al. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS, II, Cloud thermodynamic phase. *J Geophys Res*, 2000, **105**: 11781 ~ 11792.
- 13 Baum B A, Spinhirne J D. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS, III, Cloud overlap. *J Geophys Res*, 2000, **105**: 11793 ~ 11804.
- 14 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 用 MODIS 遥感资料分析四川盆地气溶胶光学厚度时空分布特征. *应用气象学报*, 2003, **14**(1): 1 ~ 7.
- 15 刘健. 卫星遥感云微物理参数研究: [博士学位论文]. 北京: 北京大学, 2003.
- 16 刘健, 许健民, 方宗义. 利用 NOAA 卫星的 AVHRR 资料试分析云和雾顶部粒子的尺度特征. *应用气象学报*, 1999, **10**(1): 28 ~ 33.
- 17 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.
- 18 Ackerman S A, K Strabala, Menzel W P, et al. Discriminating clear sky from cloud with MODIS: Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35). Algorithm Theoretical Basis Document ATBD-MOD-06, NASA Goddard Space Flight Center, 1997. 1 ~ 125.
- 19 Ackerman S A, K Strabala, Menzel W P, et al. Discriminating clear sky from cloud with MODIS. *J Geophys Res*, 1998, **103**: 32141 ~ 32157.

THE APPLICATION OF CLOUD PHASE RECOGNITION BY MODIS SPECTRAL DATA

Zhou Zhuhua¹⁾²⁾ Bai Jie¹⁾ Liu Jianwen¹⁾ Ji Fei¹⁾ Qi LinLin¹⁾ Li Wei¹⁾

¹⁾ (*Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085*)

²⁾ (*Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*)

Abstract

The basic principle of MODIS multispectral cloud phase recognition is introduced, with the algorithm for cloud phase recognition investigated. Radiosonde observations and MODIS tri-channel composite images are used in the paper to show the rationality and the effect of cloud phase recognition in cases. The analysis of large cloud scenes in some special weather background indicates that the technique of multispectral cloud phase retrieval is quite steady to be applied in practice and some visible techniques should be imported to reduce the error which is unavoidable in the analysis of multilayer mask and thin cirrus with infrared technique.

Key words: Cloud Phase Trispectral MODIS

周著华等：MODIS多光谱云相态识别技术的应用研究

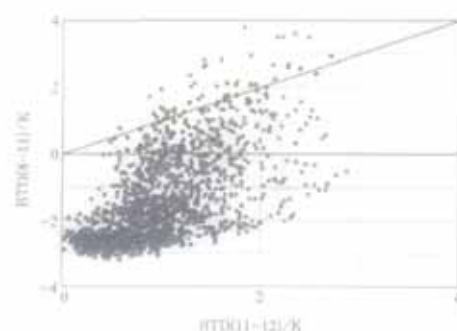


图4 区域2三通道数据点聚图
(红色圆形为透明冰云, 黑色方块为非透明冰云,
蓝色方块为非透明水云, 青色圆形为透明水云,
绿色方块为混合场, 黄色方块为晴空区)

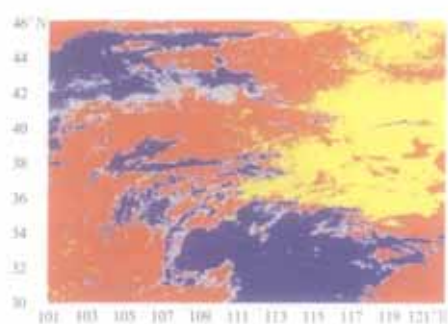


图7 图2中对应区域云相态分析结果
(红色为水云区, 蓝色为冰云区, 灰色为混合云场,
黄色为晴空区)

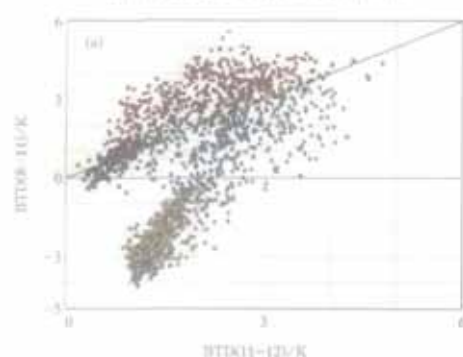


图6 区域10亮温差点聚图(a)(说明同图4)和云相态反演结果(b)(说明同图7)

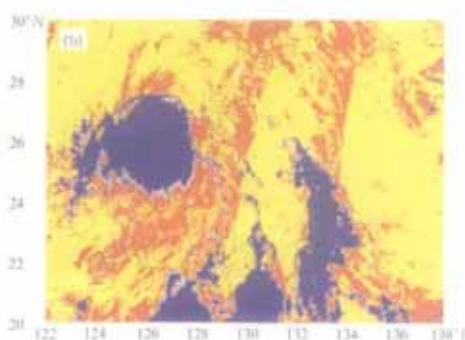
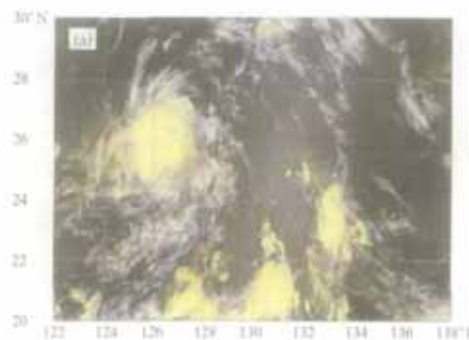
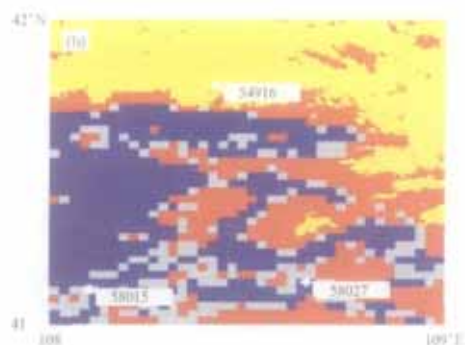


图8 2002年6月10日02:02西太平洋台风(a)及其云顶相态分析结果(b)(说明同图7)