

风云二号静止气象卫星的云相态识别算法

刘健, 李云

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 风云二号静止气象卫星上装载有可见光、中波红外、水汽和红外波段探测通道, 其中白天的中波红外通道反射率可以反映云顶粒子的尺度和相态信息. 联合使用可见光、中波红外和热红外通道辐射, 可构建白天云顶粒子相态识别算法. 云相态识别结果与 CloudSat 卫星的云产品分类相比较, 个例分析表明, 两种数据对于以深对流和卷云为主的高层冰云识别一致率高于 97%, 对以层云、层积云和雨层云为主的低层水云的识别一致率为 94.98%. 将云相态识别算法用于热带气旋云系结构分析, 可清晰地揭示热带气旋云系中心对流云区、外围卷云羽区及周边的水云等结构特征.

关键词: 云; 相态; 静止气象卫星

中图分类号: P412.27 **文献标识码:** A

Cloud phase detection algorithm for geostationary satellite data

LIU Jian, LI Yun

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: FengYun-2 geostationary spectral data consists of 5 channels that locate at visible, near infrared, water vapor and far infrared wavelength. Among these channels, the reflectance of near infrared bands at daytime is the function of cloud particle's size and thermodynamic phase. The paper proposes a grouped detection method to identify cloud particle's thermodynamic phase by reflectance of visible, near infrared bands, and brightness temperature of infrared bands. The identified cloud phase was compared with CloudSat products. The example analysis indicated that two kinds of data regarding consistent rate are higher than 97% for high layer ice cloud, including deep convection and cirrus. For low water clouds, the consistency of two kinds of data got 94.98%. It can clearly show the cloud system structure of tropical cyclone, including central convection cloud area, cirrus around and outside water cloud when using cloud thermodynamic phase identified method analysis the cloud properties of tropical cyclone.

Key words: cloud; thermodynamic phase; geostationary satellite

PACS: 92.60.Nv

引言

云对地球与大气间的能量平衡具有强烈的调节作用. 云性质及其在不同空间和时间尺度上的变化对全球气候变化和各种尺度的天气系统的影响是不可忽视的. 不同的云类反映了不同的大气状况, 如对流云的存在预示着可能发生降水或强对流天气, 反映了大气的不稳定性; 层积云的存在预示着大气中存在着干空气逆温层. 因而对云进行正确的分类有助于改善天气预报精度, 尤其是静止气象卫星的云分类数据, 因其具有较高的时间探测频率优势, 更能

在天气分析中发挥作用.

随着卫星遥感探测能力的提高和遥感技术的发展, 利用卫星遥感数据判识云顶粒子的相态成为可能. 由于冰和水对辐射的吸收在 8~10 μm 波段上基本相同, 但在 10~13 μm 波段上却出现明显的差异, 因此联合使用 8、11 和 12 μm 三个红外探测通道, 可以有效地分析云顶粒子的热力学相态^[1], 这一方法已成为当今云相态识别的主流算法, 但受到资料的限制, 到目前为止, 仅有 EOS/MODIS 同时搭载 8、11 和 12 μm 三个红外探测通道. 由于冰与水在 1.6 μm 波段有较明显的吸收性质差异, 使得冰粒子

收稿日期: 2010-05-18, 修回日期: 2010-09-28

Received date: 2010-05-18, revised date: 2010-09-28

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z150); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906002)

作者简介: 刘健(1969-), 女, 江苏无锡人, 研究员, 主要研究方向为卫星遥感大气定量产品处理及其在天气气候分析中的应用,

E-mail: liujian@ema.gov.cn.

在 $1.6 \mu\text{m}$ 的反射率明显比水粒子小,从而 $1.6 \mu\text{m}$ 反射率对云顶粒子的相态比较敏感,因此也有利用 $1.6 \mu\text{m}$ 资料进行云顶粒子相态识别的研究报告^[2,3].

风云二号(简称 FY-2)静止业务气象卫星搭载五个探测通道,分别位于可见光、中红外、水汽和红外分裂窗波段,与 NOAA/AVHRR、EOS/MODIS 相比,尽管不具备云相态识别常用的 $1.6 \mu\text{m}$ 或 $8 \mu\text{m}$ 波段的探测通道,但其搭载的 $3.7 \mu\text{m}$ 探测通道也可在白天的云相态识别中发挥作用.利用 FY-2 的多通道数据,尤其是中波红外通道数据,基于云在不同探测波段上的物理特性,研究云相态识别算法,并利用 CloudSat 探测数据验证云相态识别算法的合理性.最后将云相态识别算法用于台风云系结构的分析.

1 数据

研究中主要采用的卫星数据是风云二号静止气象卫星数据. FY-2C 为业务静止气象卫星,其上搭载有包括可见光($0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$)、中波红外($3.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$)、热红外(红外 1 通道($10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$),红外 2 通道($11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$))及水汽探测通道($6.3 \sim 7.6 \mu\text{m}$)在内的 5 个探测通道,空间分辨率为 5 km ,时间分辨率为 30 min .

验证分析数据来自 CloudSat 卫星. 2006 年美国发射的 CloudSat 卫星,其上搭载了频率为 94 GHz 的云廓线雷达(cloud profiling radar,简称 CPR),可对云层获得从地面到高空共 125 个不同高度层上的数据,垂直分辨率达 240 m ,水平分辨率为 1 km . CloudSat 卫星主要有两类数据产品:一类是标准数据产品(standard data products,简称 DSPs),另一类是辅助数据产品(auxiliary data products). 辅助产品主要包括一级辅助产品、欧洲中心中期数值天气预报辅助产品、MODIS 辅助产品以及激光雷达(Lidar)辅助产品 4 类. CloudSat 的二级产品中包含了液态水/冰水含量、液态水/冰水路径、云水/云冰、云的高度、温度等云参数产品. 其中 CloudSat 的云分类产品包括层云、层积云、积云、雨层云、高层云、高积云、深对流云或高云等几类. 采用 CloudSat 的云分类产品作为云相态识别算法的验证数据.

2 云相态识别算法

云粒子的相态、大小和数密度直接影响云对辐射的吸收、散射和透射程度,而这些物理参数又直接与单次散射特性、消光系数和相函数等光学参数密切相关. 单次散射特性又可用折射指数($m = m_r -$

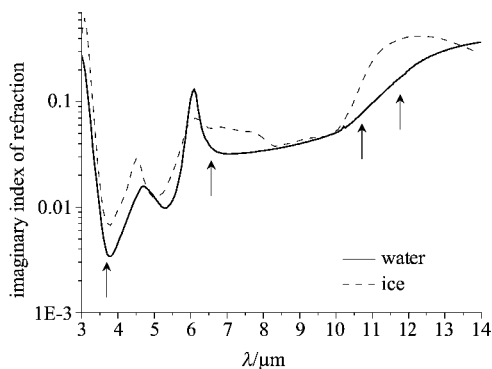


图1 水和冰的折射指数虚部随波长的变化,图中箭头对应于 FY-2C 的探测通道所在波长

Fig. 1 Imaginary index of refraction of water and ice across infrared wavelength. Arrow is showed the location of FY-2 channels

im_i)、粒子大小分布和粒子形状等参数表示. 其中折射指数实部(m_r)表示粒子散射辐射能力,实部数值越大,散射辐射越强;虚部(m_i)代表粒子吸收辐射能力,虚部绝对值越大,对辐射的吸收越强. 水和冰折射指数的虚部随波长的变化见图 1,其中箭头所指的位置对应于 FY-2 探测通道. 由图 1 可知,在 3.7 、 11 、 $12 \mu\text{m}$ 附近,水的折射指数虚部小于冰,说明水吸收辐射能力小于冰,同时在 11 、 $12 \mu\text{m}$ 冰和水的吸收能力均强于 $3.7 \mu\text{m}$,说明在 $3.7 \mu\text{m}$ 冰云的反射率比水云小. 单用吸收不能完全解释冰云和水云在卫星探测波段上的辐射差异,卫星接收辐射中不仅包含有吸收—发射辐射,而且有散射—透射辐射. 单次散射反照率就可用来说明不同尺度的粒子对辐射的散射作用. 不同相态、不同大小的粒子单次散射反照率与波长的函数关系见图 2. 图 2 显示, $3.7 \mu\text{m}$ 的散射效应大于 11 或 $12 \mu\text{m}$;在 $3.7 \mu\text{m}$ 附近,粒子尺度越小,散射越强;冰云的散射小于水云

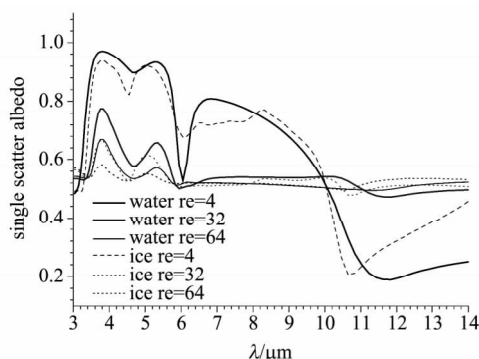


图2 不同相态、粒子尺度的粒子单次散射反照率随波长的变化

Fig. 2 The relationship between single scattered albedo and wavelength for different thermodynamic phase and particle size

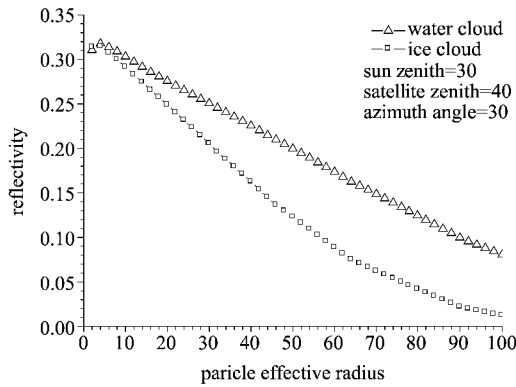


图3 水云和冰云的粒子有效半径与FY-2C的3.7 μm反射率间的函数关系

Fig. 3 The reflectivity function of water and ice cloud particle's effective radius at 3.7 μm

的散射,说明在白天,相同粒子尺度条件下,冰云在3.7 μm波段的反射辐射小于水云,同时小粒子云在3.7 μm的反射辐射大于大粒子云。

在日间,卫星3.7 μm波段接收辐射中,既包含有目标物的发射辐射,又含有目标物对太阳辐射的反射辐射部分.根据上面的分析可知,由于不同相态、不同粒子尺度的云在3.7 μm波段的散射特性不同,使得利用3.7 μm波段的反射辐射可识别不同相态的云.图3是利用辐射传输模式(streamer,下同)计算的不同粒子有效半径的水云和冰云在FY-2C 3.7 μm波段上的反射率.从图3可见,云有效半径较小时,水云和冰云反射率的差别较小,随着粒子有效半径的增大,水云的反射率明显大于冰云的反射率,且两者间的差值增大.对于单一云层,当水汽通道和红外窗区通道的亮温差小于一定温度,表明云层位于中高层,如图4中辐射传输模式模拟计算的云顶高度高于6km,红外通道与水汽通道的亮温差小于15K;以及云顶高度在6km以上时,有效粒子半径均为32 μm的不同相态云,在3.7 μm通道上的反射率具有较明显的差异,反映出在同样云顶高度、且粒子尺度一致条件下,冰云的反射率小于水云。

研究表明,物理上,尽管在-10℃时云中就会是冰、水共存的状态,但温度低至-40℃时仍会有液态水存在^[4].因此在研究中对于光学厚度厚的云,可认为云层底下的向上辐射无法穿透云层达到卫星探测器,此时可用简单的亮温阈值方法判识云相态:当11 μm通道亮温低于233K(-40℃)时,认为云全部由冰粒子组成.当云的光学厚度较小,不足以遮挡云底的向上辐射,就需同时考虑云和下垫面的温度.由于11 μm波段与对辐射的透过率大于12 μm波段,

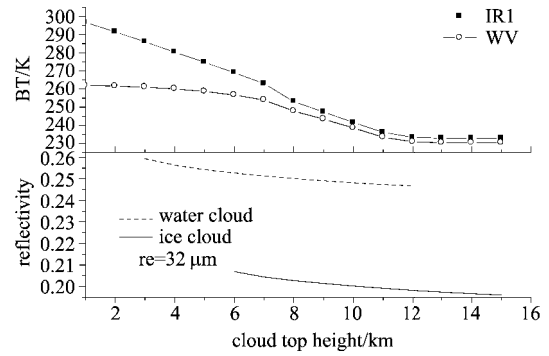


图4 模拟计算的FY-2C红外和水汽通道亮温差及不同相态云的3.7 μm反射率随云顶高度的变化

Fig. 4 Calculated brightness temperature difference between water vapor and infrared channel and different cloud thermodynamic phase's 3.7 μm reflectivity as the function of cloud top height

因此从背景上来的辐射11 μm波段多于12 μm波段,这使得两个通道上的亮度温度测值相比较 $BT_{ir1} > BT_{ir2}$,造成了半透明云区或部分有云区在不同通道之间存在亮温差^[5-6],从而可利用红外1通道与红外2通道的两温差判识是否存在薄云.对于多层云系,目前只考虑上层为薄卷云,下层为中低云的两层云情况.由于下层的中低云系的存在,中低云发射的辐射可穿透上层的薄卷云,使得卫星探测到的辐射大于上层薄卷云自身发射的辐射.此时,单用11 μm窗区通道的亮温值很难准确判识云的相态.可见光通道反射率与云的光学厚度密切相关,云光学厚度越大,可见光通道反射率越高^[7].本研究中以可见光通道反射率45%^[8]为云体是否为厚云的识别阈值。

综合上述分析,云相态的识别算法为

(1) 厚云

$$\begin{aligned} Ref_{0.65} > 45\%; ref_{3.7} < thre_{ref} \\ BT_{IR1} < 273K; BT_D(IR1 - WV) < thre_{BT_D-2} \end{aligned}, \quad (1)$$

式(1)中 $Ref_{0.65}$ 、 $ref_{3.7}$ 分别是可见光通道和中波红外通道反射率, BT_{IR1} 是红外1通道亮度温度, $BT_D(IR1 - WV)$ 是红外1通道和水汽通道的亮度温度差.满足上述条件为冰相云,反之为水云或冰水混合云。

(2) 薄云或多层云

$$\begin{aligned} BT_D(IR1 - IR2) > thre_{BT_D-1}; Ref_{0.65} < 45\%; \\ ref_{3.7} < thre_{ref}; BT_{IR1} < 263K; BT_D(IR1 - WV) < thre_{BT_D-3} \end{aligned}, \quad (2)$$

式(2)中 $Ref_{0.65}$ 、 $ref_{3.7}$ 、 BT_{IR1} 、 $BT_D(IR1 - WV)$ 同式(1), $BT_D(IR1 - IR2)$ 是红外1通道和红外2通道的亮度温度差,两个红外通道的亮度温度差阈值($thre_{BT_D-1}$, $thre_{BT_D-2}$, $thre_{BT_D-3}$)是卫星天顶角的函数,可利用辐射传输方程进行计算^[9].满足上述条件可将云识别为冰云,反之为水云或冰水混合云。

3 云相态识别算法的应用试验

3.1 云相态识别结果与 CloudSat 的对比分析

利用 FY-2 业务静止气象卫星数据,在云检测算法基础上,根据上节所述方法对有云像元进行相态识别,并利用 CloudSat 数据对相态识别结果进行检验分析.

2009 年 8 月 7 日 05:30(UTC)FY-2C 可见光云图和云相态识别图见图 5,其中云相态识别图上的矩形范围内是 CloudSat 扫描观测轨迹(黑线表示).对比图 5 左图的可见光反射率图像,在云相态识别图上(图 5 右图),台风的中心区域是发展旺盛的对流云区(以白色表示),外围的卷云以浅灰色表示,在台风云系的北边有以深灰色表示的水云.

CloudSat 不同高度层上的云分类产品见图 6,其中横坐标是扫描线上探测点的位置,左右纵坐标分别是大气垂直高度和相应高度层所对应的 ECMWF 温度场.在图 6 上叠加有深灰色的条带,为 CloudSat 扫描点对应的 FY-2 像元云相态识别代码信息. CloudSat 的云分类产品没有明确指明云顶的相态,但根据 ISCCP 的云分类标准^[10],层云、层积云和积云属于低云,云相态以水云为主;雨层云、高层云、高积云为中云,是冰水混合云;深对流云或高云、卷云为高云,相态为冰相.对比 CloudSat 云分类产品和 FY-2C 云相态识别结果可知,对于所选取的 1860 个 CloudSat 有明确云回波的扫描探测点(CPR > 30dBz),两种数据对深对流云的判识一致率达到 97.8%,对低层水云的判识一致率为 94.98%.如果将高层云、高积云算作冰相云,则冰相云的判识一致率为 66.36%,如果将高层云、高积云算作水相云,

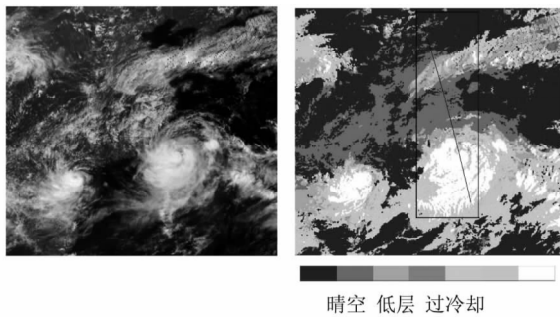


图 5 FY-2C 2009 年 8 月 7 日 05:30(UTC)图中黑线为 CloudSat 的扫描路径 (a)可见光通道图像 (b)云相态识别图像

Fig. 5 05:30(UTC) on August 7, 2009 for FY-2. Black line is the CloudSat observation path (a)reflectivity image at visible channel (b)identified thermodynamic phase image

则水相云的判识一致率为 70.68%. 可以看到由于高层云、高积云的混合相态性质,使得两种数据间的对比存在较大的不一致性.

CloudSat 从东南向西北方向扫描,扫描线穿过台风中心. CloudSat 扫描结果如图 6 所示. 图 7 是对应于 CloudSat 扫描线上探测点的 FY-2C 像元的可见光通道、中波红外通道反射率和红外 1 通道亮度温度. 对比图 6 和图 7 可知,从 CloudSat 扫描线的开始点(17.04 N, 122.95 E)至(24.75 N, 121.15 E), CloudSat 探测的云类别以深对流云和高层云为主,云顶高度高于 14 km,云顶温度低于 240K. 对应 FY-2C 的探测(图 7), CloudSat 扫描线上的像元具有较高的可见光通道反射率、较小的中波红外通道反射率和较低的红外 1 通道亮温的辐射特点, FY-2C 的云相态识别结果为冰云;在 26.0 N ~ 32.0 N 之间, CloudSat 扫描结果显示云顶低于 6 km,云顶所处高度的环境温度高于 270 K,云在 FY-2C 可见光通道的反射率减小,中波红外通道反射率增大,红外 1 通道亮温升高,判识云系以水云为主, CloudSat 判识的云类别以积云、雨层云、层积云为主,还有部分高积云,两者的判识结果一致. 在 32.45 N 到 35.3 N 区间, CloudSat 扫描线上出现高层云,云顶高度高于 8 km,在 FY-2C 探测通道上对应可见光反射率的升高、中波红外通道反射率的降低和红外温度的降低, FY-2C 云相态识别为冰相云. 在 35.3 N 至 36.29 N 区间, CloudSat 云类判识为高层云,云顶高度接近 10 km,所在环境场温度低于 260 K,而 FY-2C 红外 1 通道亮度温度高于 260 K,同时具有较高的中波红外通道反射率, FY-2C 云相态判识结果为过冷却水云. 从上述对比分析可知,经过与 CloudSat 云分类判识产品的对比, FY-2C 云相态判识结果具有合理性.

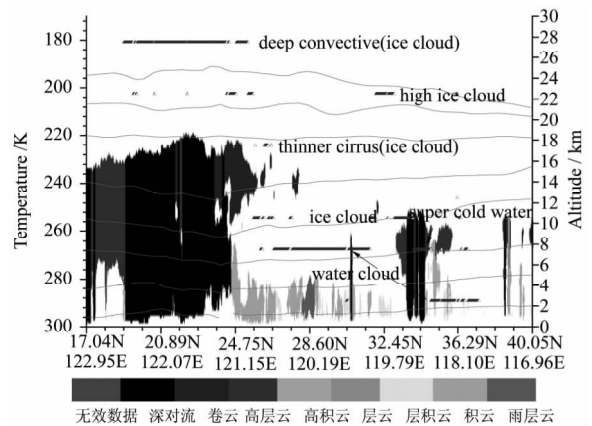


图 6 2009 年 8 月 7 日 CloudSat 云分类产品

Fig. 6 CloudSat cloud classification product on Aug. 7, 2009

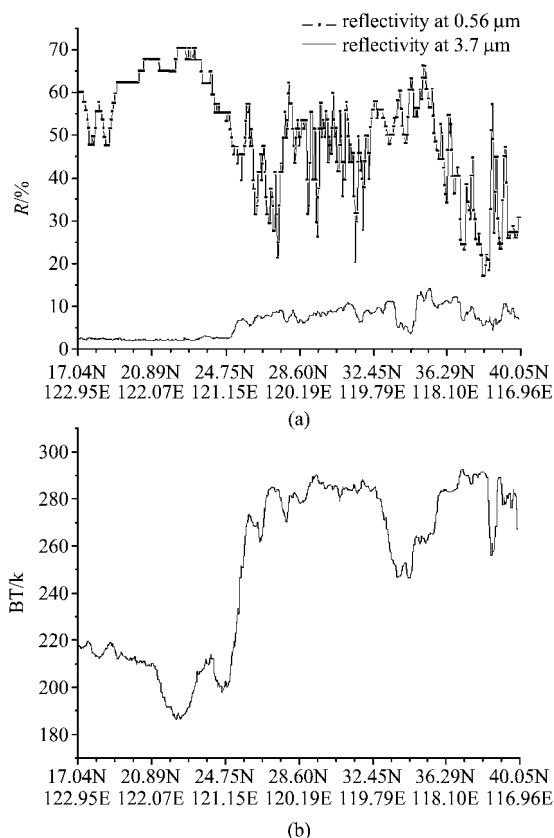


图7 对应于图5中 CloudSat 扫描线的 FY-2C, 2009年8月7日05:30(UTC) (a)扫描像素红外通道1亮温 (b)可见光通道反射率、中波红外通道反射率

Fig. 7 05:30 on Aug. 7, 2009 corresponding to CloudSat scatter line that showed in Fig. 5 (a) pixel's brightness temperature at infrared channel 1 (b) reflectivity at visible and middle infrared channel FY-2C

3.2 云相态识别在台风云系分析中的应用试验

2009年第8号台风“莫拉克”8月4日凌晨生成,5日加强为台风,7日23时45分在台湾花莲登陆,9日16时20分在福建霞浦再次登陆,9日晚上福建省境内减弱为强热带风暴,10日凌晨减弱为热带风暴,12日02时停止编号。“莫拉克”在移动过程中与2009年第7号热带风暴“天鹅”和东侧热带低压相互影响、相互牵制,导致路径复杂,移向多次发生转折。“莫拉克”登陆前主要降水带分布在其东侧和南侧,登陆后,结构出现显著变化,主要降雨带分布在其北侧,空心结构明显。图8是选取的8月4日至9日每日00:00(UTC,下同)的FY-2C云相态识别图。对应热带气旋的发生发展过程,热带气旋云系的结构特征非常明显。在8月4日00:00时,在所显示区域内,有两个系统,一个是左侧的第七号热带气旋“天鹅”,另一个是右侧的第八号热带气旋“莫拉克”云系。其中左侧的“天鹅”已是一个外形呈现近

圆形的强对流云团,“莫拉克”的螺旋云系结构开始形成,但没有形成闭合的对流云墙,其东南侧的对流云被卷云包裹在对流云的外围。8月5日00:00时,“莫拉克”的环流结构已经形成,中心向西北方移动,东南侧的低压云系仍旧存在,左侧的“天鹅”云系开始有些松散,云系整体北抬,表现为在其北部出现了中低云系,南部的卷云变薄。8月6日00:00,“天鹅”云系继续北上,并分离出多个对流云团,其南部的卷云继续减少,北部多中低云层。8日00:00时,在台湾登陆后,“莫拉克”云系的结构开始松散,没有完整的环流结构,其西北侧的云系多中低层的水云,东南侧还有大量的卷云。在二次登陆福建之前(9日00:00时),“莫拉克”重又形成环流云系结构,但深对流云的覆盖范围明显减少,云层的厚度也有所减弱。此时左侧的“天鹅”整体云系基本消失,仅有少量的对流云存在。

4 结论

利用风云二号静止业务卫星的多通道探测数据,对云在不同光谱通道辐射特性分析的基础上,利用风云二号静止气象卫星可见光通道反射率、中波红外通道反射率和红外1通道亮度温度、红外1通道与红外2通道亮度温度差、红外1通道与水汽通道亮度温度差等数据,构建白天的云相态识别算法,并利用CloudSat的云分类产品对云相态识别结果进行对比分析。个例分析表明所构建的云相态识别算法合理有效,两种数据对以深对流云和卷云为代表的冰云和低层水云(以层云、层积云和雨层云为主)的判别一致率达94%以上。由于CloudSat云分类产品与FY-2云相态识别结果在分类标准上有所差异,使得两种数据在中层云(以高层云、高积云为主)的云相态识别结果上出现差异。

利用云相态识别方法对2009年第8号台风“莫拉克”的云系结构进行分析,分析结果表明,云相态算法可以较好地反映台风云系结构,清楚地显示出台风中心强对流云区、外围卷云及水云的分布特征,展示了台风登陆前后云系结构特征的变化,为台风定位、强度估算、及由台风引发的降水估计提供了良好的参考依据。

REFERENCES

- [1] Strabala K I, Ackerman S A, Menzel W P. Cloud properties inferred from 8 ~ 12 μm data [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1994, **33**(2): 212 - 229.
- [2] LIU Jian, DONG Chao-Hua, ZHU Yuan-Jing, et al. Ther-

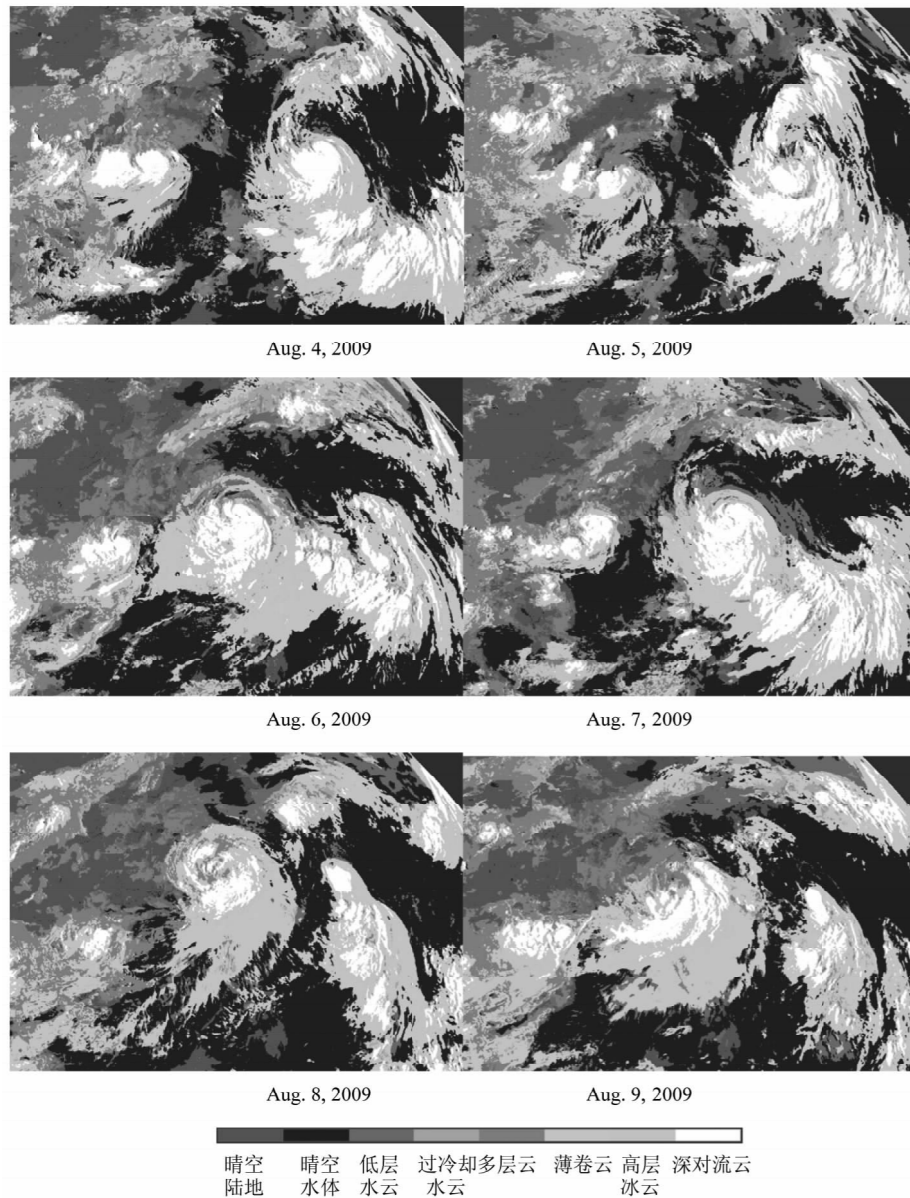


图 8 2009 年 8 月 4 日~9 日 00:00(UTC)FY-2C 云相态识别云图
 Fig. 8 FY-2C cloud phase image at 00:00 from Aug 4 to 9 in 2009

- modynamic phase analysis of cloud particles with FY1C Data[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(刘健,董超华,朱元竞,等.FY-1C 资料在云顶粒子热力学相态分析中的应用研究. *大气科学*),2003,**27**(5):901-908.
- [3] Kokhanovsky A A, Jourdan O, Burrows J P. The cloud phase discrimination from a satellite[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2006,**13**(1):103-106.
- [4] Heymsfield A J, Miloshevich L M, Slingo A, et al. An observational and theoretical study of highly supercooled altocumulus[J]. *J. Atmos. Sci.*,1991,**48**(7):923-945.
- [5] Inoue T. On the temperature and effective emissivity determination of semitransparent cirrus clouds by bispectral measurements in the 10 μm windows region[J]. *J. Meteor. Soc. Jpn.*,1985,**63**(1):88-99.
- [6] LIU Jian, XU Jian-Min, FANG Zong-Yi. Analysis of the cloud properties using NOAA/AVHRR data[J]. *Journal of Applied Meteorology Science*(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.
- [7] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements, part I: Theory [J]. *J. Atmos. Sci.*,1990,**47**(15):1878-1893.
- [8] Rosenfeld D, Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data[J]. *Atmos. Res.*,1994,**34**(1-4):259-283.
- [9] Saunders R W, Kriebel K T. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*,1988,**9**(1):123-150.
- [10] Rossow W B, Schiffer R A. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. *Bulletin of the American meteorological Society*,1999,**80**(11):2261-2287.