

文章编号: 1000-2022(2005) 03-0337-07

暴雨过程的卫星云图纹理特征研究

寿亦萱¹, 张颖超¹, 赵忠明²,
励申申³, 寿绍文³

(¹ 南京信息工程大学 信息与通信系, 江苏 南京 210044)

² 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; ³ 南京信息工程大学 大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 针对卫星云图上云团所具有的半流体特性, 应用纹理特征分析法对其进行定量研究。首先用灰度共生矩阵统计法提取 100 个样本云团的纹理特征参数, 然后应用 Mahalanobis 距离作相似性测度进行聚类分析, 提取出 4 类云以及无云区的具有旋转不变性的纹理特征参数。在此基础上分析了 2003 年 7 月 4—5 日江淮流域发生特大暴雨地区云团的纹理特征参数的变化规律与降水过程之间的对应关系。从实际的降水资料和纹理特征参数变化的回归分析结果来看, 纹理特征参数的变化规律与降水量之间有较好的对应关系。这些结果不仅对中短期天气过程的诊断分析而且对数值预报都具有一定的实用意义。

关键词: 灰度共生矩阵; 卫星云图; 纹理分析; 特征提取; 回归分析

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

随着气象卫星事业的发展, 人们从由气象卫星上传下来的数据中获得的信息也日益丰富。除了数据资料以外, 图像信息向人类提供了一个从太空观察地球上空天气现象的机会。在长期观察和研究中人们总结出通过目视区分不同云类的 6 个判别方法, 即形状、纹理、颜色、暗影、轮廓、范围^[1]。如卷云具有纤维状结构, 高度高, 温度低, 由冰晶组成, 反照率低, 在红外云图上通常表现为白色, 范围大, 纹理均匀; 积云主要由水滴组成, 在红外图像上色调很不一致, 对流性较强的积云的云顶较冷, 色调较白, 其纹理表现为多斑点、皱纹, 为不均匀纹理; 层云在红外图上表现为色调较暗的均匀云区, 纹理结构光滑均匀; 积雨云在云图上常呈团状结构, 由于云顶最高最冷, 所以无论红外云图还是可见光或是水汽图上, 色调都是最白, 亮度最亮, 在红外云图上其纹理表现为均匀光滑^[2-3]。

依据前面所述的 6 个判别标准, 就可以比较方便地对云图上的云进行基本的定性分析。现在, 定量化分析正在逐渐取代定性分析并成为越来越多的领域未来的研究热点, 诸如气象研究中借助数学或物理模型, 以及数据同化的方法来分析天气过程, 在卫星云图中是否也存在一

收稿日期: 2004-03-16 改回日期: 2004-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40405009); 国家自然科学基金资助项目 (40075009); 国家自然科学基金资助项目 (40205008); 国家重点基础研究发展规划项目 (2004CB418301)

作者简介: 寿亦萱 (1978-), 女, 浙江杭州人, 博士生, 研究方向: 大气遥感科学技术。E-mail: ykuan_S@nsm.cma.gov.cn

些特征量可以从数量上表征这些云类的变化特性呢？

云团本身属于一种半流体物质，色调是一种重要的视觉信息属性，但是仅仅应用这种属性对云团进行分类检索分析，有时是不可靠的，例如当时的光照条件等因素都会使前后两张图像上同一类的云团的灰度不同。形状或轮廓等特征也具有很大的不确定性。为了建立云团属性和形状及其轮廓的对应关系需要进行大量的统计计算，在实际操作中困难很大。图像的纹理特征是与空间统计相关的，这些纹理特征具有在数量上表征图像的属性，这就有利于将卫星图像中的信息数值化并进行定量分析。

1 纹理特征提取和实现算法

纹理特征提取的方法很多，赵锋等^[4]分析和总结了近年来国内外所作的纹理特征的研究工作，将纹理特征提取的方法总结为 4 种类型，即基于算子的图像特征提取、基于统计方法的图像特征提取、基于模型方法的分割技术（分形技术以及随机场模型）和基于纹理结构的特征提取。其中，基于统计方法的图像特征分析是现在应用较多，且技术上比较成熟的纹理分析方法。本文利用基于统计方法的图像特征分析中的灰度共生矩阵法进行研究分析。

1.1 灰度共生矩阵概念

灰度共生矩阵 (GLCM) 表征从灰度为 i 的像素点出发，距离为 (D_x, D_y) 的另一个像素点位置上出现灰度为 j 的概率 (或频度)^[5]。用公式表述为：

$$P(i, j, \delta, \theta) = \text{集合} \{ (x, y) = i, f(x + D_x, y + D_y) = j, x, y = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \} \quad (1)$$

其中， δ 表示 i 和 j 两点二维空间的距离，取值范围在 1 到 $N - 1$ 之间。从公式 (1) 可以看出，除 δ 以外，灰度共生矩阵与图像的灰度范围以及两个像素点位置之间的偏移角度 θ 有关。一旦灰度范围扩大或者偏移角度选取的间隔缩小，灰度共生矩阵的计算量都会成倍的增加。为了减少运算量，一个措施就是缩小图像的灰度范围。一般来说，将图像的灰度级压缩为 8、16、32、64 这几级较为常见，以 8 位数据格式的图像为例，其灰度正规化公式为：

$$F(i, j) = \frac{f(i, j) \times N_g}{255} + 1 \quad (2)$$

其中， $F(i, j)$ 表示经过正规化以后的灰度值， $f(i, j)$ 为原始灰度值， N_g 表示图像的灰度级大小。另一个措施，就是减少计算不同方向上的灰度共生矩阵的个数。通常情况下图像纹理选取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 4 个方向来进行计算，这样对 D_x, D_y 的选取实际上就限制为 4 种形式，即 $(D_x = \delta, D_y = 0)$ 、 $(D_x = \delta, D_y = \delta)$ 、 $(D_x = 0, D_y = \delta)$ 、 $(D_x = -\delta, D_y = \delta)$ 。

由灰度共生矩阵可以提取一些无量纲的特征参数，用以量化图像的纹理特征，例如由灰度共生矩阵提取的图像纹理能量：

$$f_1 = \sum_{i,j} \{ P(i, j | \delta, \theta) \} \quad (3)$$

f_1 的大小是图像纹理分布均匀性的度量，分布越不均匀，灰度共生矩阵相差越大，能量就越小，反之越大。再如纹理熵的定义如下：

$$f_2 = - \sum_{i,j} \{ P(i, j | \delta, \theta) \} \times \ln \{ P(i, j | \delta, \theta) \} \quad (4)$$

该值代表了整个图像区域内灰度变化的复杂度。图像灰度变化越没有规则，该值就越大，反之则越小。从前面提到的不同种类云团的特点来看，由于积雨云纹理结构细致均匀，除了无云区以外，相对于其他几种云类来说，其纹理能量应为最大，而纹理熵值为最小；而积云纹理结构最为粗糙，其纹理能量最小而纹理熵值最大；层云和卷云的参数则介于这两类云之间。

除了这两种纹理特征参数以外, 还可以提取十几种不同的纹理参数, 如对比度、惯性矩、相关、二阶矩、局部平稳性等。这些参数只能单方面说明一种纹理的特性, 因此在使用时往往是选用几个较稳定的特征参数组合起来刻画一种物质的纹理。本文选用了较为常用的 4 个参数: 能量、熵、惯性矩以及局部平稳性来研究云团的纹理特征。惯性矩和局部平稳性分别定义为:

$$f_3 = \sum (i - j)^2 \{P(i, j | \theta)\}, \tag{5}$$

$$f_4 = \sum_{ij} \frac{1}{1 + (i - j)^2} \{P(i, j | \theta)\}. \tag{6}$$

1.2 实现算法

以 8 位数据格式的图像为例, 纹理特征提取的算法步骤如下:

(1) 将待进行纹理分析的图像转换为灰度图像。通常用于纹理分析的图像都是原图像的某个波段的灰度图像^[6]。这主要是由于单波段图像的纹理是灰度空间的分布模式, 概括了图像灰度分布的属性。在选取时, 往往直接选用多波段中的某一波段进行分析或是进行主成分分析, 这就可能丢失多波段中其他波段提供的辅助的数据信息, 造成纹理特征提取不准确。为了有效地利用多波段信息丰富的特点, 转换后的灰度图像用输入图像的多波段光谱信息的平均值来取代。

(2) 将图像分成若干个窗口, 进行灰度级正规化。这里需要注意的是, 虽然图像窗口的宽、高的变化范围可以分别取在 1~ ImageWidth 和 1~ ImageHeight 之间, 但是过大的窗口将使窗口内包含过多的不同类型的纹理基元, 而过小的窗口内的纹理基元可能不完整, 这些都不利于分析图像的纹理特征^[7]。因此选取合适的窗口尺寸对纹理分析有很重要的意义。一般选取的窗口尺寸要略大于最小纹理基元的大小。

将指定窗口区域内的像素值装载到窗口缓冲区后, 就可以用公式 (2) 对灰度级进行正规化处理。

(3) 计算窗口内的四个方向上的灰度共生矩阵。对正规化处理后的窗口缓冲区内的数据分别统计当灰度值为 i 在 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 4 个方向上出现灰度 j 的频率。具体公式如 (1) 所示。

(4) 求纹理特征参数。用公式 (3)、(4)、(5)、(6) 分别求出每个窗口灰度共生矩阵的 4 个方向的纹理能量、熵、惯性矩以及局部平稳性。全图的纹理特征参数大小分 4 个方向分别等于所有不重叠的窗口内该方向上的纹理参数的平均值。

至此, 整个纹理特征提取过程就基本结束了, 所获得的结果就是这 4 个方向上的平均纹理特征参数。但是在实际分析过程中往往会遇到图像经过旋转以后纹理特征发生改变而造成无法识别的问题。要避免这种因为角度 θ 变化所带来的影响, 就需要所获得的纹理特征参数具有旋转不变的特性, 即所谓的旋转不变性。

使纹理特征参数具有旋转不变性, 处理的方法很多, 常用的如平均值法和均方差法^[8]。本文选用平均值法来对特征参数进行改善, 即对 4 个方向上的纹理特征参数再求 1 次平均, 以抑制方向分量对图像纹理造成的影响。具体公式表述如下:

$$f_n = \frac{(\sum_{\theta=0^\circ}^{135^\circ} f_{n\theta})}{4}, \quad n = 1, 2, 3, \tag{7}$$

2 实例分析

本文选用 2003 年 7 月 4 日 21 时—7 月 5 日 19 时,出现在长江中下游和江淮地区的一次历史罕见的大范围暴雨天气过程的逐时卫星云图作为分析资料,进行纹理特征分析。

2.1 实例情况简介

2003 年 7 月 4 日 21 时至 7 月 5 日 19 时出现在长江中下游和江淮地区的暴雨过程是一次非常典型的中尺度短时天气过程,具体表现为:

(1)降水云团的移动路径(图 1),大致呈由西向东走向,产生的暴雨的雨带宽约 200 km,长约 2 000 km;

(2)降雨过程对流性强,降水强度大。从 7 月 4 日 20 时—7 月 5 日 20 时,江苏淮河流域、滁河流域、里下河地区以及镇江等地出现大到特大暴雨,江浦 24 h 降水量达 301.4 mm,超过了当地 100 a 来的历史日降水量的最高值。

(3)从南京、滁州地区 7 月 4 日 21 时—5 日 19 时实际降雨量绘制的曲线图(图 2)上可以发现,在 7 月 5 日 05 时左右雨量达到高峰,之后雨量迅速减少,只有 10 时左右出现过一个相对大的雨量,到下午 15 时左右渐止。整个暴雨过程持续的时间虽然较长,但是造成强降水的时间并不长,前后持续的时间在 11 h 左右。

为了考察整个降水过程中云团的结构变化与降水强弱变化的关系,选用前面介绍的灰度共生矩阵的分析方法对云图进行纹理特征分析。

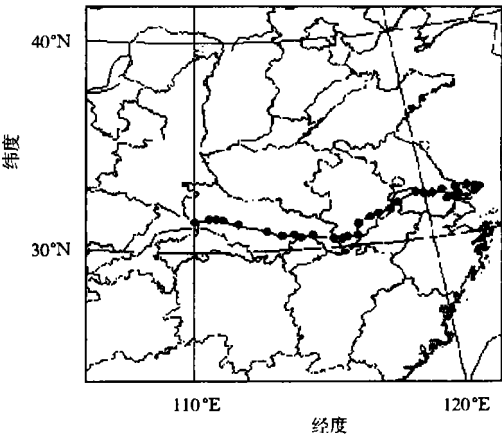


图 1 2003 年 7 月 5 日 06—19 时降水云团移动路径

Fig 1 Path of the cloud cluster during the period of 0600—1900BST 5th July 2003

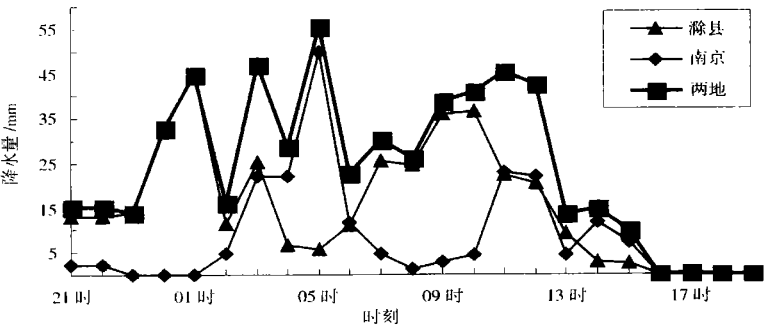


图 2 南京、滁县地区以及两地在 7 月 4 日 21 时—7 月 5 日 19 时实际降水量变化曲线

Fig 2 Rain fall curves of Nanjing Chuzhou and their sum during the period of 2100BST 4th—1900BST 5th July 2003

2.2 实验过程

在进行试验分析之前,首先需要获得不同云类的纹理特征参数的参考值。从云图上随机选择 100 个不同类型的云团样本,组成一个样本集,将窗口尺寸选定为 8×8 灰度级设定为 16 级,试验过程中分别选用像元间距离 $\delta=1$ 、 $\delta=2$ 以及 $\delta=3$ 计算纹理特征参数。通过试验发

现,选择较大的像元间距离,如 $\delta=3$ 一些较粗糙的纹理的特征参数与细致纹理的特征值接近,类间界定模糊;如果选择较小的像元间距离,如 $\delta=1$,虽然能够有效的提取细致纹理的特征参数,但是窗口尺寸以及灰度级对纹理参数的影响就随之增强,聚类效果不太理想。因此本文选择 $\delta=2$ 作为像元间距离,用相似性度量法对 100 组云团的纹理参数进行聚类。在相似性度量法中, Euclidean 距离和 Mahalanobis 距离是比较常用的两种方法。前者对检测特征空间中超球体结构的数据子集的效果十分明显,而后者更适于检测特征空间中超椭圆结构的数据子集^[9]。考虑到纹理特征一般具有方向性的特点,本文选用马氏 (Mahalanobis) 距离作为相似性度量标准。其公式如下:

$$d_{ij} = (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j)^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j)。$$

(8)

式中 $\mathbf{C}^{-1}$ 是标准协方差矩阵 $\mathbf{C}$ 的逆矩阵。 $\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j$ 分别表示两个不同的矩阵, d_{ij} 则表示两个矩阵中元素之间的距离。经过计算,获得卷云、积云、积雨云、层云以及无云区的能量、熵、惯性矩以及局部平稳性这四个纹理特征参数变化范围 (表 1), 这些特征参数均为无量纲参数。

表 1 卷云、积云、积雨云、层云以及无云区的纹理特征参数

Table 1 Textual features of cirrus, cumulus, cumulonimbus, stratus and cloudless area

	卷云	积云	积雨云	层云	无云区
能量	0.047~0.660	0.017~0.045	0.080~0.260	0.068~0.078	1
熵	3.170~3.450	>3.530	2.010~2.910	2.870~3.250	0
惯性矩	4.210~7.780	>8.050	0.975~2.740	2.220~2.770	0
局部平稳性	0.450~0.516	0.230~0.440	0.560~0.730	0.510~0.580	∞

获得不同类别的纹理特征参数参考范围后,在发生暴雨的区域附近选取 118.0~119.5°E、32.0~32.5°N 范围内的图像作为特征分析区域。将该区域按照样本分析的参数设定也划分为 8×8 的窗口,灰度级选为 16 级,当 $\delta=2$ 时的特征参数变化曲线图 (图 3)。为了增强可视性,图中将能量和局部平稳性各放大 50 和 10 倍。

2.3 结果分析

为了便于进一步比较分析,将试验中所获得的纹理能量原值放大 200 倍后得到的变化曲线图与同时刻的南京、滁县两地总降雨量曲线变化图进行叠加 (图 4)。

将前面通过样本计算获得的不同云类纹理特征参数的参考范围中的纹理能量也放大 200 倍后,其变化范围见表 2。

表 2 放大 200 倍后纹理能量

Table 2 The new textual energy after multiplying 200

	卷云	积云	积雨云	层云	无云区
能量	9.4~13.2	3.4~9.0	16~52	13.4~15.6	200

对照图 4 发现,在 4 日 21 时—5 日 00 时段内,能量参数在 5~10 内变动,表现为积云的特性,此时

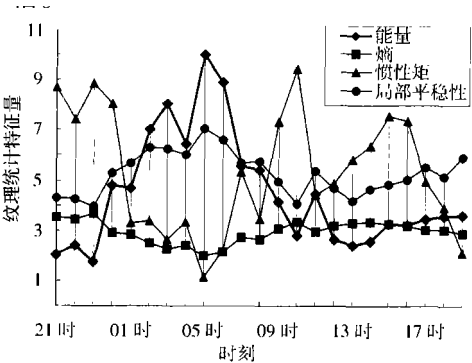


图 3 2003 年 7 月 4 日 21 时—5 日 19 时南京、滁县等地云图纹理参数变化曲线
Fig 3 Clouds textual features curves of Nanjing and Chuzhou on the satellite images during the period of 2100BST 4th—1900BST 5th July 2003

段内的降水强度不大,总降水量维持在 15 mm 附近;从 5 日 00 时开始能量越过 15 10~ 11 h 内能量维持在 16~ 40 范围内,并在 5 日 04 时—05 时达到最大值,降水量也达到了整个降雨过程的峰值。从纹理特征来看,这场大暴雨与此时段在该地区上空相应地生成发展的一个积雨云团有明显关系。同时,从纹理参数的变化曲线上所体现出的积雨云的发生发展演变过程,也反映了这次降水过程的强对流性,和明显的中尺度短历时等特征。从 5 日 11 时以后,整个降雨过程进入第三个阶段,从能量曲线图上可以看出,能量在经过一段时间下降后逐渐稳定在 10~ 15 量级上,表明此时的积雨云团已经基本上消散,该地区上空改为由卷云、层云覆盖,整个降雨过程逐渐进入尾声,至当日 15 时各地的降雨就基本停止了。

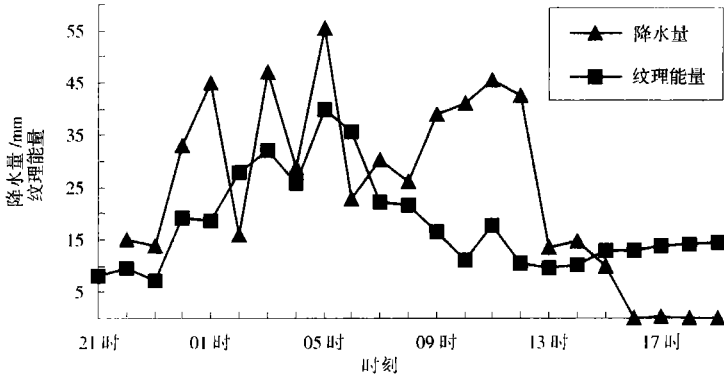


图 4 2003 年 7 月 4 日 21 时—5 日 19 时南京、滁县两地降水量与纹理能量曲线

Fig 4 Total rainfall of Nanjing and Chuzhou and textural energy curves during the period of 2100BST 4th— 1900BST 5th July 2003

另外,对两地的降水量变化以及纹理能量变化曲线分别用二次多项式进行回归分析,二次多项式系数分别为 $(-0.1125, 2.3880, 10.4290)$ 和 $(-0.2919, 5.9895, 7.0479)$ 。从图 5 中可以发现,降雨量和纹理能量的回归分析曲线在形状上十分相似,抛物线的顶点位置基本相同,说明文中所提取出来的纹理特征参数与降水量的变化趋势有很好的对应性。

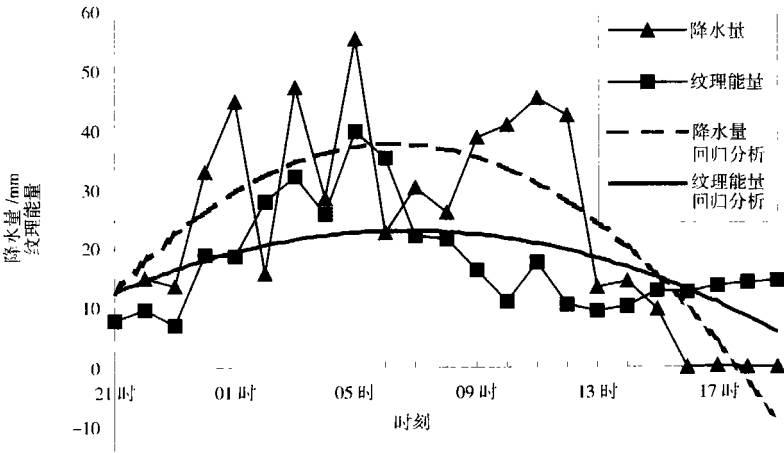


图 5 2003 年 7 月 4 日 21 时—7 月 5 日 19 时南京、滁县等地降水量与纹理能量变化回归分析曲线

Fig 5 Total rainfall of Nanjing and Chuzhou and textural energy curves and their regression analysis curves

3 结 论

(1) 由灰度共生矩阵提取的纹理特征参数, 如能量、熵、惯性矩以及局部平稳性用于分析中短期天气过程 (如本文实例分析所选用的一次暴雨过程) 的效果较好。

(2) 用二次多项式对纹理参数进行回归分析可以有助于在没有实际降水资料的情况下, 快速掌握降水的变化趋势。因此纹理特征参数对中短期天气形势诊断分析和数值预报具有很好的监督指导作用。

参考文献:

- [1] 陈渭民. 卫星气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003 196-223
- [2] 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 (I) — 分数维对纹理复杂度和粗糙度的描述 [J]. 南京理工大学学报, 1999 23(3): 278-282
- [3] 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 (II) — 灰度梯度共生矩阵对纹理统计特征的描述 [J]. 南京理工大学学报, 1999 23(4): 289-293
- [4] 赵 锋, 赵荣椿. 纹理分割及特征提取方法综述 [J]. 中国电视学与图像分析, 1998 3(4): 238-245.
- [5] 张宏林. VisualC++ 数字图像模式识别技术及工程实践 [M]. 北京: 求是科技出版社, 2003: 452-475
- [6] 周廷刚, 郭达志, 盛业华. 灰度矢量多波段遥感影像纹理特征及其描述 [J]. 西安科技学院学报, 2000 20(4): 336-338
- [7] 陈贺新, 戴逸松. 空间灰度相关图像纹理分割方法 [J]. 数据采集与处理, 1989, 4(2): 7-12
- [8] 于晓玲. 一种新的旋转不变纹理特征 [J]. 电子学报, 1990, 18(3): 49-54
- [9] 高新波, 谢维信. 模糊聚类理论发展及应用的研究进展 [J]. 科学通报, 1999, 44(21): 2 241-2 250

Textural Features of Satellite Images in Rainstorm Process

SHOU Yixuan¹, ZHANG Ying-chao¹, ZHAO Zhong-ming²,
LI Shen-shen³, SHOU Shao-wen³

(1. Department of Information and Communication, NU IST, Nanjing 210044 China)

2. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences Beijing 100101 China

3. Department of Atmospheric Sciences NU IST, Nanjing 210044, China)

Abstract The Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) approach was firstly used in this paper to extract the textural parameters, the intrinsic attribute of different types of clouds, from 100 satellite images of cloud cluster samples and then four texture parameters of cirrus, cumulus, cumulonimbus, stratus and cloudless areas were clustered by using the Mahalanobis distance as the comparability measure standard. In the experiment, textural features of the clouds of the strong rainstorm in the period of July 4—5, 2003 in the middle and lower reaches of the Changjiang River and their relations with precipitation were analyzed. Results of the quadratic polynomial regression analysis show that the developing tendency of texture parameters is parallel with one of precipitation. These results are of practical significance for the diagnoses and numerical prediction of weather processes, especially of short-medium range rainstorm processes.

Key words GLCM; satellite image; texture analysis; feature extraction; regression analysis