

基于模糊纹理光谱的全天空红外图像云分类

孙学金¹⁾²⁾ 刘 磊²⁾ 高太长²⁾ 赵世军²⁾ 刘 剑²⁾ 毛节奏¹⁾

¹⁾(北京大学物理学院,北京 100871)

²⁾(解放军理工大学气象学院,南京 211101)

摘 要

为了对全天空红外测云系统获得的红外图像进行云类自动识别,提出了基于模糊纹理光谱结合云物理属性的全天空云类识别方法。首先根据不同滤波窗口的模糊纹理光谱图像特征,确定了滤波窗口大小,然后通过分析不同天空类型下的 FUTS 谱(fuzzy uncertainty texture spectrum)以及同一种天空类型下的 FUTS 谱,考察了 FUTS 进行云类识别的适用性,最后利用最小距离分类法和云基本物理属性对全天空红外图像进行了分类测试。在 200 个测试样本中,层状云、积云、高积云、卷云和晴空的识别率分别为 100%,100%,90%,100%,100%,平均识别率达到 98%。基于模糊纹理光谱的云分类算法对单一云空具有很好的分类效果,可进一步应用于全天空红外图像的云分类识别。

关键词: 云分类;模糊纹理光谱;全天空红外测云系统

引 言

云在大气辐射传输中扮演着重要角色,云的形态、分布、数量及其变化标志着大气运动状况。实现云的自动定量观测对于飞行保障、天气预报等有重要意义。目前按工作平台不同,云的观测主要分为卫星遥感和地基遥感两种方式,地基遥感主要有两个不同于卫星遥感的特点:首先,卫星遥感得到的是云顶亮温,而地基遥感得到的是云底亮温;其次,卫星云图是大尺度观测,而地基遥感则是局地范围的观测,能得到比卫星遥感更为细致的云图信息。两者获取云信息的方式是不同的,Peura 等^[1]认为两者没有优劣之分,应该相互配合使用。

目前来看,卫星云图云的识别技术研究较多,相对成熟。如反映对应区域的灰度值分布的灰度共生矩阵法及其扩展方法^[2-8],表达图像频率特征的 Gabor 滤波器^[9-10],以及很多根据云图特点定义的云的原始特征^[11]、多光谱相态特征^[12]等等,被广泛应用于卫星云图识别中,并取得了较好的识别效果。受地基全天空测云仪器发展的限制,目前地基云图的云识别主要集中于全天空可见光云图云状识别,并且研究较少。Buch 等^[13]对 WSI 云图进行了识别分

类,运用二元决策树进行高积云、卷云、层云、积云和晴空 5 种天空类型的判断,总正确率达到 61%。Peura 等针对 Vaisala 公司研究的全天空成像仪提供的云图,采用云的轮廓清晰度、大小、纤维性程度和边缘等基本物理信息,进行了 10 属的判别,总正确率为 65%^[11]。

全天空红外测云系统是最近研制成功的地基红外遥感系统,它利用 8~14 μm 波段大气向下红外辐射反演云的信息,为云的昼夜连续观测提供了新途径。该系统由光学测量单元、环境参数测量单元、扫描伺服单元、采集控制单元和数据处理单元等组成。光学测量单元使用了一块 320×240 像素的非制冷红外焦平面阵列作为感应元件。工作时,在扫描伺服机构的控制下,按顺序分别得到天顶及天边 8 个方位的红外图像,再经过定标、大气修正、拼图合成成为一张全天空红外辐射分布图像,它表示了天空不同方位、不同天顶角方向垂直向下的红外辐射分布。该系统目前可用于云量、云族和云分布的实时监测,为了进一步实现云类型的自动识别,本文将半球天空作为一个整体来看待,进行云的分类研究,提出了用模糊纹理光谱结合云的物理属性进行全天空云类识别方法,初步试验表明,该方法对单一云空具有很好的识别效果。

1 基于模糊纹理的光谱分析法

1.1 纹理分析

纹理特征是图像分割识别的一个重要而又复杂的特征。纹理特征抽取方法主要有基于结构的方法和基于统计的方法^[14]。基于结构的方法研究重点在于纹理基元之间的相互关系和排列规则,主要适用于非常规纹理,对于分析自然纹理图像则很难取得满意效果^[15]。基于统计的方法则考虑纹理的粗糙度、明暗对比等特征,描述灰度空间的随机分布特征,是自然纹理识别较为有效的方法。

1.2 模糊纹理光谱

He 等^[16]提出了与上述两类方法不同的基于纹理基元的光谱分析法,计算出每个像元与周围像元相对灰度关系作为一个纹理基元,并认为这样能得到更有代表性的纹理信息。Lee 等^[17]提出了一种模糊不确定度纹理光谱分析法(fuzzy uncertainty texture spectrum),简称 FUTS,用均一表面的不确定度表示纹理中一点 P 属于均一表面的程度,其取值范围为 $[0, 1]$,通过它可以将灰度范围的图像转化为模糊图像,对于纹理较粗图像,在相应的模糊图像中,像元亮度较小。如果用三角隶属度函数将灰度图像 f 转化为模糊图像,那么均一表面的不确定度定义为:

$$\mu_{ij} = 1 - \left[\frac{|f(i, j) - \overline{f(i, j)}|}{\max_R f(i, j)} \right] \quad (1)$$

式(1)中, $\max_R f(i, j)$ 是以 (i, j) 为中心、 $w \times w$ 区域 R 中灰度值最大的像元,平均灰度 $\overline{f(i, j)}$ 由式(2)给出:

$$\overline{f(i, j)} = \frac{1}{w \times w - 1} \sum_{m, n \neq i, j}^R f(m, n) \quad (2)$$



由式(1)转化的模糊图像体现了区域特征,故对模糊图像的 μ_{ij} 值进行统计分析,便于揭示其图像的纹理特征,以横坐标表示均一表面的不确定度 μ_{ij} ,以纵坐标表示在一定区域出现的频率,称该频率为模糊不确定纹理光谱。在实际应用中将均一表面不确定度 μ_{ij} 量化为 L 级,定义模糊不确定纹理光谱为:

$$S(v) = \# \{v = [\mu_{ij} \times (L-1)]; (i, j) \in f\} \quad (3)$$

式(3)中, (i, j) 表示图像 f 中的像素点, $\#$ 表示图像 f 中等于 v 的像元个数, v 是均一表面的不确定度 μ_{ij} 量化后的级数, $0 \leq v \leq L-1$ 。

Lee 等^[17]对 Brodatz 纹理中的多幅图像用上述方法进行纹理分析,取 $L=256$,将纹理光谱作为纹理特征,用最小距离法进行分割测试,其分辨率达到 97.5%,另外,还证明这种方法具有旋转不变特性,这对云分类是非常有利的。

2 模糊纹理分析法适用性分析

2.1 滤波窗口的选择

由模糊纹理的定义,首先要选择合适的滤波窗口 $w \times w$,下面对滤波窗口的选择进行讨论。分析全天空红外图像中的辐射值数据,分析区域是半径为 325 个像元的圆形区域。以 2007 年 1 月 11 日 14:28(北京时,下同)的图像进行分析。分别用 $3 \times 3, 7 \times 7, 13 \times 13$ 等 3 个滤波窗口求取模糊纹理图像(图 1)。窗口较小时(3×3),模糊纹理图像较为细致地反映了原始图像的纹理信息,但显然区域特征的代表性不足;而窗口较大时(13×13)原始图像纹理也能很好地反映出来,但过分放大了其中较小的纹理结构,且窗口越大,一次计算时间越长。

图 2 给出了不同滤波窗口下模糊纹理光谱的变

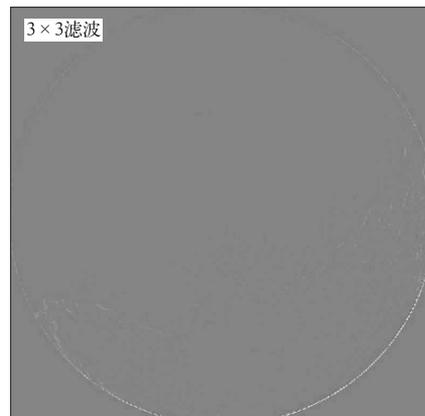
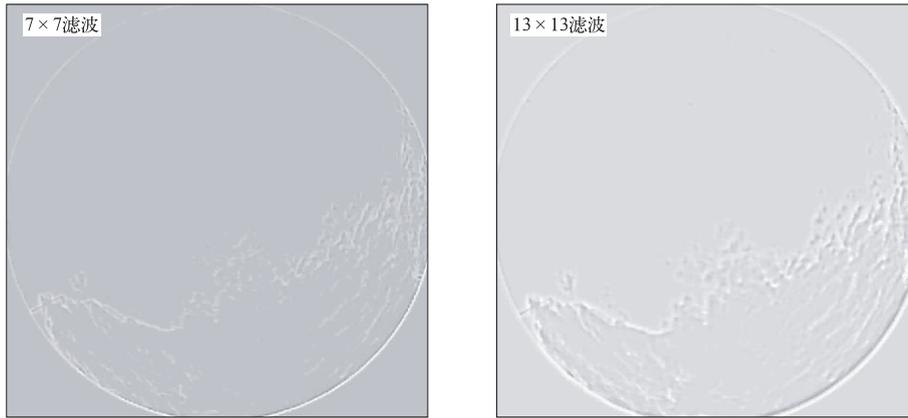


图 1 不同滤波窗口下的模糊纹理图像

Fig. 1 The fuzzy cloud images corresponding to different filter windows



续图 1

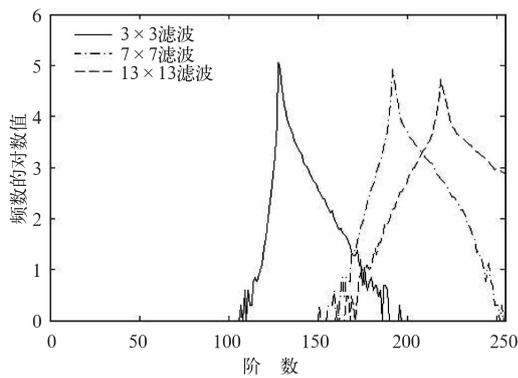


图 2 不同滤波窗口下模糊纹理光谱的变化
 Fig. 2 Differences of the FUTS in fuzzy cloud images corresponding to different filter windows

化规律,图中横坐标表示 0~255 阶,纵坐标表示阶数对应频数的对数值。可见窗口越大,接近第 255 阶的数量越多,也就是说模糊纹理图像越平滑,而实际上需要能合适地反应云图纹理结构信息的模糊图像,并不是越平滑越好。因此,这里考虑代表性和计算时间两个方面,取 7×7 的滤波窗口进行计算。

2.2 云的模糊纹理光谱

下面对不同云的模糊纹理光谱进行分析,从已经建立的样本库中分别选取层状云、卷云、积云、高积云和晴空样本进行计算。层状云为云层较均匀的云类,如蔽光层积云、层云等布满全天的情况,卷云是指所有类型的高云天空。不同类型的模糊纹理光谱如图 3 所示。由图 3 可见,不同云类的模糊纹理

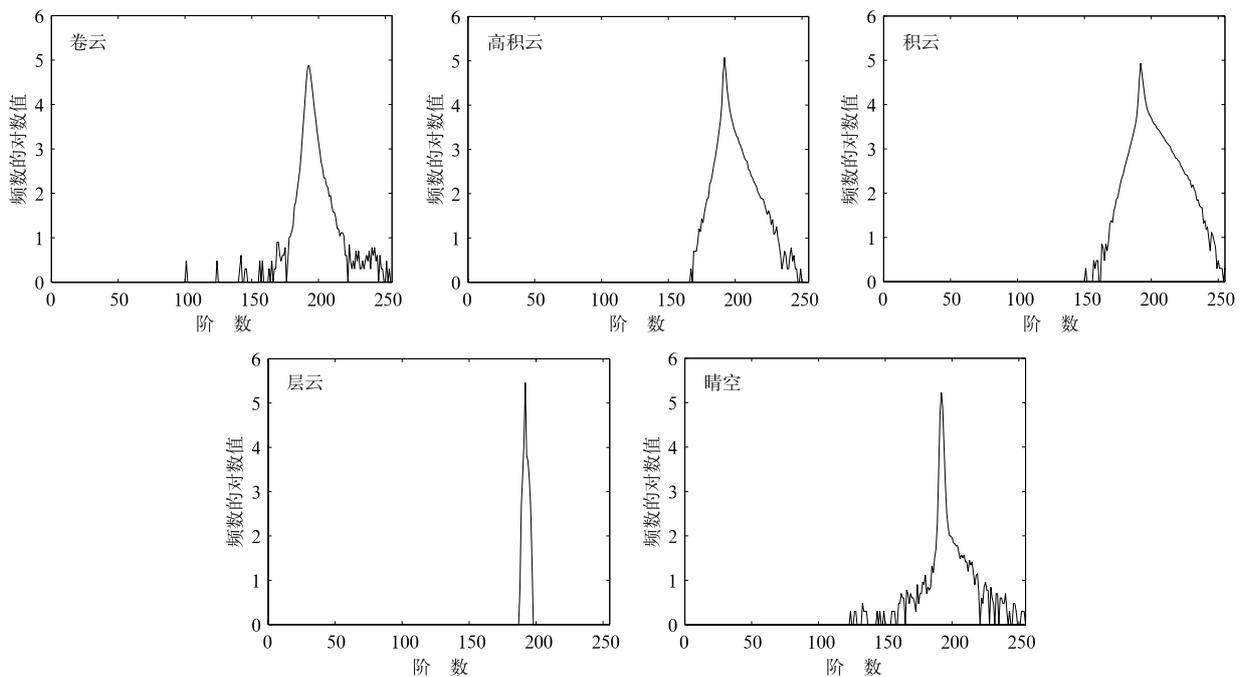


图 3 不同类型云的模糊纹理光谱
 Fig. 3 The FUTS for different sky conditions

光谱是不同的。层状云与其他云类之间的差异较大,能很好地进行区分,卷云和晴空之间、高积云和积云之间差异较小,有可能会错分。

进一步考察了同类云的模糊纹理光谱,限于篇

幅这里仅给出积云的情况。在积云的典型云集中随机选取了5组数据,模糊纹理光谱如图4所示。由图4中可以看到同类云的模糊纹理光谱具有很好的—致性,这为全天空云分类提供了非常有利的条件。

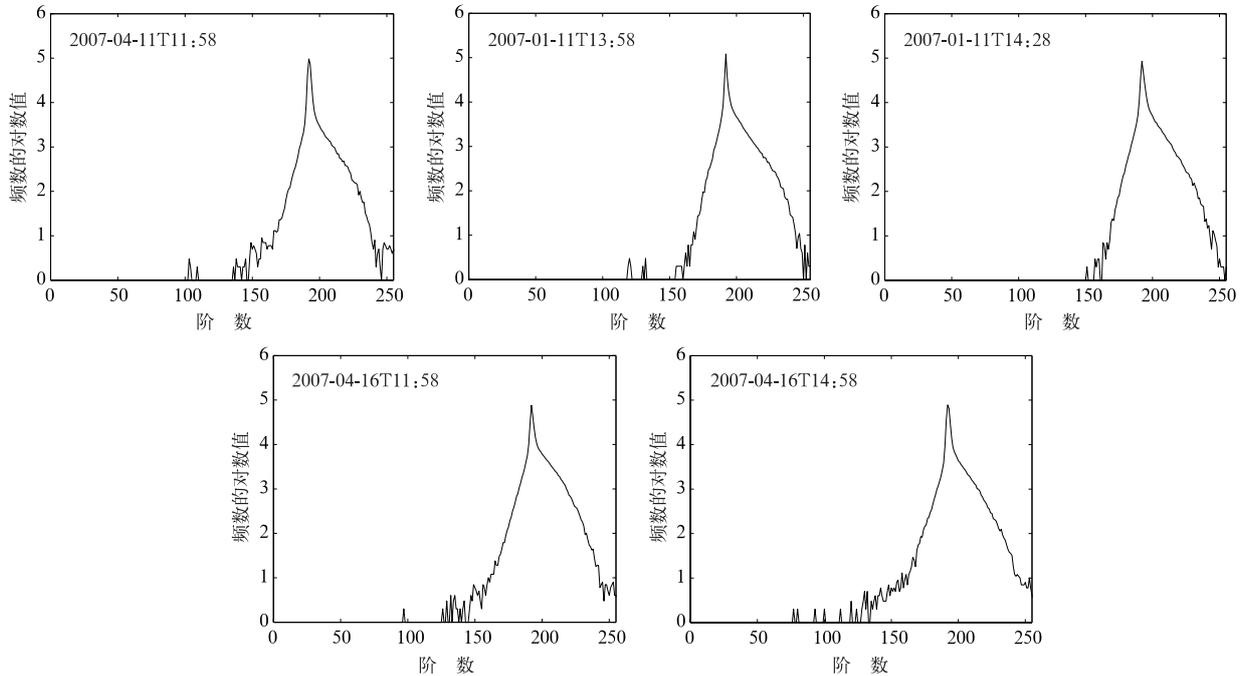


图4 积云天空的模糊纹理光谱

Fig. 4 The FUTS for the cumulus

2 分类实验结果与分析

基于上述分析,对全天空云图进行分类实验,分类时采用最小距离法:① 计算5种典型云图的模糊纹理光谱 S_k ,其中 k 为云类数,这里取 $1\sim 5$;② 计算测试云图的模糊纹理光谱 T ;③ 分别计算测试云图的模糊纹理光谱 T 与5种典型云图模糊纹理光谱 S_k 的距离,根据最小距离法初步判断最小距离对应的典型云即为测试样本的云类型。

分析数据取自架设在解放军理工大学气象学院实验楼顶的全天空红外测云系统在2006年12月—2007年4月的实验数据。全天空红外测云系统每半小时获取一张红外图像,比对数据是南京大校场的人工目测数据,考虑到夜间人工目测的困难、雨天对仪器数据的影响以及低能见度下的观测问题,为使得参照标准具有较好的可靠性,只选择去除雨天和低能见度($< 600\text{ m}$)的、天空为单一类型云的07:00—17:00整点数据200组,其中层状云、卷云、

积云、高积云和晴空样本各40组。分类混淆矩阵如表1所示。其中,层状云和晴空的正确率均达到100%,积云和卷云的正确率为82.5%,积云40个测试样本有7个误判为高积云,卷云40个样本中有6个误判为晴空,1个误判为高积云,而高积云的正确率只有80%,主要误判为卷云,少数误判为积云和卷云。平均识别正确率为89%,说明单纯使用模糊纹理光谱对全天空云图进行识别分类是可行的。经过分析发现,卷云误判为晴空主要有两种情况,一是当卷云具有很薄、很细的结构且几乎布满天空时,由于模糊纹理考虑的是像元与周围像元相对灰度关

表1 模糊纹理光谱分类混淆矩阵

Table 1 The confusion matrix for the test sky condition

	层状云	积云	高积云	卷云	晴空
层状云	40	0	0	0	0
积云	0	33	1	0	0
高积云	0	7	32	1	0
卷云	0	0	6	33	0
晴空	0	0	1	6	40
总数	40	40	40	40	40
正确率/%	100	82.5	80	82.5	100

系,因而此时得到的模糊纹理谱与晴空时的谱相似性较大;二是卷云量非常少时,模糊纹理光谱与晴空时的谱几乎一致。卷云误判成高积云主要是因为一些卷积云样本没有细分出去,此时卷云具有波状结构特点,与高积云的结构相似。

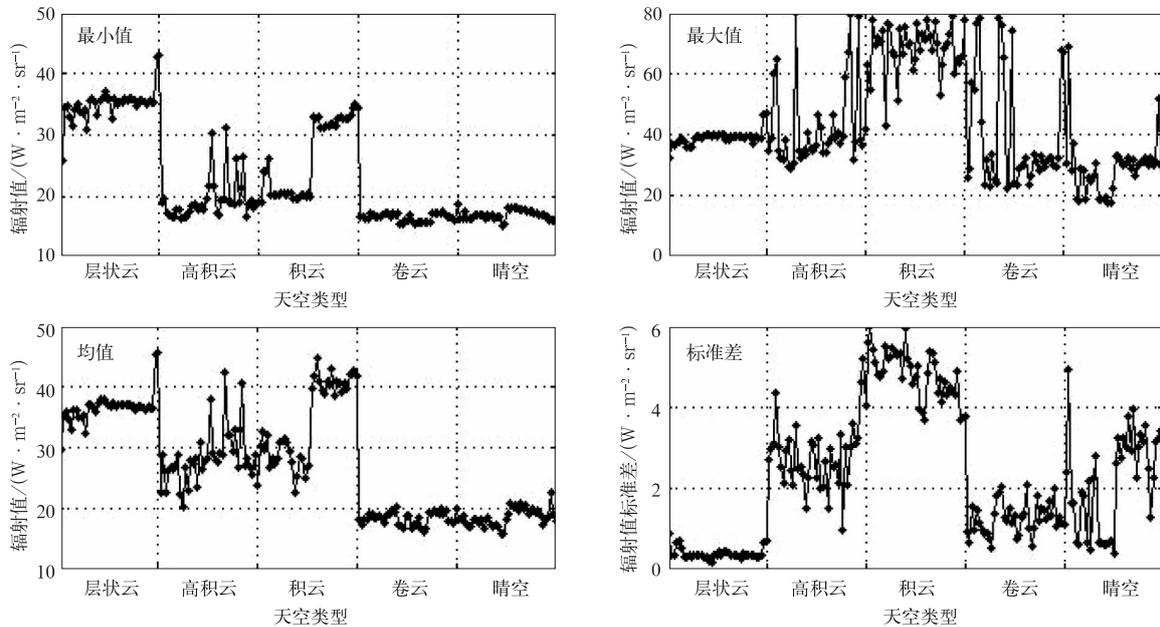


图 5 全天空图像辐射值统计信息

Fig. 5 The essential information in the cloud image

云为低云,因而其最小值相对于卷云、晴空来说较大,而高积云由于云底高度变化较大,因而最小值范围变化也较大,在晴空与积云之间变化,由于选取的样本来自不同月份,因而积云的最小值出现了两组,这在平均值图中也可明显看出,这也表明无法用辐射最小值来直接区分积云。由辐射最大值图中可以看出,积云最大值要比其他几类云高。从平均值图中可以看出,卷云和晴空的平均值较接近,且最小,基本上在 $21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 以下,而积云相对要高些,层状云的平均值也较高。而由标准差图中可以看出,积云、高积云、层状云的标准差具有较好的区分度,积云的标准差较大,一般大于 $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,而层状云的标准差较小,基本在 $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 以下,但高积云的标准差与卷云和晴空有重叠。鉴于上述特点,如果模糊纹理光谱法判断为晴空或卷云天空,但此时均值在 $21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 以上,应该将结果修正为高积云天空。

为了进一步提高卷云和晴空的识别率,可结合有云无云信息和模糊纹理光谱进行分析判别,由表

为了进一步降低误判率,考虑加入云类的物理属性信息。图 5 为根据全天空红外图像的像元辐射值计算的整幅图像的辐射最小值、最大值、平均值和标准差。

由辐射最小值图中可以看出,由于积云和层状

1 可知模糊纹理光谱分析法只会将卷云误判为晴空,而不会将晴空误判为有云,因而若系统根据辐射阈值信息判断天空有云,则进一步可通过模糊纹理光谱分析法将其区分为卷云还是其他云。

根据上述分析,在模糊纹理光谱识别的基础上,利用图像的平均值、均方差信息以及辐射阈值信息重新对 200 个样本进行了识别,分类结果如表 2 所示。此时,积云天空和卷云天空的判断正确率都从 82.5% 提高到了 100%,高积云天空的判断正确率也由 80% 提高到了 90%,平均正确率高达 98%。

表 2 模糊纹理光谱加灰度统计量分类混淆矩阵
Table 2 The confusion matrix for the test sky condition with the essential information in the cloud image

	层状云	积云	高积云	卷云	晴空
层状云	40	0	0	0	0
积云	0	40	3	0	0
高积云	0	0	36	0	0
卷云	0	0	1	40	0
晴空	0	0	0	0	40
总数	40	40	40	40	40
正确率/%	100	100	90	100	100

3 结 论

全天空红外测云系统是新研制的地基遥感系统,通过定标、大气修正和拼图处理可获得全天空红外分布图像,为云的信息提取提供了新的途径。本文利用模糊纹理光谱结合云的基本物理属性研究了全天空云类的识别方法,结果表明:

1) 由于云的形态变化复杂,仅从图像的模糊纹理进行云的区分信息还不够,加入云的基本物理属性有助于提高识别率。

2) 模糊纹理光谱结合云的基本物理属性判断全天空云类有效,可较好地区分和识别层状云、高积云、积云、卷云和晴空等典型天空。

由于本文所选样本仅限于单一类型云的天空,因而如何将该方法应用于实际的非单一类型云的天空,还需要进一步进行研究。

参 考 文 献

- [1] Peura M, Visa A, Kostamo P. A New Approach to Land-Based Cloud Classification//Proceedings of ICPR,IEEE, 1996:143-147.
- [2] Lohmann G. Co-occurrence-based Analysis and Synthesis of Textures //Proc 12th IAPR Internat Conf Pattern Recognition, Vol 1, Jerusalem, 1994.
- [3] Haralick R M, Dinstein I, Shanmugam K. Textural features for image classification. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1973, 3, 610-621.
- [4] Welch R M, Kuo K S, Sengupta S K, et al. Cloud field classification based upon high spatial resolution textural feature (I): Gray-level cooccurrence matrix approach. *J Geophys Res*, 1988, 93 (10): 12663-12681.
- [5] Kuo K S, Welch R M, Sengupta S K. Structural and textural characteristics of cirrus clouds observed using high spatial resolution landsat imagery. *J Appl Meteorol*, 1988, 27 (11): 1242-1260.
- [6] 傅德胜,王新芝. 云图纹理特征的抽取与云的自动分类. 南京气象学院学报, 1995, 18(4): 530-535.
- [7] 寿亦萱,张颖超,赵忠明,等. 暴雨过程的卫星云图纹理特征研究. 南京气象学院学报, 2005, 2(3): 337-343.
- [8] 夏德深,金盛,王健. 基于分数维与灰度梯度共生矩阵的气象云图识别. 南京理工大学学报,1999, 2(3): 278-281.
- [9] Lamei N, Hutchison K D, Crawford M M, et al. Cloud-type discrimination via multispectral textural analysis. *Opt En*, 1994, 33 (4): 1303-1313.
- [10] Du L J. Texture Segmentation of SAR Images Using Localized Spatial Filtering//Proc Int Geosci Remote Sensing Symp, Washington D C, May, 1990: 1983-1986.
- [11] 白慧卿,方宗义,吴蓉璋. 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.
- [12] 周著华,白洁,刘健文,等. MODIS 多光谱云相态识别技术的应用研究. 应用气象学报,2005, 16(5):678-684.
- [13] Buch K A Jr, Sun C H. Cloud Classification Using Whole-sky Imager Data//Proceedings of the ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Charlotte, North Carolina, 1995: 353-358.
- [14] Haralick R M. Statistical and Structural Approaches to Texture // Proc IEEE 67, 1979: 786-804.
- [15] Lu C S, Chung P C, Chen C F. Unsupervised texture segmentation via wavelet transform. *Pattern Recognition*, 1997, 30 (5): 729-742.
- [16] He D C, Wang L. Texture unit, texture spectrum and texture analysis. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28 (4): 509-512.
- [17] Lee Y G, Lee J H, Hsueh Y C. Fuzzy uncertainty texture spectrum for texture analysis. *Electron Lett*, 1995, 31 (12) : 959-960.

Cloud Classification of the Whole Sky Infrared Image Based on the Fuzzy Uncertainty Texture Spectrum

Sun Xuejin¹⁾²⁾ Liu Lei²⁾ Gao Taichang²⁾ Zhao Shijun²⁾ Liu Jian²⁾ Mao Jietai¹⁾

¹⁾ (School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

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

Abstract

Clouds play an important role in the earth radiation budget and climate change. Their shape, size, distribution and movement indicate the condition of the atmosphere. Nowadays, cloud amount and cloud height are collected by means of both satellites and ground-based instruments. Satellite cloud images provide global coverage, and these data are used widely in weather forecast. Ground-based cloud images are very local ones which contain more details of clouds.

Cloud classification using satellite images has been done for many years, while the study of ground-based cloud classification is still underway. A method using fuzzy uncertainty texture spectrum and essential information in cloud images is proposed to classify five sky conditions (stratus, cumulus, altocumulus, cirrus and clear sky) automatically based on cloud images obtained from the whole sky infrared cloud measuring system (WSICMS).

The WSICMS is a ground-based passive sensor that uses an uncooled microbolometer detector array to measure downwelling atmospheric radiance in the 8—14 μm wavelength band of the electromagnetic spectrum. It provides a way to identify clouds, obtain clouds distributions and calculate clouds amounts continuously with no difference in sensitivity during day and night. The primary WSICMS components are optical detector, environmental parameter sensors, controller and power component. The optical detector is an uncooled microbolometer array containing 320×240 pixels. It obtains nine images at zenith and at each eight orientations under the control of the scan servo system. A whole sky image is accomplished after spelling nine images, water vapor correction and zenith angles correction.

The WSICMS locating at Nanjing, China has been working since August 2006. The 200 cloud images according to human observations are selected randomly from these sample sets. Before cloud classification, an appropriate FUTS filter window (7×7) is chosen. Analyses of FUTS of five different sky conditions and same sky condition (cumulus) show that FUTS can serve as a good discriminating tool in cloud classification. Based on above analysis, a supervised classification with minimum distance rule is used to classify sky conditions. The classification accuracy rates of stratus, cumulus, altocumulus, cirrus and clear sky compared with human observations increase sharply after adding essential information in cloud images. Importance of the cloud characteristic is shown in cloud classification. The final classification result are 100%, 100%, 90%, 100% and 100% respectively, the average accuracy rate is 98%. Altostratus, cumulostratus and complex sky conditions are not discussed here. Future work on this project will focus on this. In addition, more particular sample sets should be built up to improve the accuracy of both training and test data.

Key words: cloud classification; fuzzy uncertainty texture spectrum; whole sky infrared cloud measuring system (WSICMS)