

吴晓,游然,王旻燕,等. 基于 MODIS 云宏微观特性的卫星云分类方法. 应用气象学报, 2016, 27(2): 201-208.  
doi:10.11898/1001-7313.20160208

# 基于 MODIS 云宏微观特性的卫星云分类方法

吴 晓<sup>1)2)\*</sup> 游 然<sup>1)2)</sup> 王旻燕<sup>3)</sup> 谷军霞<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081)

<sup>2)</sup>(国家卫星气象中心,北京 100081)

<sup>3)</sup>(国家气象信息中心,北京 100081)

## 摘 要

利用 MODIS 云光学厚度、云粒子有效半径、云顶高度、云相态等产品,以及表征 6 种云类的云光学厚度、云粒子有效半径、云顶高度、云相态的特征值,采用最小距离分类法和多阈值判识法相结合,对卫星观测像元的云进行分类,包括层云、层积云、积云、积雨云、雨层云、高积云/高层云、卷云以及卷云伴随高积云或高层云的多层云、卷云伴随层云或层积云的多层云、高积云或高层云伴随层积云或层云的多层云 10 类。2008 年、2013 年卫星分类结果与地面站云类观测对比,达到 60% 的一致性;将相同时间的地面小时降水量与分类结果叠加显示,出现降水处多为雨层云或积雨云。

**关键词:** 云分类; 特征值; 最小距离分类法

## 引 言

云在地球大气系统的辐射平衡中起重要作用,是气候模式的一个重要参量,它反映了地球上的天气、气候系统状态,不同的云类由于产生于不同的大气热力、动力条件,其存在反映出该地区大气状态,如积雨云预示着强对流天气,反映了大气的不稳定性,雨层云往往发生在大的锋面或气旋云系中,反映了大气中大规模的上升运动,因此,正确的云分类对于天气预报十分重要。

关于云的特征及分类,已有很多研究<sup>[1-6]</sup>,而采用卫星资料进行云分类,在我国也有十多年的历史<sup>[7-8]</sup>,也形成了风云卫星的云分类业务产品,但受探测仪器和分类方法限制,产品精度和深度均有待提高。2011 年美国在 NPOESS(National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System)系统<sup>[9-19]</sup>的云产品开发中,提出了利用一组特征值

的最小距离进行云分类的方法。本文利用云的宏微观特性,即云光学厚度、云粒子有效半径、云顶高度、云相态与 6 种云类的特征值,基于最小距离计算进行分类,结合阈值判别,对卫星像元的云进行分类,并将卫星分类结果与地面观测做对比,取得了较好效果。

## 1 云分类方法和资料

地球上的云千变万化,包括层云(St)、层积云(Sc)、积云(Cu)、积雨云(Cb)、雨层云(Ns)、高积云(Ac)、高层云(As)、卷云(Ci)、多层云等基本类型,相同的云类具有近似的宏微观特征,如高、中、低云的云底高度分别为高于 6.5 km, 4.5 km, 低于 2.5 km, 因此,根据这些特征可区分不同的云类。表 1 给出了层云/层积云、雨层云、积雨云、高积云/高层云、积云、卷云 6 种云类的宏微观特性的特征值及取值范围<sup>[9-10, 20-21]</sup>。

2015-04-13 收到, 2015-10-20 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41205016)

\* email: wuxiao@cma.gov.cn

表 1 各种类型云的宏微观特性

Table 1 Macro and micro properties of 6 cloud types

云类	云顶高度/km		云粒子有效半径/ $\mu\text{m}$		云光学厚度		云相态
	平均	范围	平均	范围	平均	范围	
层积云/层云	1.3	0~2.5	13.5	2~25	5.5	1~10	水
高层云/高积云	3.5	1.5~5.5	17	4~30	17	2~32	水/冰
积云	3.3	0.2~6.5	27.5	5~50	26.5	3~50	水/冰
积雨云	12	6~20	27.5	5~72	50	25~100	冰
雨层云	8	4~11	17	5~50	50	25~100	水/冰
卷云	9.5	6.5~15	65	10~120	3.5	0.01~8	冰

### 1.1 最小距离分类法的基本原理

设  $X_j$  为卫星像元的某一参数(如云顶高度  $h$ 、云光学厚度  $o$ 、云粒子有效半径  $r$ 、云相态  $p$ )  $X_{j,i}$  为第  $i$  类云模型的这一参数的特征量(表 1), 卫星参数  $X_j$  与特征量  $X_{j,i}$  的绝对距离  $d_{j,i}$  为

$$d_{j,i} = |X_j - X_{j,i}|, \quad (1)$$

每个卫星像元的每个参数针对 6 类云模型可计算出 6 个绝对距离  $d_{j,i}$ , 其中, 最小  $d_{j,i}$  对应的云类即为区分出的云类型<sup>[10]</sup>。实际处理中, 为了统一不同参数的绝对距离  $d_{j,i}$  因量纲不一而带来的大小不一, 将  $d_{j,i}$  进行标准化处理,

$$n_{j,i} = \frac{|X_j - X_{j,i}|}{X_j}. \quad (2)$$

式(2)中,  $n_{j,i}$  为标准化距离, 实际上是某一卫星参数与特征量的绝对距离与该参数的比值, 绝对距离大的标准化距离大, 反之则小,  $j$  个不同参数的标准化距离之和  $n_i$  为

$$n_i = \sum_{j=1}^N \rho_j \times n_{j,i}. \quad (3)$$

式(3)中,  $\rho_j$  为某一参数的权重, 通过试验, 得云顶高度  $h$  的权重  $\rho_{h,j} = 0.5$ 、云光学厚度  $o$  的权重  $\rho_{o,j} = 0.25$ 、云粒子有效半径  $r$  的权重  $\rho_{r,j} = 0.25$  时可得最好的分类效果(由于积云和高积云、高层云的云相态可为固态, 也可为液态, 因此, 试验后将云相态的权重取为 0), 对于每个卫星像元可以计算出针对 6 类云模型的 6 个  $n$ , 最小  $n_i$  所对应的第  $i$  类云即为分析出的卫星云类<sup>[10]</sup>。

### 1.2 分类方法的实际处理

在实际对卫星资料的处理中, 由于大气中常存在多层云, 因此, 单一的典型云类最小距离判别不再适用, 且雨层云和积雨云的光学厚度变化较大(25~100), 因此, 使用光学厚度的最小距离会引入较大误差, 经过反复试验并参照表 1 中各个云参数的取值

范围, 将分类方法细化为多层云、雨层云、积雨云用阈值判别法和典型的其他云类用最小距离判别法。分类根据表 1, 首先由云顶高度( $h$ )和云光学厚度( $o$ )按  $h \geq 6.5 \text{ km}, o \geq 8; h \leq 6.5 \text{ km}, o > 50; h \geq 6.5 \text{ km}, o < 8$  及  $h < 6.5 \text{ km}, o < 50$  分为 3 组。对于第 1 组按  $o \leq 24$  区分开卷云伴随高层云或高积云的多层云和深对流云-积雨云、雨层云, 再由云顶温度( $t$ )与 MODIS 窗区通道亮温( $b$ )之差( $t-b$ )  $< -2 \text{ K}$  区分积雨云与雨层云。对于第 2 组则按  $h \leq 4 \text{ km}$  区分高积云或高层云伴随层积云或层云的多层云与积雨云、雨层云, 再按云粒子有效半径  $r > 30 \mu\text{m}$  区分积雨云和雨层云。第 3 组是典型的层积云/层云、积云、高积云/高层云、卷云, 由式(1)~式(3)计算分析得到(图 1)。

### 1.3 资料

采用 MODIS 云宏、微观特性产品和地面气象台站的云类观测、地面小时降水量观测资料对上述云分类方法进行试验, 欧洲、南美洲和赤道太平洋地区 2008 年和 2013 年卫星分类结果与地面云类观测相匹配共 2814 站次, 用于两者的一致性统计。另外, 2012 年和 2014 年夏季及 2014 年冬季的卫星分类个例与地面小时降水量相叠加分析, 用于分类结果的辅助验证。

## 2 分类结果及验证

### 2.1 分类结果

MODIS 云产品资料, 包括云光学厚度、云粒子有效半径、云顶高度、云相态、云顶温度、窗区通道亮温, 经软件处理, 进行 2008 年、2013 年及 2014 年的云分类试验, 下面给出处理软件对台风、梅雨锋云系、冬季中国南方的层状降水云的分类结果。

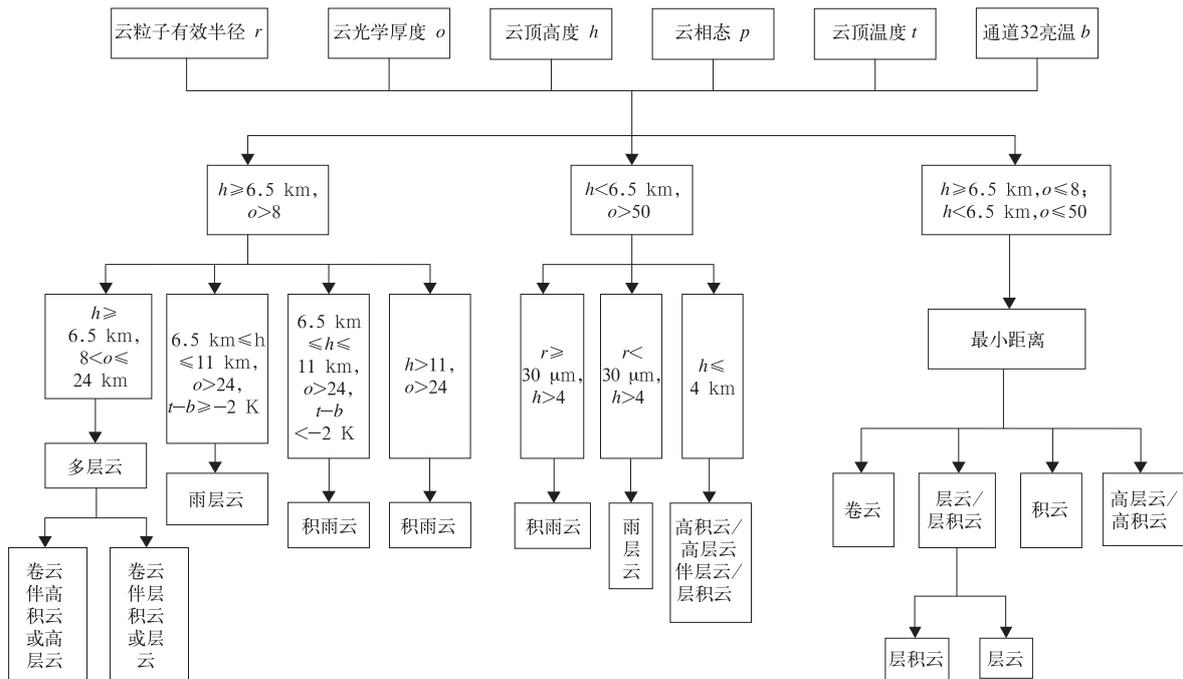


图 1 云分类示意图

Fig. 1 Sketch map of cloud type identification

2.1.1 台风云系

图 2 是 2014 年 12 月 29 日 05:05(世界时,下同)台风蔷薇(1423)的 MODIS 分类结果,分类得到台风外围的丝缕状卷云、台风云墙及内螺旋云带上的积雨云和多层云,可以看到,亮温图白亮的地区对

应着积雨云(图略)。图 3 为用作判识的云光学厚度(云顶高度、云粒子有效半径、云相态图略),由图 3 可以看到,台风蔷薇的光学厚度结构,台风云墙及内螺旋云带为光学厚度很大的地区,对应积雨云,其余多为  $o < 8$  的卷云。

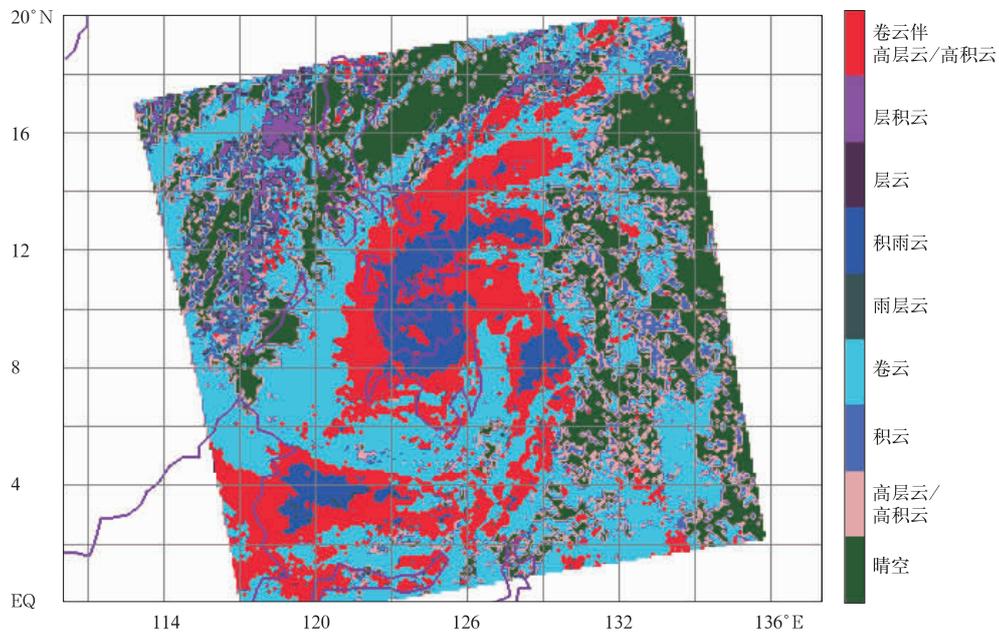


图 2 2014 年 12 月 29 日 05:05 台风蔷薇的云分类结果

Fig. 2 Classified cloud types of typhoon Qiangwei at 0505 UTC 29 Dec 2014

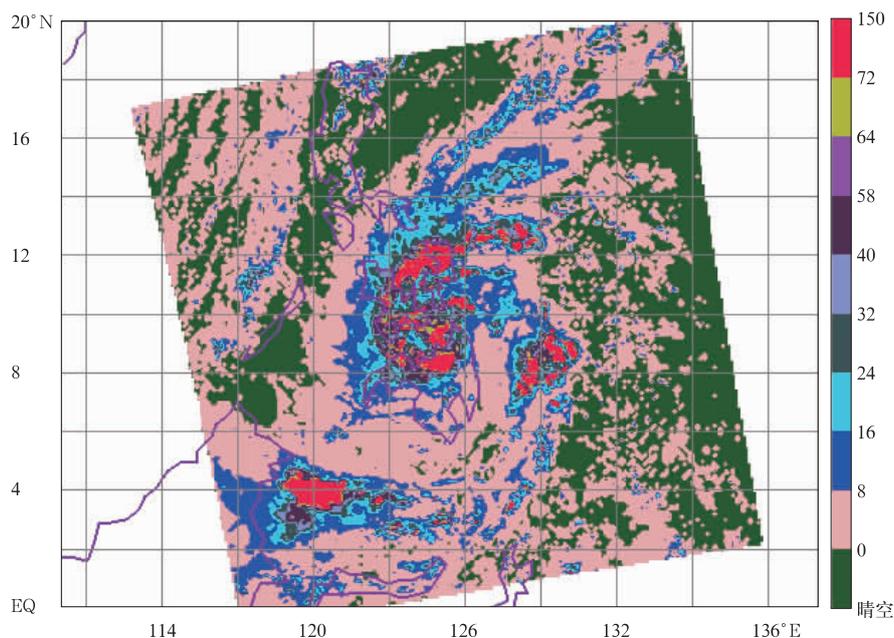


图 3 2014 年 12 月 29 日 05:05 台风蔷薇 MODIS 云光学厚度

Fig. 3 MODIS optical thickness data of typhoon Qiangwei at 0505 UTC 29 Dec 2014

### 2.1.2 梅雨锋云系

图 4 是 2014 年 6 月 27 日 05:15 梅雨锋云系的分类结果,得到梅雨锋上发展强烈的中尺度对流单体-积雨云,以及锋面上的雨层云、高积云/高层云、

多层云、积云、锋前部的卷云,与相同时刻的地面小时降水量叠加显示(图略),出现降水的地方为积雨云和雨层云。

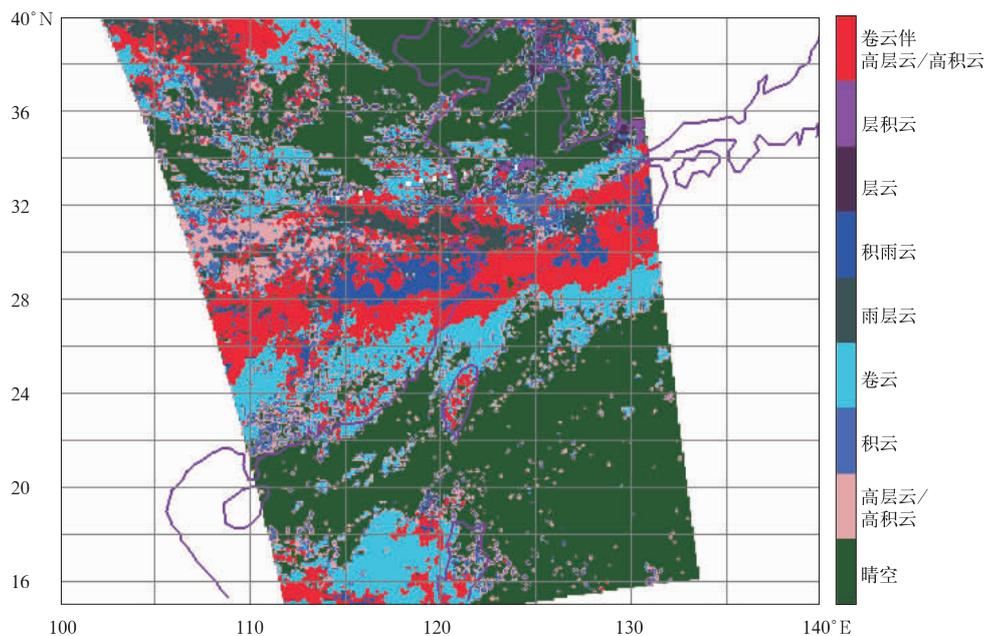


图 4 2014 年 6 月 27 日 05:15—05:20 梅雨锋云系的分类结果

Fig. 4 Classified cloud types of Meiyu front for 0515—0520 UTC 27 Jun 2014

### 2.1.3 冬季层状云系

图 5 及图 6 是 2013 年 1 月 3 日 04:50—06:35

的我国南方冬季的层状云的亮温和云分类结果,得到大片雨层云,33°N 以南为雨层云和高层云覆盖。

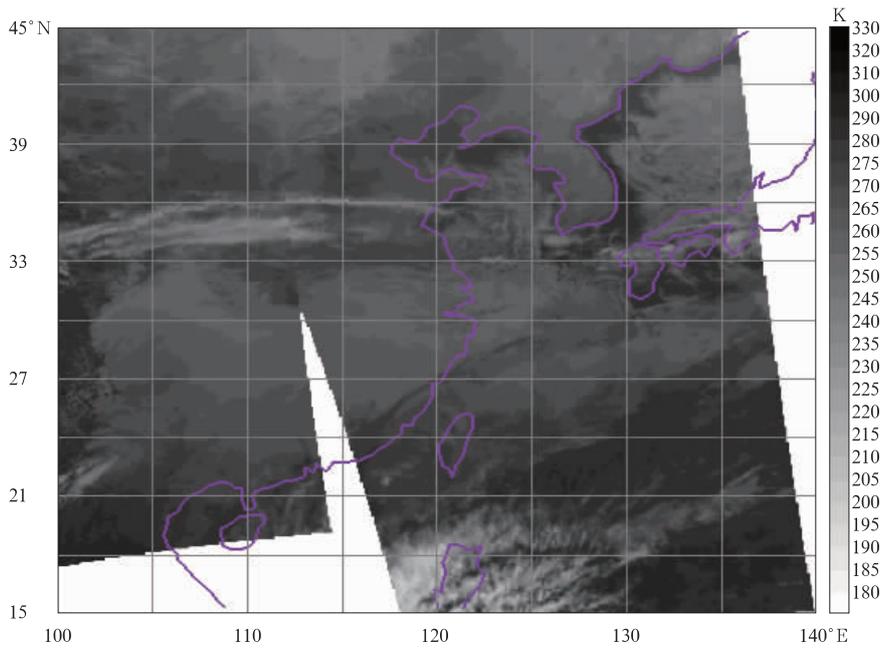


图 5 2013 年 1 月 3 日 04:50—06:35 我国南方的层状云系的 MODIS 通道 32 亮温

Fig. 5 The grayscale image of brightness temperature of MODIS channel 32 for 0450—0635 UTC 3 Jan 2013

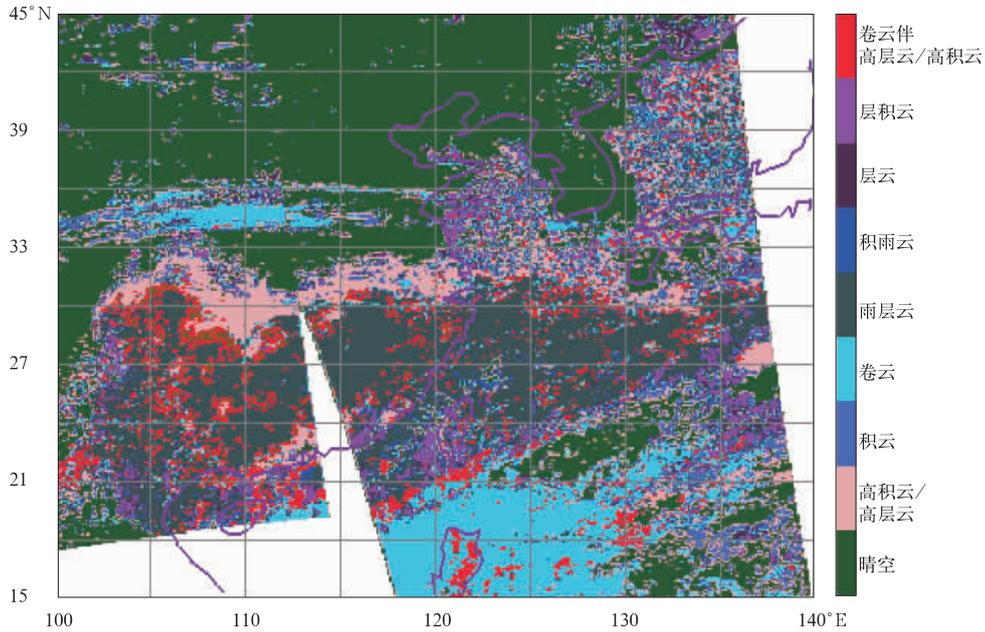


图 6 2013 年 1 月 3 日 04:50—06:35 层状云系的分类结果

Fig. 6 Classified cloud types for 0450—0635 UTC 3 Jan 2013

## 2.2 云分类结果的验证

### 2.2.1 基于地面观测的验证

通过与地面气象站的人工云类观测对比,验证卫星云分类结果的正确性,这里假定预报员在某站观测,代表了其四周 1 km 范围内的云类情况,并假定卫星与地面观测相差 20 min 内云类保持不变。

基于这样的假定,分别对欧洲、南美洲、赤道西太平洋地区的卫星云分类结果与地面观测进行对比检验,由中国气象科学数据共享服务网 <http://cdc.nmic.cn> 下载的资料中有地面云类观测要素的地面台站有限,检验采用逐站对比,如果地面观测为层积云,而卫星分类也为层积云,则记为判别正确(地面

观测到多种云,而卫星分类为其中一种,也记为正确),随机选取了 2008 年、2013 年的资料进行对比,2814 站次检验二者的一致性达 60% 以上。不一致的原因,首先是卫星资料的正确性,云顶高度、云光学厚度、云粒子有效半径这些产品均有一定误差;第二是分类方法,由于表 1 中各类云的特征参量取值范围有重合,也使得判识的云有误差;第三是地面观测云类的误差;第四是地面气象站一个点与卫星 1 km 视场的代表性问题;第五是二者的观测时间最

大相差 20 min,其间云类有可能发生变化。

### 2.2.2 小时降水量观测资料的辅助验证

为了进一步检验分类结果的正确性,选用了中国区域的地面小时降水量,通过将卫星分类与小时降水量资料叠加显示,在有降水之处大多为雨层云或积雨云。图 7 是 2012 年 8 月 3 日登陆台风苏拉(1209)和达维(1210)以及地面 2 h 降水量观测的叠加图,分类得到台风的积雨云与地面台风降水量观测配合很好。

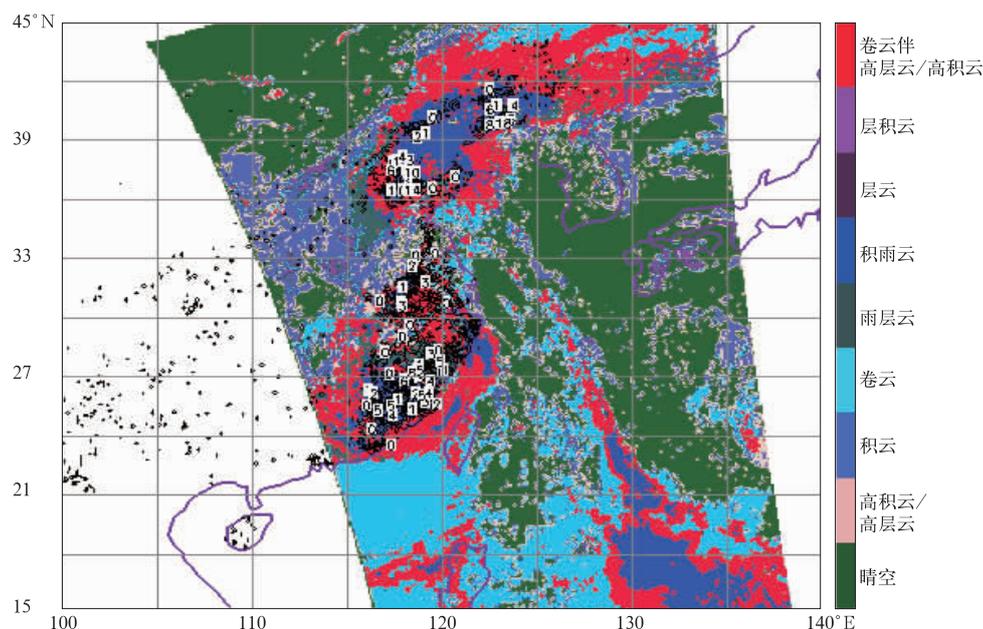


图 7 2012 年 8 月 3 日 04:55—05:05 地面 2 h 降水量(数字,单位:mm)与云分类结果叠加

Fig. 7 Chart combined cloud types with 2 h precipitation(number,unit:mm) for 0455—0505 UTC 3 Aug 2012

## 3 小 结

利用 MODIS 的云宏观特性产品及最小距离法和多阈值法相结合的技术,对 MODIS 云图进行云分类,得出如下结论:

1) 由于分类方法综合了云的微观物理特性和宏观物理特性,使云分类判别的依据较为充分,取得了较好的分类结果,特别是由于云光学厚度较大程度地揭示了云中的含水量、云的垂直厚度,因此,分类技术较好地捕捉到有降水的云(如积雨云、雨层云)以及多层云结构(如卷云伴高积云/或高层云等)。

2) 云粒子有效半径较好地区分了积雨云和雨层云。

但由于分类方法是基于云顶高度、云光学厚度、

云粒子有效半径等卫星反演产品,这些产品本身的误差会影响云分类产品的精度,且该项工作仍有其局限性,如不能十分有效区分层云与层积云、淡积云,因为这些云的宏观特性相近,解决这一问题需进一步试验。

基于 MODIS 与 FY-4 气象卫星的云光学厚度产品为 0.55~0.57  $\mu\text{m}$  波段,而云粒子有效半径、云顶高度、云顶温度、云相态均为卫星获得的真实云参数,不同卫星反演的这些宏观特性一致,使这项工作的研究成果处理软件已移植到 FY-4 气象卫星的地面产品算法研发平台,2016 年 FY-4 静止气象卫星在轨运行后将实时获得云分类产品。

## 参 考 文 献

- [1] 孙学金,刘磊,高太长,等. 基于模糊纹理光谱的全天空红外图

- 像云分类. 应用气象学报, 2009, 20(2): 157-162.
- [2] 白慧卿, 方宗义, 吴荣璋. 基于人工神经网络的GMS云图四类云系的识别. 应用气象学报, 1998, 9(4): 402-409.
- [3] 陈勇航, 黄建平, 王天河, 等. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系. 应用气象学报, 2005, 16(6): 717-727.
- [4] 刘健. 中国区域云特征分析及在FY-2云检测中的应用. 应用气象学报, 2009, 20(2): 157-162.
- [5] 刘健, 张里阳. 气象卫星高空间分辨率数据的云量计算与检验. 应用气象学报, 2011, 22(1): 35-45.
- [6] 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.
- [7] 师春香, 瞿建华. 用神经网络方法对NOAA-AVHRR资料进行云客观分类. 气象学报, 2002, 60(2): 250-255.
- [8] 罗敬宁. 云分类. [2006-08-06]. <http://satellite.cma.gov.cn/jsp/basic/onlinehelp.jsp#>.
- [9] Wong E, Sugawa R, Gerald J. National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System; VIIRS Cloud Base Height Algorithm Theoretical Basis Document. ATBD-JPSS-474-00045-2011. 2011.
- [10] Shoucri M. National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System; VIIRS Cloud Cover/Layers Algorithm Description Document. ATBD-JPSS-474-00044-2011, 2011.
- [11] Hutchison K D. The retrieval of cloud base heights from MODIS and three dimensional cloud fields from NASA's EOS Aqua mission. *Int J Remote Sensing*, 2002, 23(24): 5249-5263.
- [12] Liou K N. Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere. New York: Oxford Press, 1992.
- [13] Wilheit T T, Hutchison K D. Retrieval of cloud base height from passive microwave and cloud top temperature data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 1-7.
- [14] Hutchison K, Wong E, Du S C. Cloud base height retrieved during night-time conditions with MODIS data. *Int J Remote Sensing*, 2006, 27(14): 2847-2862.
- [15] Hutchison K D, Etherfon B J, Opping P C, et al. Cloud top phase determination from the fusion of signatures in daytime AVHRR imagery and HIRS data. *Int J Remote Sensing*, 1997, 18(20): 3245-3262.
- [16] Menzel P, Strabala K. Cloud Top Properties and Cloud Phase Algorithm Theoretical Basis Document. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document, 1997.
- [17] Rao N X, Ou S C, Liou K. N. Removal of solar component in the AVHRR 3, 7 radiances for the retrieval of cirrus cloud parameters. *J Applied Meteor*, 1995, 34(2): 482-499.
- [18] Wilheit T T, Hutchison K D. Cloud Base Height Retrieval from DMSM Microwave data with Cloud Temperatures//Proceedings of the 9th AMS Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 1995.
- [19] Heymsfield A J, Donner L J. A scheme for parameterizing ice-cloud water content in general circulation models. *J Atmos Sci*, 1990, 47(15): 1865-1877.
- [20] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989.
- [21] 叶晶, 李万彪, 严卫. 利用MODIS数据反演多层云光学厚度和有效粒子半径. 气象学报, 2009, 67(4): 613-622.

## Cloud Type Identification Based on Macro and Micro Properties of Clouds from MODIS

Wu Xiao<sup>1)2)</sup> You Ran<sup>1)2)</sup> Wang Minyan<sup>3)</sup> Gu Junxia<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (*Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081*)

<sup>2)</sup> (*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)

<sup>3)</sup> (*National Meteorological Information Center, Beijing 100081*)

### Abstract

Satellite cloud type product has been operationally processed in China National Satellite Meteorological Center (NSMC) for many years. But due to causes of instruments on board and methods used for cloud type identification, this product still needs improving. In 2011, American scientists proposed a new method to classify cloud types in NPOESS (national polar-orbiting operational environmental satellite system) cloud products algorithm theoretical basis documents. This method uses the satellite derived cloud optical thickness product, cloud effective radius product, cloud top height product, cloud phase product, a set of characteristic values of cloud optical thickness, cloud effective radius, cloud top height, and cloud phase for 6 cloud types to calculate distances between satellite data and characteristic parameters of 6 cloud types. Finally, a minimum distance is obtained, and the corresponding cloud type is derived.

Using MODIS data, the minimum distance cloud type identification method is combined with multiple-threshold method, and cloud type identification experiments are carried out. By incorporating methods into software, and using cloud optical thickness product, cloud effective radius product, cloud top height product, cloud phase product, cloud top temperature product, and brightness temperature product of MODIS as inputs of the software, cloud type identification results are outputted for years of 2008 and 2013. Results are compared with ground cloud type observations, and two series are more than 60% consistent. Also, pictures combining satellite derived cloud types and ground hourly precipitation amount observations reflect that analyzed cumulonimbus and nimbostratus are reasonably in the zone of raining. Because the cloud optical thickness can largely reveal the water content in clouds and the vertical thickness of clouds, this cloud type identification method captures raining clouds effectively.

**Key words:** cloud type identification; characteristic values; minimum distance cloud type identification method