

气象卫星台风云图的自动识别方法及其应用

李俊 周凤仙

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

提 要

利用图像处理和统计分析相结合的方法,对静止气象卫星的 VISSR 台风图像作定量的分析和研究。结果表明,利用这种方法对台风云图进行分析后,台风的范围、形状、结构、强度等均能得到清晰地识别和度量。

一、引 言

气象卫星遥感探测在短时间内可提供广阔地域上有关大气、海洋、地表和云况的大量信息。我国已经发射了 FY-1 号极轨气象卫星,并且不久还要发射 FY-2 号地球静止气象卫星,因此,对气象卫星图像资料的自动识别和分析研究就显得更为重要。

李俊和周凤仙^[1,2,3]曾利用信息科学的方法和技术,对多光谱气象卫星 NOAA/AVHRR 图像及地球静止卫星 VISSR 图像进行分类和识别,结果使分类后的图像信息集中,资料量大大减少,一些目标物如云、海洋、湖泊、冰雪、植被等的性质均能得到很好地识别和表征。气象卫星图像用得最有效、最成功的地方可能就是热带风暴的警报和监测,在台风定位、确定台风强度、预报台风移动路径等方面获得了广泛的应用。但方法基本上停留在人工观察和目视解译上,预报员要对卫星图像和地面观测资料进行综合分析和判断,才能诊断台风的各个中尺度特征,如范围、强度、边界、形状和结构等。本文设计一种定量分析的方法从卫星云图上对台风的中尺度特征进行识别。这方法可减轻预报员的负担,有利于预报员对照地面观测网进行天气系统的诊断和分析。并且这些中尺度特征图像信息集中,资料量少,有利于将这些信息向远程用户进行压缩传输。

本文取 1989 年 7 月 15 日的台风红外和可见光图像,范围是 256×256 个象素,可见光图像的分辨率退化为 5km,灰度等级扩展到与红外图像相同,都为 256 个灰度等级。

二、图像的纹理特征

所谓纹理是指图像中反复出现的局部模式和它们的排列规则。卫星图像是一种纹理

型图像,考察卫星图像的纹理信息,能够得到关于云类的宏观规律。我们利用灰度共生矩阵作为识别台风图像的纹理测度。

记 $\{f(x,y); x,y=1,2,\dots,N\}$ 为图像窗口 W_N 的图像矩阵, $f(x,y)$ 表示 W_N 的第 x 行、第 y 列的灰度大小。为了减少众多灰度级给分析带来的庞大计算量,将图像灰度级归并,其最高灰度级为 N_g 级, $\{f(x,y)\}$ 的大小范围为

$$G = \{1, 2, \dots, N_g\} \tag{1}$$

我们把 W_N 的行标记集合记为

$$L_x = \{1, 2, \dots, N_x\} \tag{2}$$

W_N 的列标记集合记为

$$L_y = \{1, 2, \dots, N_y\} \tag{3}$$

我们可以把待分析的图像 $\{f(x,y); x,y=1,2,\dots,N\}$ 理解为从 $L_x \times L_y$ 到 G 的一个映射,也就是说,对 $L_x \times L_y$ 的每一个点,对应一个属于 G 的灰度。

定义方向为 θ , 间隔为 d 的灰度共生矩阵^[4]为

$$[P(i, j, d, \theta)] \tag{4}$$

式中: $(i, j) \in G \times G; \theta \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$; 角度以 OX 轴为起始, 逆时针方向计算。

对不同的 θ , 矩阵元素定义如下:

$$P(i, j, d, 0^\circ) = \#\{(k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \mid k-m=0, |l-n|=d; f(k, i)=i, f(m, n)=j\}$$

$$P(i, j, d, 45^\circ) = \#\{(k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \mid (k-m=d, l-n=d) \text{ 或 } (k-m=-d, l-n=-d); f(k, l)=i, f(m, n)=j\}$$

$$P(i, j, d, 90^\circ) = \#\{(k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \mid |k-m|=d, l-n=0; f(k, l)=i, f(m, n)=j\}$$

$$P(i, j, d, 135^\circ) = \#\{(k, l), (m, n) \in (L_x \times L_y) \times (L_x \times L_y) \mid (k-m=d, l-n=-d) \text{ 或 } (k-m=-d, l-n=d); f(k, l)=i, f(m, n)=j\}$$

记号 $\#\{x\}$ 表示集合 x 的元素个数。矩阵 $[P(i, j, d, \theta)]$ 的第 i 行第 j 列元素表示所有 θ 方向, 相邻间隔为 d 的像素中, 有一个取 i 值, 另一个取 j 值的相邻点对数。图像窗口 W_N 内的灰度共生矩阵式(4), 反映了图像灰度关于方向、相邻间隔、变化幅度的综合信息, 是分析卫星图像上云类和地表物的基础。

为表达简便起见, 在下面的共生矩阵表达式中, 我们略去间隔 d 和方向 θ 。

对式(4)表示的共生矩阵, 作正规化处理:

$$P(i, j) / R \Rightarrow P(i, j) \tag{5}$$

这里 R 是正规化常数。

当我们取 $d=1, \theta=0^\circ$ 时, W_N 内每一行有 $2(N_x-1)$ 个水平相邻点对, 因此总共有 $2N_y(N_x-1)$ 个水平相邻点对, 此时取 $R=2N_y(N_x-1)$ 。同样取 $d=1, \theta=45^\circ$ 时, 共有 $2(N_y-1)(N_x-1)$ 个相邻点对, 此时令 $R=2(N_y-1)(N_x-1)$ 。据对称性, 当 $\theta=90^\circ$ 和 135° 时的 R 值选取是显然的。因此

$$R = \begin{cases} 2N_y(N_x - 1) & \text{当 } \theta = 0^\circ, 90^\circ \\ 2(N_y - 1)(N_x - 1) & \text{当 } \theta = 45^\circ, 135^\circ \end{cases} \tag{6}$$

对 W_N 内共生矩阵,取以下几个对于识别云类较为有用的特征,作为图像的纹理测度:

(1)能量

$$ENRG = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \{P(i, j)\}^2 \quad (7)$$

(2)熵

$$ENTR = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} P(i, j) \log P(i, j) \quad (8)$$

(3)惯量

$$INER = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i - j)^2 P(i, j) \quad (9)$$

(4)逆差距

$$IDM = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \frac{1}{(i - j)^2 + 1} P(i, j) \quad (10)$$

(5)相关

$$CORR = \left[\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} i \cdot j \cdot P(i, j) - \mu_x \mu_y \right] / \sigma_x \sigma_y \quad (11)$$

上式中 $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$ 分别表示 $P_x(i), P_y(j)$ 的均值和均方差。而

$$P_x(i) = \sum_{j=1}^{N_g} P(i, j) \quad (i = 1, 2, \dots, N_g) \quad (12)$$

$$P_y(j) = \sum_{i=1}^{N_g} P(i, j) \quad (j = 1, 2, \dots, N_g) \quad (13)$$

在纹理测度中,窗口的选择是很重要的,窗口是包含目标物信息的最小单位,图像窗口是指含有 N_x 行, N_y 列像素的图像局部,一般用 W_N 表示。图像窗口大小的决定一般根据下列原则:①根据业务需要确定可允许的最大和最小图像窗口尺寸。②根据图像分辨率的大小,使所选的图像窗口内至少包含若干纹理基元,并使窗口尺寸在原则①限定的范围内。窗口纹理分析的结果,表示图像窗口中心位置点的纹理信息。

三、模糊聚类法

模糊聚类法在多光谱图像分类中非常有用,我们将介绍此法并用来对 GMS 台风图像进行分类。选择 GMS 卫星图像 ($n_0 \times n_0$ 个像素) 的四个特征 $VIS, IR, IDM-VIS, IDM-IR$ 。其中 $IDM-VIS$ 为可见光图像的纹理特征(逆差距图像),该图像中每一点的灰度值为 VIS 图像上以该点为中心的窗口图像的纹理测度。同样 $IDM-IR$ 为红外图像的纹理特征图像。 $VIS, IR, IDM-VIS, IDM-IR$ 四个特征图像可用下列矩阵 X 来表示:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \cdots x_{1n_0}, x_{1n_0+1} \cdots x_{1n_0^2} \\ x_{21} & x_{22} \cdots x_{2n_0}, x_{2n_0+1} \cdots x_{2n_0^2} \\ x_{31} & x_{32} \cdots x_{3n_0}, x_{3n_0+1} \cdots x_{3n_0^2} \\ x_{41} & x_{42} \cdots x_{4n_0}, x_{4n_0+1} \cdots x_{4n_0^2} \end{pmatrix}$$

其中第一行代表 *VIS* 图像,第二行代表 *IR* 图像,第三行代表 *IDM-VIS* 图像,第四行代表 *IDM-IR* 图像,每一行的元素是由该行所代表的图像通过行排行得到的。将 X 表示成 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 其中 $n = n_0 \times n_0$, 我们也称 $X_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 为 X 的样本。模糊分类的目标是将 X 分成 m 类, 此 m 类由矩阵 $U = [u_{ij}]$ 表征

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mn} \end{pmatrix}$$

矩阵元素满足以下条件:

$$u_{ij} \in [0, 1]; \quad 1 \leq i \leq m; \quad 1 \leq j \leq n \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^m u_{ij} = 1; \quad 1 \leq j \leq n \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n u_{ij} > 0; \quad 1 \leq i \leq m \quad (16)$$

u_{ij} 反映第 j 个样本 X_j 对第 i 类的隶属关系, 称为隶属度, 也称为置信度。

设集合 X 中的每个元素都有 k 个特征(这里 $k = 4$), 即

$$X_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk}), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

并且 m 个聚类中心为

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$$

其中 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}) \in \{V_p | V_p = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i, \alpha_i \in R, X_i \in X\}, i = 1, 2, \dots, m$

取 $d_{ij} = \|X_j - V_i\| = [\sum_{l=1}^k (x_{jl} - v_{il})^2]^{1/2}$ 为样本 X_j 与聚类中心 V_i 的欧氏距离。

定义泛函 J_a

$$J_a(U, V) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (u_{ij})^\alpha \|X_j - V_i\|^2$$

其中 $\alpha \geq 1$ 是待定参数, $\|\cdot\|$ 是 R^k 空间中的范数。显然, 理想的分类是使 J_a 为最小的 V 。可以证明, 上述目标函数的最优问题是可解的^[5], 且解 (U^*, V^*) 可以用下列形式表示:

$$u_{ij}^* = 1 / \sum_{i=1}^m \left(\frac{d_{ij}^*}{d_{ij}^*} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}}; \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (17)$$

$$V_i^* = \sum_{j=1}^n (u_{ij}^*)^\alpha X_j / \sum_{j=1}^n (u_{ij}^*)^\alpha; \quad 1 \leq i \leq m \quad (18)$$

其中 $d_{ij}^* = \|X_j - V_i^*\| > 0$, 具体求解时, 使用迭代算法, 不断调整 V 和 U , 直至解满足条件为止。

四、基于纹理测度台风图像边缘检测方法

为了得到台风的中尺度特征如边界、范围等,我们采用 ICSED(Improved Cluster Shade Edge Detection)图像边缘检测方法对 GMS 红外图像进行操作。

这个方法的基础是灰度共生矩阵,灰度共生矩阵包含了边缘信息,对于灰度共生矩阵 $[P(i, j, d, \theta)]$,定义测度 $S(d, \theta)$ 如下:

$$S(d, \theta) = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i + j - \mu_i - \mu_j)^k \cdot P(i, j, d, \theta) \quad (19)$$

此处 L 是图像的原始灰阶, μ_i, μ_j 如前面所定义, $k \geq 3$ 为奇常数。

$S(d, \theta)$ 可以用来作为边缘检测算子,具体检测如下:对于窗区 $M \times M$,首先计算 $P(i, j, d, \theta)$, ($i=0, 1, 2, \dots, L-1; j=0, 1, 2, \dots, L-1$),然后计算 $S(d, \theta)$ 。每一个 $S(d, \theta)$ 的值反映了窗区中心点的边缘特征。

计算结果表明,对于固定的 k ,边缘图像与阈值 A_k 的选择很有关系。 A_k 选得大,所得到的边缘就多,同时噪声也大,所以必须选择一适当的值,使得到的边缘图像能清晰地反映出台风的中尺度特征。另外,结果还表明, d, θ 的取值对最后的边缘图像几乎没有什么影响,因此为了节省计算机运算时间,我们取 $d=0, \theta=0, S(d, \theta)$ 就简化为:

$$S(d, \theta) = \frac{1}{M \times M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [f(m, n) - \mu]^k \quad (20)$$

$$\text{其中,} \quad \mu = \frac{1}{M \times M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M f(m, n)$$

因此计算群影图像时勿需再计算 $P(i, j, d, \theta)$ 而直接从原来的图像上计算 $S(0, 0)$ 就可以了。从理论上讲, k 越大,检测的效果越好。但计算结果表明, $k \geq 7$ 时, k 值的变化对检测效果已无影响,故这里可取 $k=7$ 。

为了得到高质量的图像边缘,需要对二值边缘图像作一系列后处理,使处理后的边缘更适合于分析台风的结构和特征。后处理过程主要有三个方面:去噪声、半像素加宽及细化。

1. 去噪声

在二值边缘图像上有许多孤立的团点和分散的小段,这些东西通常被认为是噪声或伪边缘。我们采用一种窗滤波法可以将这些噪声去掉。

选择一个 $m \times n$ 的窗口,将这个窗口在二值边缘图像上从左移到右,从上移到下,每移动一次就搜索一次窗口的边界。如果窗口的边界上存在一点其值为“1”,则窗口的边界继续移动;如果窗口的边界上每一点的值都为“0”,则将二值图像上整个窗内的点都赋值为“0”,并且将窗口移动至下一个位置。这样,当窗口从二值图像的左上角移至右下角时,二值图像就被作了一次清除噪声处理。改变窗口的大小可以作多次清除噪声处理,直到满意为止。

2. 半像素加宽

当二值图像作清除噪声处理后,基本上得到了我们所需要的边缘。为了保持图像边缘的连续性并且避免距离为 2 个像素的两条边缘连在一起,我们采用半像素加宽边缘法。这

样既填充了边缘上存在的空隙,又保持了每一条边缘的独立性。

首先,将二值图像 $A(256, 256)$ 放大成二值图像 $B(512, 512)$ 。其中 $B(i, j) = B(i-1, j-1) = B(i-1, j) = B(i, j-1) = A(i/2, j/2)$, $(i, j = 2, 4, \dots, 512)$ 。然后由 $B(512, 512)$ 产生另一个二值图像 $C(512, 512)$: 如果 $B(i, j) = 1$, 则在 $C(512, 512)$ 中将 (i, j) 及其 8 个邻点都赋值为“1”。最后,由 $C(512, 512)$ 产生我们所需要的二值图像 $D(256, 256)$ 。其中:

$$D(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } C(2i, 2j) + C(2i+1, 2j) + \\ & C(2i, 2j+1) + C(2i+1, 2j+1) \geq 3 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 256)$$

3. 细化

经过半像素加宽处理后,得到了宽度一般为 3 像素左右的边缘二值图像。为了得到单像素宽的边缘图像,我们采用一种细化算法,这种算法称为逐步剥落算法,就是删除一切可以删除的像素,直到没有像素可删为止(所谓删除一个像素是指将一个值为“1”的像素置值为“0”)。在二值图像上一个像素如果同时满足以下三个条件,那么这个像素称为可删除的。(1)它的值为“1”;(2)将它的值从“1”变到“0”不改变整个图像的连通数;(3)它不是一条边缘的端点。

为了对条件(2)和条件(3)有更清晰的理解,我们定义一个值为“1”的像素 x_0 的连通数 $N_c(x_0)$ 如下:

$$N_c(x_0) = \sum_{k \in S} [\bar{f}(x_k) - \bar{f}(x_k) \bar{f}(x_{k+1}) \bar{f}(x_{k+2})]$$

其中 $\bar{f}(x) = 1 - f(x)$, x_k 是 x_0 的 8 个邻点,其中 k 是 x_0 的直接近邻集。有了连通数的定义后,我们可以得到下面两个结论:

结论 1. 条件(2)等价于 $N_c(x_0) = 1$ 。

结论 2. 一个值为“1”的像素 x_0 是一个端点,当且仅当① $N_c(x_0) = 1$, ② x_0 的 8 邻点中只有一个近邻的值为 1。

经去噪声、半像素加宽及细化后,我们就得到了单像素宽的能够反映台风特点的中尺度特征,对这些边缘进行运算,就可以得到比较定量的中尺度特征的范围和大小。

五、结果与分析

我们对文中开头所描述的台风图像作运算,在纹理测度的运算中,窗区选为 5×5 , $N_s = 16$, $d = 1$, $\theta = 0^\circ$, 在计算 $S(0, 0)$ 时,窗区仍选为 5×5 , 在对二值边缘图像作滤波时窗区选为 9×9 。

表 1 是用四个特征 ($VIS, IR, IDM-VIS, IDM-IR$) 经模糊聚类后所得到的分类结果。

表 1 四个特征的分类结果

类别	VIS	IR	IDM-VIS	IDM-IR	置信度	反照率	亮度温度 (K)	百分比	判释结果 ^[1]
1	57	117	37	28	0.89	0.049	287	0.34	地表
2	109	169	243	192	0.81	0.184	259	0.22	高云
3	152	218	80	26	0.89	0.466	221	0.15	台风密蔽云区
4	72	134	66	214	0.83	0.082	279	0.14	卷云
5	72	120	207	30	0.80	0.082	286	0.15	低层云

其中关于纹理特征所起判释作用的结果如下:

- (1)低的 *IDM-VIS*, 低的 *IDM-IR*: 地表, 均匀厚云。(2)较低的 *IDM-VIS*, 高的 *IDM-IR*: 卷云。
 (3)较高的 *IDM-VIS*, 低的 *IDM-IR*: 中低云。(4)高的 *IDM-VIS*, 高的 *IDM-IR*: 厚高云或中云。

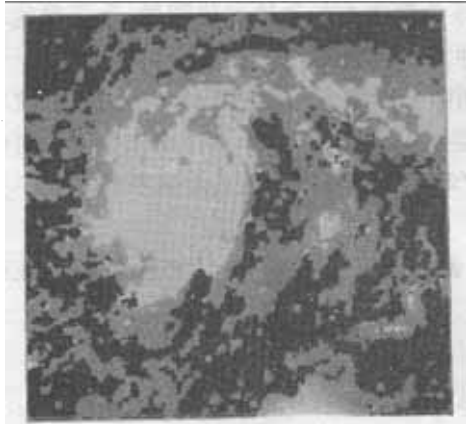


图 1 四个特征分类后图象(图中黑色代表地表, 白色代表台风密蔽云区, 灰色代表其它云类, 图像大小为 256×256 个像素)

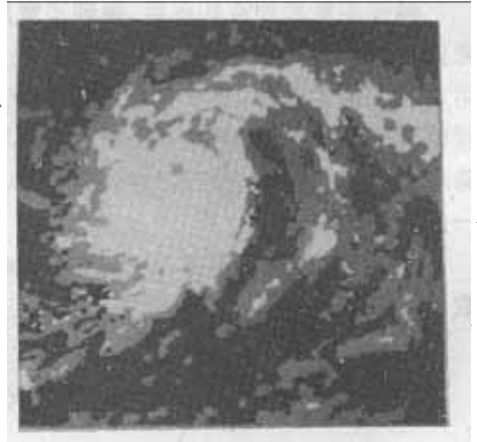


图 2 二个特征分类后图象(说明同图 1)

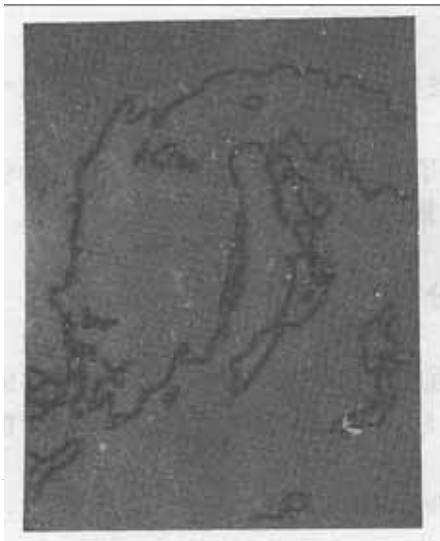


图 3 未经细化的红外图象上所得边缘(图像大小为 256×256 个像素)。

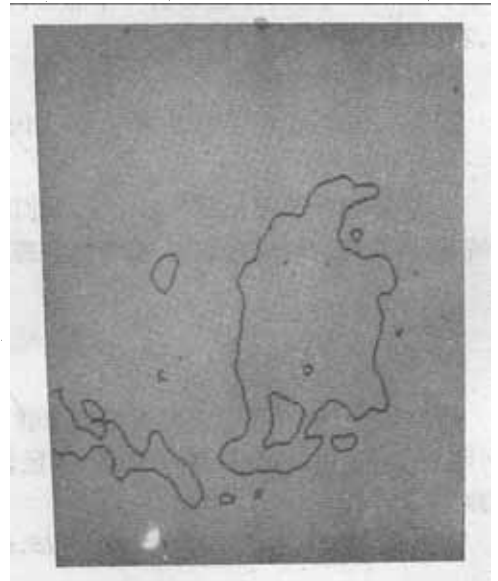


图 4 分类后得到的台风密蔽云区边缘和台风眼位置(说明同图 3)

表 2 两个特征的分类结果

类别	IR	IDM- VIS	置信度	亮度温度 (K)	百分比	判释结果
1	113	19	0.87	289	0.41	地表
2	150	119	0.68	271	0.19	中低云
3	216	28	0.85	223	0.17	台风密蔽云区
4	124	245	0.80	284	0.11	积云
5	188	242	0.77	247	0.12	卷云

加入纹理特征后,有可见光图像时和不可见光图像时分类所得到的密蔽云区很相似。这表明在夜间没有可见光图像时单从红外图像上也能有效地识别密蔽云区,这对台风的监测和警报非常重要。另外,从两表的置信度可以看出,密蔽云区类能最有效地被区分出来。

图 3 是用 ICSED 方法从红外图像上所得到的边缘(未经细化)。从图上台风云系的形状清晰可鉴,图 4 是用 ICSED 方法从分类后的图像(图 1)上得到的台风密蔽云区的边缘和台风眼的位置。

参 考 文 献

- [1] Li Jun and Zhou Fengxian, Computer identification of multispectral satellite cloud imagery, *Adv. in Atmospheric Sciences*, 7, 365—375, 1990.
- [2] Li Jun, Zhou Fengxian and Gao Qinghuai, Delineation of mesoscale features of ocean on satellite IR image, *Adv. in Atmospheric Sciences*, 7, 423—432, 1990.
- [3] Li Jun and F. X. Zhou, Cloud motion estimation from Visual and IR data of geosynchronous satellite using fourier technique, XXVIII COSPAR, 25 June—6 July 1990, The Hague, The Netherlands, 1990.
- [4] Pietikainen, M. et al., Texture classification using averages of local pattern matches, *Proc. ICPR*, 301, 1982.
- [5] Bezdek, J. C., *Pattern recognition with fuzzy objective algorithms*, Plenum Press, New York, 1981.

AUTOMATIC METHOD AND ITS APPLICATION OF RECOGNIZING SATELLITE TYPHOON IMAGERY

Li Jun Zhou Fengxian

(Institute of Atmospheric Physics, Academia
Sinica, Beijing, 100029)

Abstract

Both image processing technique and statistical analysis are employed analysis to discuss quantitatively the VISSR imagery of geostationary meteorology satellite. The results show that the mesoscale features of typhoon such as scope, shape, structure, intensity etc. can be clearly identified and measured by using this method.

图 1 是分类后的图像,在分类后的图像中突出了台风的密蔽云区。

表 2 是二个特征(IR, IDM-IR)经模糊聚类后得到的分类结果。

图 2 是分类后的图像。从图 1 和图 2,表 1 和表 2 中可以看出,在