

悬浮泥沙的计算机特征提取和分类

张欣 恽才兴

(华东师范大学河口海岸研究所)

Alpha 机图象处理组

(中国科学院空间中心)

摘 要

本文提出了一套适应于小型图象处理设备的信息提取,聚类分析等悬浮泥沙处理方法,它简而易行,降低了处理成本.其基本思想,特别是通过分级聚类将多维问题近似地化简为一维问题,可同样地用于其它各种应用问题.文章最后简要报告了一些应用结果.

关键词: 悬浮泥沙,小型图象处理系统.

一、引 言

泥沙分布和运动对河口海岸的变迁有很大影响,开展这方面的研究,特别是定量分析,对河口整治、航道开发、港口选址、工程建设、环境监测以及水产资源调查开发具有重要意义. Landsat 卫星遥感图象数据包含了悬浮泥沙的大量基本信息,特别适用于对水面进行大面积动态监测,得到国际和国内各方面的重视,并从不同角度开展研究^[1,5]. 随着水体表层反射率与水体含沙量之间关系和大气因素对反射电磁波的影响等基本研究的深入,以及大量地面数据和遥感资料的积累,用计算机来定量化地、系统地分析处理悬浮泥沙势在必行. 本文介绍用小型计算机图象处理系统对卫星像片进行处理,抽取泥沙分布特征和聚类分析的方法和数学模型,并简要报告应用处理结果.

二、处理系统概述

Alpha 机图象处理系统是由中科院空间中心研制的小型图象处理系统^[9], 该系统输入输出手段齐全,使用方便,其基本框图如图 1.

根据悬浮泥沙信息提取和分类工作的要求,采用高分辨率正点扫描图象输入输出装置作为主要输入输出手段,其输入灰度级为 256 个量化灰级,扫描光点尺寸为 30μ ,光栅疏密度为 512×512 ,采样速率是 10 点/ms,系统使用方便,工作稳定可靠,具有较高的精度,为此项研究工作的完成提供了必要的保证.

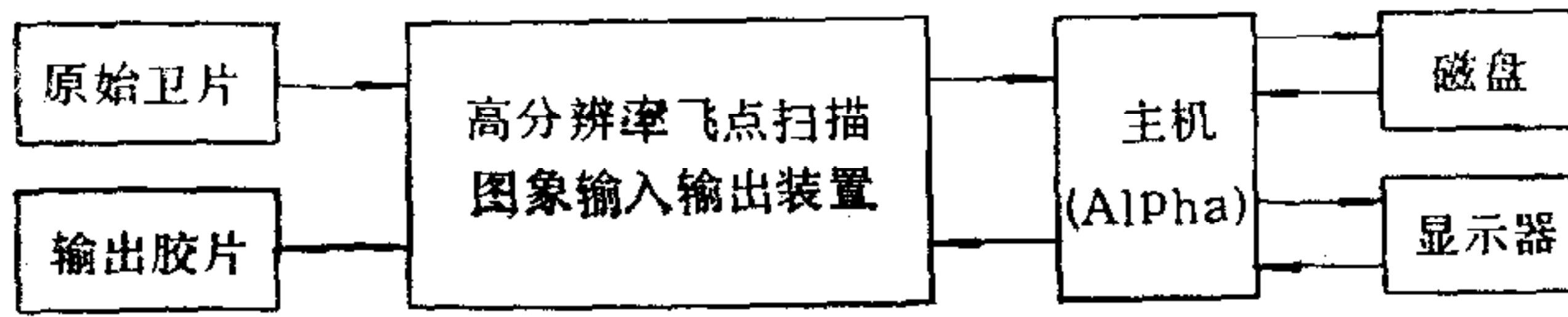


图1 处理系统框图

三、悬浮泥沙处理方法及数学模型

整个悬沙处理过程可分为图象输入和预处理、特征选择和抽取、聚类分析以及结果成象输出等部分组成。其各部分的框图如下：

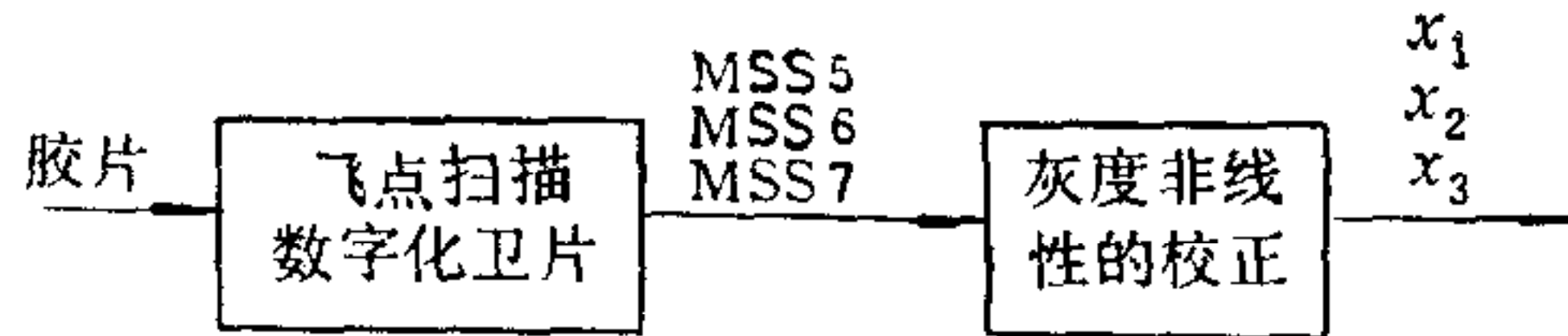


图2 图象输入

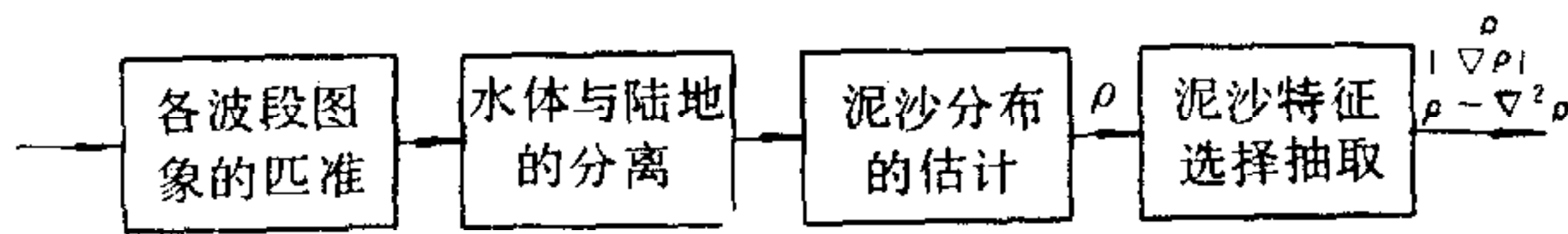


图3 特征抽取

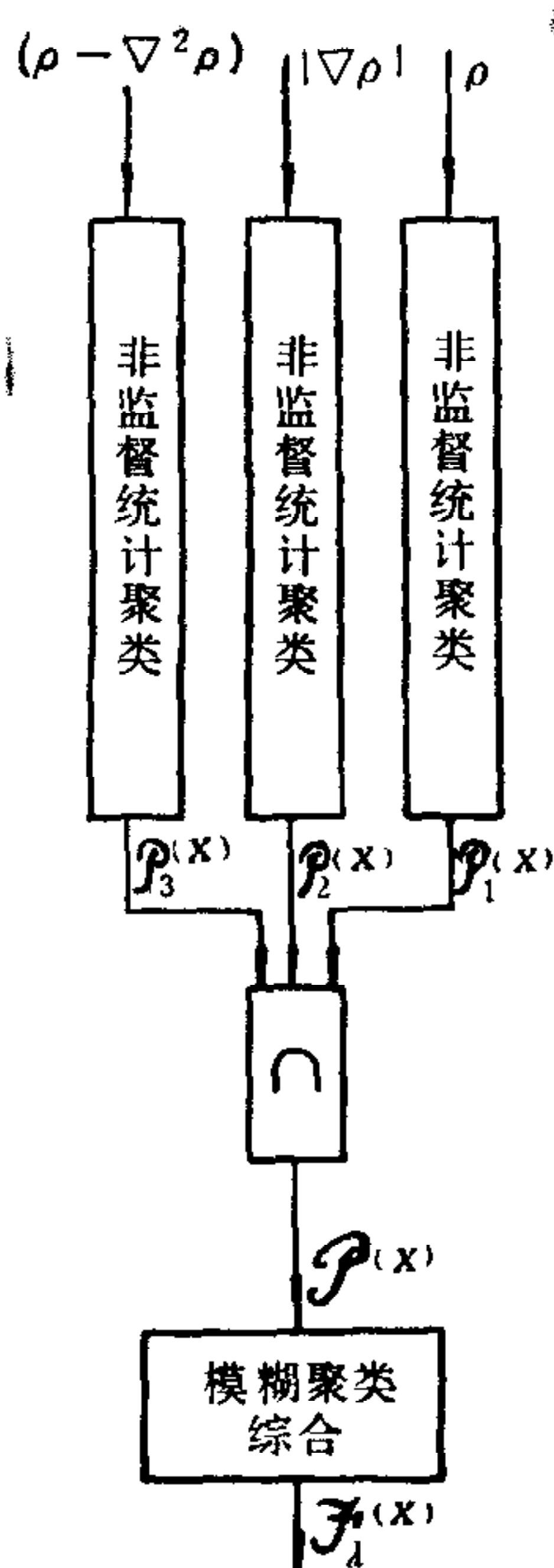


图4 聚类分析

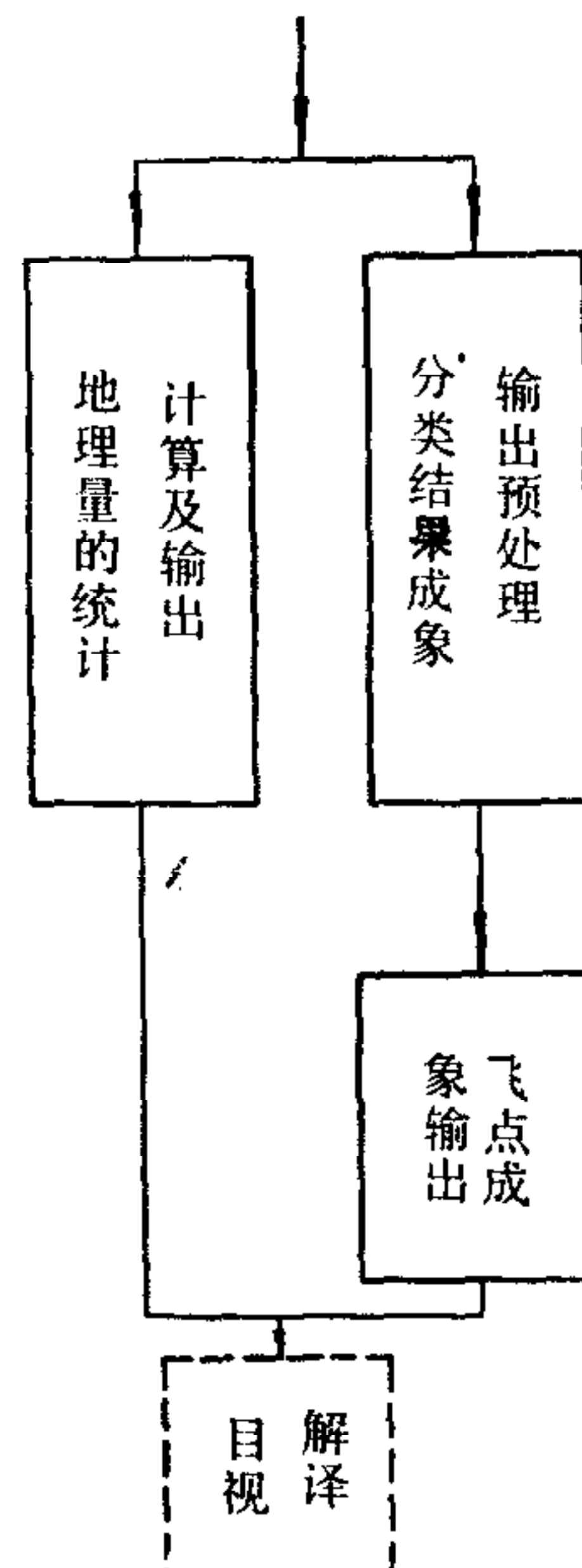


图5 结果输出

1. 悬沙特征抽取

对于非数字型图象输入后的数字图象数据, 首先会遇到各波段图象的配准这一个较为棘手的问题. 在低精度要求下, 可通过人机对话, 利用图象监视器互交地确定配准位置. 当匹配要求较高时, 我们选用了特征匹配法^[6]或 CRA (Cluster Reward Algorithm) 算法^[2], 结果表明误差都小于一个象元, 前者更适用于线性结构目标, 后者对无规则景物也适用, 只是计算速度太慢.

水陆的分离是整个处理过程中的重要环节之一, 因为准确而又全面地对悬浮泥沙分布场进行数据统计, 对本文所采用的聚类算法运行结果是至关重要的. 水陆分离有两种方法, 一是直接对 MSS7 波段灰度取适当的阈值, 另一是对 MSS7 与 MSS6 灰度之比值取阈值. 后者精度较高, 且阈值范围较为稳定 (1.5 左右). 这是因为 MSS7 的水陆灰度反差要比 MSS6 的水陆反差大得多, 设陆地对应于低灰度, 水域对应高灰度, 那末对陆地而言, MSS7 的灰度小于 MSS6, 比值较小, 而对水域, MSS7 的灰度比 MSS6 的大, 比值较大, 取合适阈值即可将水陆分离. 同样原理, 其余部分 (云, 图象边框, 光标和注记等) 的比值接近 1, 当阈值大于 1 时, 同时还可将背景与水体分割开来. 实验表明这方法既简单又行之有效.

多方面的研究表明, 多光谱卫片的 MSS5 和 MSS6 对水体中悬浮泥沙最为敏感. 文献[5,3]导出并验证相对反射率 R_{si} 与悬沙浓度 ρ 的关系为

$$\rho = \left(\frac{R_{si}}{a_{0i} - b_{0i} \cdot R_{si}} \right)^{d_i} \quad i = 5, 6 \quad (1)$$

其中 a_{0i} , b_{0i} 和 d_i 是三个常数, 与水面反射系数、含沙水体散射系数等众因素有关, 物理意义较为复杂. 本文提出用因子分析法^[7]来进一步衰减干扰, 提取悬沙的分布, 建立线性估计模型, 然后用最小均方估计法来估算出泥沙的空间分布 $\rho(x, y)$. 设 z_1, z_2 分别表示 MSS5 和 MSS6 的灰度经公式(1)变换后的值, s_1 和 s_2 是两个波段的相互独立的干扰因子, 分别线性地迭加在公共因子 ρ 上, 有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} [\rho] + \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \\ (Z &= A\rho + S) \end{aligned} \quad (2)$$

满足关系

$$\begin{cases} \text{cov}(\rho, s_i) = 0 \\ V(S) = \begin{pmatrix} \sigma_{s_1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{s_2}^2 \end{pmatrix} = D_s(\sigma_s). \end{cases} \quad (3)$$

上二式中的参数 a_1, a_2, σ_{s_1} 和 σ_{s_2} 可由下式来估计. 设 $\mathcal{R}(Z)$ 是 Z 的协方差矩阵, $V(\rho)$ 是悬沙浓度的方差, $\text{cov}(z_i, \rho)$ 是 ρ 与 z_i 的协方差, 可都由实验确定. 对 Z 求协方差矩阵以及 Z 与 ρ 的相关得到下述解 a_i 和 $\sigma_{s_i}^2 (i = 1, 2)$ 的方程组:

$$\begin{cases} \mathcal{R}(Z) = V(\rho)AA^T + D_s(\sigma_s), \\ \text{cov}(z_i, \rho) = a_i V(\rho), \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

由 Z 来线性无偏地估计 ρ , 其方程为

$$\hat{\rho} = B_0(Z - E\{Z\}) + E\{\rho\}. \quad (5)$$

$E\{Z\}$ 和 $E\{\rho\}$ 是 Z 和 ρ 的均值,由均方误差最小的准则

$$\varepsilon_{\min} = \min_{(B)} \{E\{(\rho - \hat{\rho})^2\}\}, \quad (6)$$

求得最佳线性滤波器参数 B_0 为

$$B_0 = V(\rho)A^T[V(\rho)AA^T + D_s(\sigma_s)]^{-1}. \quad (7)$$

其估计的误差为

$$\begin{cases} \varepsilon_{\min} = \gamma V(\rho) = V(\rho) - A^T \mathcal{R}^{-1}(Z)A, \\ \gamma = 1 - A^T(AA^T + D_s(\sigma_s)/V(\rho))^{-1}A \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

将(4)式代入(8)式化简得

$$\varepsilon_{\min} = V(\rho) - A^T \mathcal{R}^{-1}(Z)A. \quad (9)$$

实验结果 $V(\rho) = 39.2 \text{mg/l}$, $a_i = 0.84 \times V(z_i)$, $i = 1, 2$, $\mathcal{R}(Z)$ 由图象中的子窗内数据估算, $V(z_i)$ 是 $\mathcal{R}(Z)$ 的对角元素.

为了进一步抽取反映悬沙动力因素的信息,我们除选择了悬沙浓度 ρ 之外,还选取了 ρ 的数字梯度模 $|\nabla\rho|$ 和 ρ 减 $\nabla\rho$ 的数字散度 $(\rho - \nabla^2\rho)$ 作为悬沙聚类分析的特征量. $|\nabla\rho|$ 反映了悬沙空间分布的变化情况,与潮汐流的作用,江河冲淡水作用以及风吹流等关系密切,且地形对水流运动制约很大,地形对悬沙空间分布的变化影响也很大. $(\rho - \nabla^2\rho)$ 近似体现了悬沙沉积的瞬时情况,因为设 \mathbf{j} 为泥沙在水体表层的密度位移矢量, \mathbf{j} 的三维散度 $\text{div}\mathbf{j} = \rho$, \mathbf{j} 的散度可进一步分为平面,水表面和向下垂直两部分, $\rho = \rho_{\text{水平}} + \rho_{\text{下沉}}$, 如果认为 $\nabla\rho$ 与 \mathbf{j} 的水平分量近似成正比, 那末 $\rho_{\text{下沉}} = (\rho - \rho_{\text{水平}}) \doteq (\rho - k\nabla^2\rho)$. $\nabla\rho$ 的两维数字散度 $\nabla^2\rho$ 的计算公式为

$$\begin{aligned} \nabla^2\rho_{i,j} = & 2[\rho(i-1, j-1) + \rho(i-1, j+1) + \rho(i+1, j-1) + \rho(i+1, j+1)] \\ & - 4\rho(i, j) - [\rho(i, j-1) + \rho(i, j+1) + \rho(i-1, j) + \rho(i+1, j)]. \end{aligned} \quad (10)$$

2. 悬浮泥沙的聚类分析

ρ , $|\nabla\rho|$ 和 $(\rho - \nabla^2\rho)$ 构成了一个三维特征空间, 这样悬浮泥沙的分类归纳为一个多维空间的无监督聚类问题. 现有的多维空间聚类算法很多, 但是由于我们的小型图象处理系统的计算速度和内存容量限制, 对于这样大的图象数据分类是力不从心的. 为此, 作者设计了一套分级分类的处理方案, 较好地解决了这一矛盾, 如前面的聚类框图所示, 首先分别对每个特征分量独立地进行一维统计聚类, 相应地得到三个分类划分 $\mathcal{P}_1(x)$, $\mathcal{P}_2(x)$ 和 $\mathcal{P}_3(x)$, 将它们进行逻辑相“与”形成一个预分类划分 $\mathcal{P}(x)$, 然后采用模糊聚类的方法将 $\mathcal{P}(x)$ 进行综合分析得出最终的分类结果 $\mathcal{F}_1(x)$. 这种分级聚类方法的优越性是显而易见的, 它将一个多维聚类问题化整为零, 成为多个一维聚类问题. 另外由于采用了预分类, 使后续的模糊聚类所需的大量存贮空间被压缩, 计算速度也得到提高. 这样原来 $\mathcal{O}(N^3)$ 的计算量减少至 $\mathcal{O}(3N + K)$, 其中 N 表示一维聚类的计算量, K 表示模糊聚类的计算量, 当 $N = 256$ 时, 速度提高 4 个数量级. 当然计算速度的提高是以分类精度的损失为代价的, 本分类法不是最优的, 是一种次优聚类法, 其聚类结果能满足本应用课题要求. 综上所述, 整个悬沙处理都是围绕着应用问题的要求和如何在现有的设备条件下实现而展开的, 力求找出比较简单而实用的途径, 从而形成本文的特点.

预聚类选用了系统型聚类算法^[4], 分类的准则是类内均方误差之和最小. 首先求出

特征图象的一阶直方图,按照直方图将图象分为 256 个初始类别,其各类的方差均为零,均值为对应灰阶,元素数等于相应的直方图数值.随后选出其中归并后的均方误差增加最小的两类进行合并,得到 255 类,这是因为归并第 i 类和第 j 类后的新一类的方差 σ_{ij} 为

$$\sigma_{ij}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 + \Delta\sigma_{ij}^2. \quad (11)$$

这样就得到

$$\min_{i,j} (\sigma_{ij}) \Leftrightarrow \min_{i,j} \{\Delta\sigma_{ij}\}. \quad (12)$$

不断重复上述归并过程,直至归并到指定的 C 类.如图 6 所示.另外考虑到对任意三点图象的特征值 x_1, x_2 和 x_3 , 有下述关系式成立:

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \leq x_2 \leq x_3 \\ x_1 \in C_i, x_3 \in C_j \end{array} \right\} \Rightarrow x_2 \in C_i. \quad (13)$$

C_i 表示类别 i . 在这一限制之下,每次归并只需考虑相邻两类的合并即可,使算法的计算量由 $\mathcal{O}\left(\sum_{i=C}^{256} i!\right)$ 下降至 $\mathcal{O}\left(\sum_{i=C}^{256} (i-1)\right) = \mathcal{O}(256^2)$, 计算量降低,便于在小型系统上实现.

采用模糊聚类法^[8]对 $\mathcal{P}(x) = \mathcal{P}_1(x) \cap \mathcal{P}_2(x) \cap \mathcal{P}_3(x)$ 综合分析分三步进行.

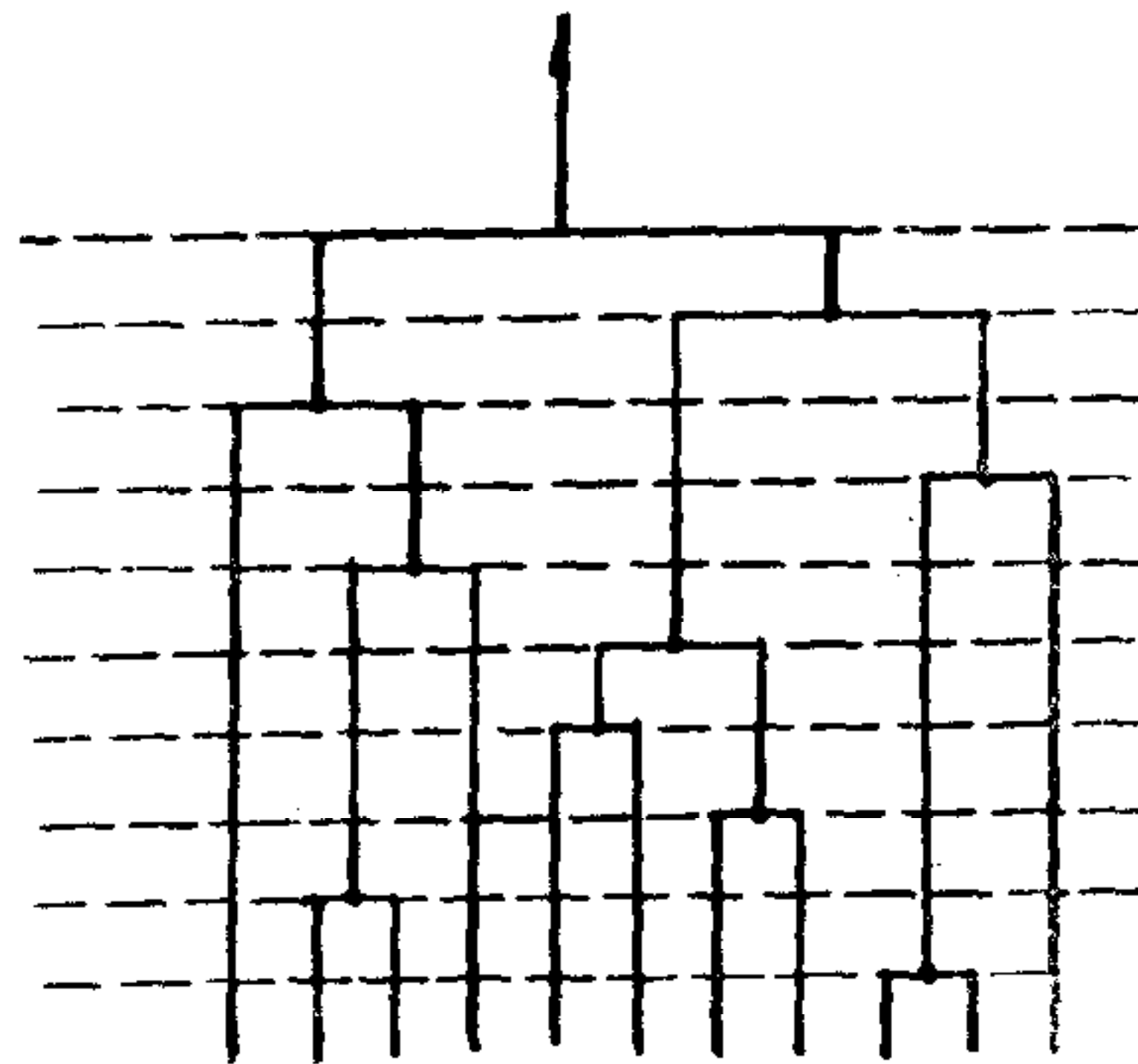


图 6 系统聚类归并

1) 建立模糊关系矩阵. 定义两类之间的相关系数为两类之间的相似程度

$$r_{i,j} = \frac{\sum_{l=1}^3 (k_l x_{il})(k_l x_{jl})}{\left[\sum_{l=1}^3 (k_l x_{il})^2 \cdot \sum_{l=1}^3 (k_l x_{jl})^2 \right]^{1/2}}. \quad (14)$$

k_l ($l = 1, 2, 3$, 是各分量的加权), $x_{i,l}$ ($i = 1, \dots, C, l = 1, 2, 3$, 表示 l 特征分量的 i 类的均值).

2) 将模糊关系矩阵进一步复合以获得模糊等价关系. 因为这部分计算量和存贮量都较大,各分量的预分类数 C_l 不易取得太大,只能根据主机的情况来设定.

3) 对等价模糊关系取不同相似水平的 λ -截取,得出聚类图.

实际中对 ρ , $|\nabla\rho|$ 和 $(\rho - \nabla^2\rho)$ 三个特征分量的加权分别为 0.4, 0.2 和 0.4, λ 取值为 0.96, 0.90, 0.86 和 0.80. 当 $\lambda = 0.90$ 时, 聚类的效果较为满意.

四、应用结果简介

我们对长江口、鸭绿江口和洞庭湖等地区不同时期的二十多套卫片进行了处理分析, 获得较为满意的成果. 以长江口为例, 聚类分析表明各时相的卫片聚类数都集中在四类左右, 即在 $\lambda = 0.90$ 时, 类别数逐步稳定, 另外根据几年来对长江口常规测量数据的分析, 证明不同含沙浓度的泥沙分布与聚类结果一致. 这四类的平均含沙量分别为: $0.5-0.9\text{kg/m}^3$, $0.25-0.35\text{kg/m}^3$, $0.08-0.25\text{kg/m}^3$ 和 $<0.08\text{kg/m}^3$. 根据含沙浓度梯度变化及浑水线的移动范围, 可将这四类含沙水体区域划分成为悬沙的输移区, 扩散沉降区, 飘移区以及清水区等. 它们受江水冲激流, 潮汐往复流和季风流的影响. 图 7 是一个典型的例子, 潮汐涨落, 长江汛期枯期的交替, 季风的袭扰可以使各区域向海或陆来回移动. 高浑浊水的泥沙输移区移动范围为 $121^{\circ}58'E-122^{\circ}15'E$, 面积为 $1200-2000\text{km}^2$, 扩散沉降区含浓度中等(当风速高时浓度会显著增加)分布范围为 $122^{\circ}00'E-20\text{m}$ 等水深线, 面积约为 $2400-3800\text{km}^2$, 它们是长江河口的主要淤积区, 因为从地面资料可证实, 随着河口泥沙向外海输移, 悬沙与垂线平均含沙量的比值逐步增加.

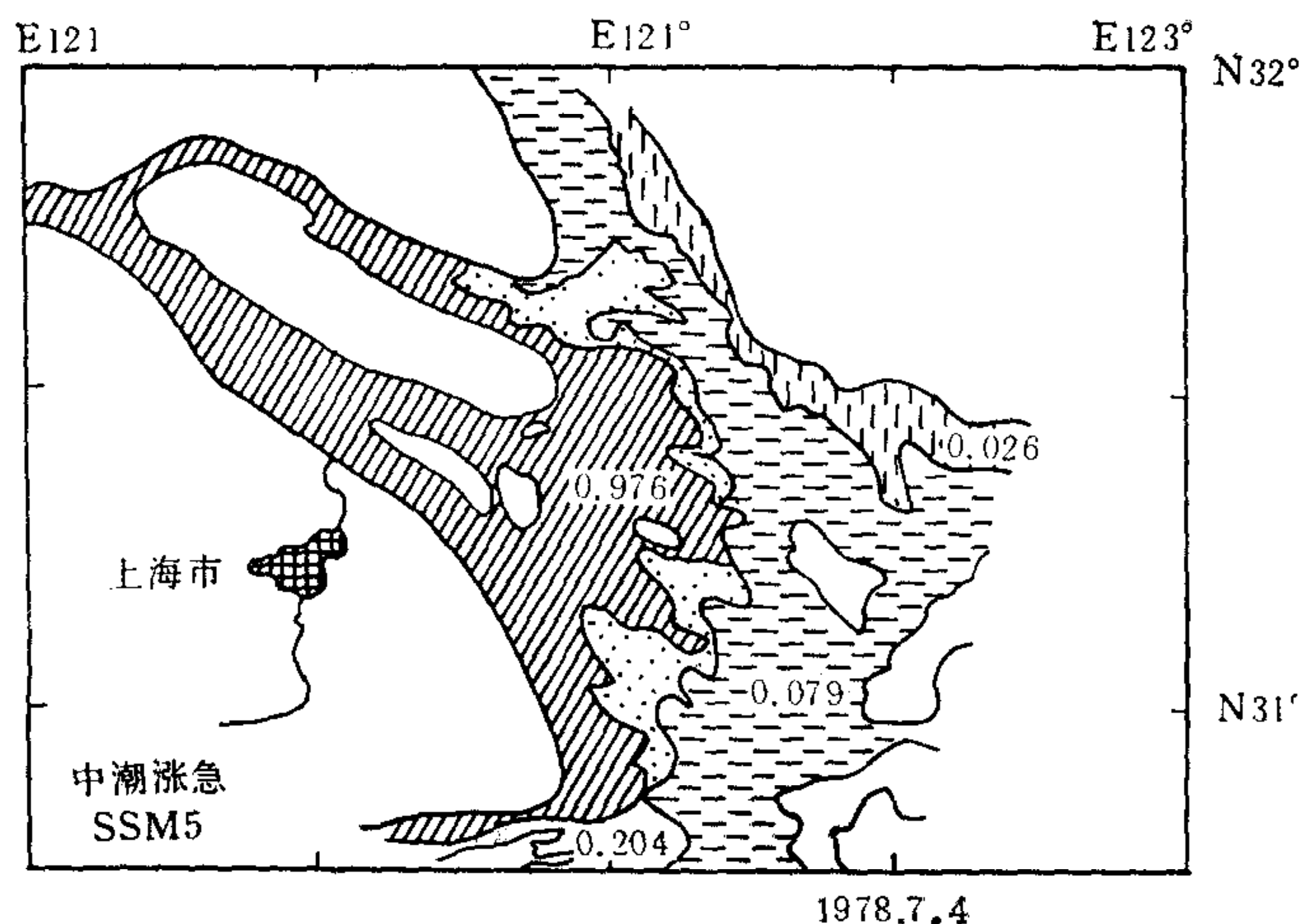


图 7 悬沙分类图

表 1 ρ 估计误差统计表

MSS5 估计误差 (mg/l)	MSS6 估计误差 (mg/l)	因子分析估计误差 (mg/l)
39.35	40.20	25.89

作者根据七个实地采样数据^[5]对悬浮泥沙浓度 ρ 的估计误差进行了统计, 见表 1. 经过因子分析估计(5)式计算悬浮泥沙浓度, 平均均方误差减少了.

参 考 文 献

- [1] Klemas, V., Bartlett, D., Philpot, W., Rogers, R., and Reed, L., Coastal and Estuarine Studies with ERTS-1 and Skylab. *Remote Sensing of Environment*, 3(1974), 153—174.
- [2] Kuglin, C. D. and Eppler, W. G., Map-matching Technique for Use with Multispectral/Multi-temporal Data. *SPIE 238*(1980), *Image Processing for Missile Guidance*. 146—155.
- [3] Hu, J., A study of the Basic Relationship Between Remotely Sensed Data and Suspended Sediment Concentration. Master Thesis, University of Delaware, 1985.
- [4] Duda, R. O., and Hart, D. E., *Pattern Classification and Scene Analysis*. Wiley-Interscience 1973.
- [5] 恽才兴、胡嘉敏、冯辉、张欣, 河口悬浮泥沙遥感定量研究及应用实例, 华东师大河口海岸研究所, 1985, 9.
- [6] 张欣、陈康宏、万嘉若, 景物目标的启发式特征匹配识别法, *自动化学报*, 13(1987), 62—65.
- [7] 张尧庭、方开泰, 多元统计分析引论, 科学出版社, 1983, 328—339.

COMPUTER-BASED FEATURE EXTRACTION AND CLUSTERING OF SUSPENDED SEDIMENTS

ZHANG XIN YUN CAIXING

(*Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University*)

THE GROUP OF ALPHA IMAGE PROCESSING SYSTEM

(*Space Centre, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Several methods suitable for image processing mini-systems in analyzing and processing suspended sediments, such as information extraction and feature clustering, are described. These methods are simple but effective and of low cost. Some basic ideas, for example the 2-level clustering in particular, which approximately simplifies a multidimensional problem into a one dimensional one, can be applied to other practical problems. Results of some applications are given.

Key words ——Suspended sediment; image processing minisystem.