

陆地卫星 TM 磁带资料在黄河口海区 悬沙分布定量研究中的应用*

黄海军 李成治

(中国科学院海洋研究所)

郭建军

(石油勘探院遥感地质研究所)

遥感技术是目前获得河口地区及近海水域泥沙分布与扩散的有效方法,多采用美国 Landsat 系列的多光谱扫描仪(MSS)和专题制图仪(TM)、NOAA 气象卫星、法国 SPOT 卫星资料和前苏联的联盟号以及我国的国土卫星资料等,即将发射的美国海洋卫星将为本项研究提供新的途径。资料的形式有磁带(CCT)和卫片两种,目前世界上以陆地卫星资料应用最广,这主要是由于它有资料商业化、易于获得、资料系列长、重复周期短、可监测动态变化及影像分辨率适中(MSS 像元空间分辨率为 80m, TM 为 30m)等优点。

河口区泥沙受河流径流、潮流、风浪等多种动力因素影响,悬浮泥沙的含量和颗粒组成经常变化,因而河口悬沙的时空分布及其运动规律较为复杂,用常规测量方法难以了解其变化规律,而遥感的多时相、多波段可监视泥沙扩散的动态变化;同时,陆地卫星图象覆盖面积较广($185 \times 185\text{km}^2$),不同图幅的拼接、镶嵌技术也已完善,故可监测河口区泥沙扩散的空间变化。因此,遥感技术弥补了常规手段的费时、耗资、资料不同步、周期长、难以反映多变的黄河泥沙的动态变化等不足。本文根据 1989 年 8 月黄河口海区表层泥沙实测资料与天气条件大致相同的遥感资料(磁带)进行了相关分析,定量研究黄河泥沙入海后的扩散和分布规律。

一、国内外研究现状

自美国第一颗陆地卫星(Landsat-1)发射以来,卫星遥感资料即被用来研究河口海岸地区、内陆河湖地区水体的悬浮泥沙。最初,人们只根据卫星影像的灰度值变化及其纹理、图案来分析水体循环模式及河口泥沙分布,进而用卫星磁带数据与地面同步、准同步实测悬浮体作相关分析。目前世界上的有关研究大致有以下几个方面。

1. 实验室条件下含沙水体的光谱反射特征

在实验室内研究不同含沙量水体的光谱反射率,选择研究含沙水体的最佳波段是该类研究的基础。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第2596号。
本课题为国家自然科学基金资助项目,48970270 号。
收稿日期: 1993 年 11 月 16 日。

舒守荣等(1985)用研究区底质制成15个不同含沙量水体,然后测定其在TM和MSS波段范围内的光谱反射率,得到在实验室条件下悬沙含量与TM3的相关系数为0.996,与MSS6的相关系数为0.995。实验水体的含沙量范围为9.2mg/L—510.6mg/L。恽才兴等(1987)对不同泥沙类型进行了光谱响应实验,从蒸馏水至含沙量为2100mg/L的12组泥沙样品,与其光谱反射率在TM3—TM4波段范围内均有良好的相关关系,相关系数在0.99以上。章立民等(1986)也作过类似的工作。

2. 野外实测的光谱反射率与悬沙含量的关系

在野外实测过程中,观察平台晃动(船体的摆动)、光谱仪的固定(大型的固定平台除外)、水面波浪引起光线反射强度的变化(即波浪闪光)、天气状况,以及由于测量时间不一致而引起的太阳高度的变化等均能影响光谱反射率。然而即使有诸多因素的影响,悬沙含量与表层水体光谱反射率之间还是存在线性关系。

Jerry *et al.* (1976)对密西西比州北部6个湖泊的光谱反射率的研究表明,悬沙含量与光谱反射率在波长0.725 μ m处呈良好的线性关系,相关系数为0.96;MSS各波段也与此类似,赵太初(1988)在闽江口;作者(1992)在黄河口等地现场自然水体的波谱测试也均得到了较好的结果。

3. 建立卫星遥感信息与悬沙含量的相关关系

John *et al.* (1988)对伊利湖三杜基斯湾的实验表明,悬沙浓度与MSS5波段的相关系数为0.72,而悬沙浓度与MSS5和MSS6波段的复相关系数则增至0.9。P.J. Curran *et al.* (1987)在霍尔内斯半岛近岸用机载遥感器进行实验,得出悬沙含量与光谱辐射值的相关系数为0.56—0.68,由光谱辐射强度估算的悬沙含量误差为其平均值的343%—494%。

C. L. Amos *et al.* (1979)在新斯科亚北部米纳斯盆地测定了不同时期MSS4、5、6波段的辐射强度和悬沙浓度之间的关系;John *et al.* (1979)在芬迪湾和Vovia scotia作了类似的研究。

从上述可看出,对悬沙浓度的遥感研究从第一颗陆地卫星发射后即已开始,国内外做过多次实验,但由于所用的方法和仪器不同,开展工作的时间也不一致,加之研究区的自然地理环境和水体的开阔程度、泥沙含量的高低、卫星过境及现场观测的天气状况、地理位置不同所引起的太阳高度角的差异,以及悬沙本身的特性等因素的差异,因而所得到的定量模型也不同,尽管光谱反射率与悬沙含量之间有良好的线性关系(有的实验误差较大),但各地的模型互相不能适用,不但回归关系式的形式不同,就连用来进行回归分析的波段也未能得到统一。

在黄河口区定量地用遥感信息提取悬沙浓度的工作尚属首次,而且黄河泥沙及其海域的许多特征也是独有的(如黄河的高浓度泥沙流等特性),因而本文的研究在理论上具有重要的意义。

二、卫星资料的光学特征及其处理

1. 卫片及磁带的光学特征

对 TM 的 7 个波段因子分析表明 (Doerffer *et al.*, 1989), 高于影像噪声的 3 个变量相互独立, 应用 Varimax 准则, 通过正交旋转得出这 3 个因子包括全部变量成分的 73%。3 个因子为水体悬浮物质成分、大气散射和海面温度, 后者主要来自热红外波段。其中, 在第一主成分中, 来自第三波段的贡献最大, 其次是第四波段; 而在第二主成分中, 则以 TM5 和 TM7 贡献最大。因此, 我们用 TM3 和 TM4 来研究水体悬沙浓度, 而用 TM5 和 TM7 来研究大气辐射影响和进行大气校正。水体中悬浮物浓度增加, 其悬浮粒子的后向反射强度增大; 但在 TM1 和 TM2 中, 大气对其干扰甚大, 波长越短干扰越大, 故而 TM3 和 TM4 较为理想。在 TM5 和 TM7 的波段区间, 水体吸收能力很强, 其反射近于零, 探测器测到的辐射能量几乎全由大气散射所致。

由于水体反射率较低, 海区灰度值低, 因而影像较暗。本文所用时相的波段中 TM3 最低原始灰度值为 17, 最高为 46.5; TM4 最低为 6, 最高为 38, 它们所对应的泥沙浓度值为 7.2mg/L—467.8mg/L。由上述可知, 磁带中原始灰度值的变化区间很窄, TM3 为 29.5, TM4 为 32; 而它们所对应的泥沙浓度的区间却很宽, 即信号与噪声的比率很小, 难以用它来确定详细的悬浮体浓度等级, 这一低的信噪比可以通过合并测点周围的相元来解决。同时, 本文用最低的相元灰度值来表示清洁水体, 其上的辐射能基本上是由水分子和大气散射所致, 故而可用它来修正磁带中大气辐射的影响。

2. 卫星磁带的增强和变换处理

为了获得更多的海洋水体信息, 我们将卫星磁带在石油部遥感地质研究所图象处理室进行专项处理, 其计算机图象处理工作是在 PS101 图象处理系统上完成的。主要有以下几项:

(1) 图象假色彩增强: 由于水体对太阳辐射的吸收, 故而黄河三角洲周围海域图象的原始直方图都在低区分布。为了突出海区泥沙信息, 首先对直方图进行扩展, 扩展前选择研究区的典型子区, 对其进行直方图统计, 了解其灰度值分布范围, 以确定拉伸曲线的点对, 然后用分段线性拉伸功能进行直方图扩展。图象信息各自扩展增强后, 用三个波段合成。另外还可以用系统的调整功能, 通过图象统计文件的参数进行调整, 最终得到信息充实、色彩鲜艳的假彩色合成图象(图版 I: 1, 2)。我们将研究区分成四个子区, 即莱州湾子区、黄河口子区和三角洲北侧东部和西部海域子区, 对各个子区分别进行增强及假彩色合成。同时, 其增强处理可利用对数变换, 即输出、输入值呈对数关系曲线变化, 它们对海岸带低灰度值区之深暗影象的增强效果明显。

(2) 彩色密度分割: 在图象反差较小、背景较为单一的情况下, 采用图象密度分割可以增强图象的分辨率, 提高解译泥沙扩散的能力。在事先对研究区灰度值分布及泥沙含量分布大致了解之后, 选择适当的灰度值划分等级和颜色, 可提高泥沙变化趋势的解译。根据本海区泥沙扩散的最佳波段分析结果(李成治、黄海军, 1992), 本文选择 TM3 和 TM4 波段进行密度分割, 分析泥沙的分布趋势, 黄河口海域可划分出 6 级不同泥沙含量的分布区(图 1)。在密度分割过程中, 作者采用跟踪球线性变换方法, 该方法属于动态线性变化, 图象的灰度值和反差以及各级别的色彩均随跟踪球的移动而变化。选择球的最佳位置可使图象增强的效果明显、各级图象色彩分明, 层次清晰, 易于解译(图版 I: 3, 4, 5)。

(3) 图象中测站位置的确定及灰度值的读取: 决定遥感定量分析悬沙含量的准确程度的因素之一是图象中测站站位的确定, 它必须根据悬沙取样、波谱测量的站位而定。首先, 在岸边找到图象上易于确定的点, 测量其与各站位的距离及其夹角。为缩小图象变形所形成的误差, 岸边点如河流交叉处、道路拐角处等应尽量靠近站位, 然后用跟踪球光标在屏幕图象上点出站位位置, 其距离用象元个数计算获得, 并读出该点的灰度值。为了使灰度值具有代表性, 增加其信噪比, 本文选用测站点周围 25 个象元的灰度值, 统计其均值、方差, 最后确定该灰度值。

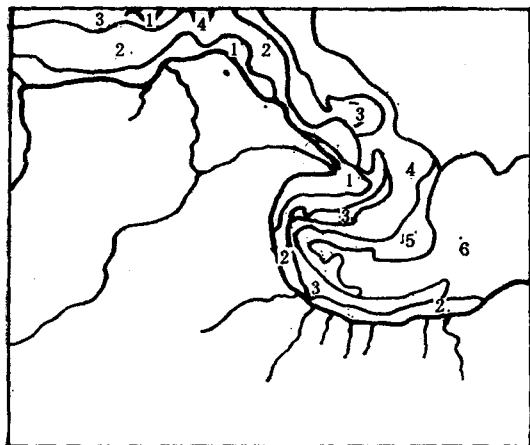


图1 黄河口区泥沙分布卫片解译图
(1989年11月20日)
(1—6 泥沙含量逐渐降低)

首先, 在岸边找到图象上易于确定的点, 测量其与各站位的距离及其夹角。为缩小图象变形所形成的误差, 岸边点如河流交叉处、道路拐角处等应尽量靠近站位, 然后用跟踪球光标在屏幕图象上点出站位位置, 其距离用象元个数计算获得, 并读出该点的灰度值。为了使灰度值具有代表性, 增加其信噪比, 本文选用测站点周围 25 个象元的灰度值, 统计其均值、方差, 最后确定该灰度值。

(4) 多波段比值模式运算: 应用 Landsat CCT 资料, 选用适用的多波段比值模式, 建立悬沙遥感新通道。处理时, 运用 Gordon 法 (Gordon, 1978)

消除大气影响, 即在 MSS7 或 TM5、TM7 影象上找一清水区域, 利用它们的吸收特征来完成大气校正。处理结果进行密度分割, 着色后可直接获得水体悬沙含量分布图。如果得到某一个色度的悬沙绝对含量值, 则可得一张水体悬沙浓度分布图。

三、悬浮泥沙的遥感定量分析

1. 大气校正方法

用于大气校正的方法很多, 主要有以下几种。

(1) 计算比值法: 该法原理是基于 MSS7 或 TM5、TM7 上空接收到的总辐射, 主要来自大气程辐射, 在清水区, 颗粒后向反射等于零, 由此推出其他波段中的大气程辐射影响值(章立民等, 1987)。

(2) 色度转换法 (Alfoldi *et al.*, 1978): 先计算各波段色度系数, 用其中两个波段的色度系数作图, 得出“典型沉积物轨迹”, 移动两个相元, 使之位于标准轨迹上, 而使其得以校正, 即

$$X_j = R_j / \sum R_j \quad (j = 4, 5, 6) \quad (1)$$

式中 X_j 为色度系数, R_j 为探测器测到的辐射能。

(3) 估计大气影响的绝对值: 不同区域在晴朗天气条件下, MSS6 所接收的由于辐射传输过程中而产生的大气程辐射强度为其最大辐射能量的 2.7%—4.6%, 比由于太阳高度角不一致引起的辐射能差异(高至 26.6%)要小得多 (Aranuvachapun *et al.*, 1989)。

(4) 同波段比值法: Landsat 的 MSS 或 TM 探测仪对海面等水体的敏感性较低, 和泰罗斯的 CZCS7 相比更是如此, 即探测器的信噪比较小, 难以反映多级泥沙的变化。

为此,应将周围象元点合并,这样尽管空间分辨率减小,但可提高信噪比,减小大气的影响,将 TM5 或 TM7 的 33 个象元相合并,其空间分辨率大致相当于 CZCS 的,但其大气校正状况可得到很大的改善 (Doerffer *et al.*, 1989) (表 1)。而且,在 TM4 波段,当泥沙浓度在 10mg/L 以下时,几乎接受不到水中物质后向散射的影响。

在研究区中应找一片清水区,读取其象元灰度值作为大气程辐射的校正值。在本区取样点中,悬沙含量最低为 7.2mg/L,可满足其大气校正的要求。研究区内灰度值最低为 6,可用该值做为大气辐射校正的基本值,即用区内各站位的灰度值与该值相除,可近似地消除大气的影响。

同时,本文采用取样点周围 25 个象元的平均灰度值来代表该样品的典型值,这样和取一个象元的灰度值相比,其大气辐射影响可降低 20 倍左右(气溶胶在水平方向上是较为均匀的)。

表 1 不同象元数的大气程辐射 ($W/m^2 \cdot sr$) 误差估计值¹⁾

波 段	误差估计值 象元数	1	3	5	9	11	33
TM1		3.08	0.96	0.58	0.32	0.26	0.09
TM2		2.47	0.80	0.47	0.26	0.21	0.07
TM3		1.65	0.54	0.32	0.18	0.15	0.05

1) 假定在辐射转换计算中海洋气溶胶光学厚度 $a = 0.3 \mu m$, 波长为 $0.55 \mu m$

2. 定量模型的建立

(1) 定量模型的选择: 遥感平台上传感器在水体上空接收到的能量(辐射)是水色、水体悬浮物质的数量、粒径、海底地形反射以及天空散射等综合作用的结果 (Alfoldi *et al.*, 1978), 可由下式表示:

$$J = J_{a/w} + J_w + J_b + J_a + J_s \quad (2)$$

式中, $J_{a/w}$ 为水、气界面反射,其大小取决于太阳和传感器的几何位置及水面的粗糙度,通常对此限定,而水面反射的影响是可以忽略的; J_w 为水分子散射,它与波长成负四次方关系,并随折射率变化而改变,对清水而言,其辐射能量为 1%—3%; J_b 为水底地形反射,主要取决于水体的混浊度,一般当水体含沙量大于 24mg/L 时,水面下 28cm 的水底地形将不产生影响,这在研究区可不考虑此项分量; J_a 为大气散射,即程辐射,是由传感器与水面之间的大气气体分子和气溶胶的散射而形成的,是波长粒子分布、角分布及几何参量等较为复杂的函数; J_s 为水体悬沙的后向散射,其强度为粒子的种类、大小、数量及波长的函数;在一个地区、短时间内这些量不变,因而散射量仅与浓度有关。研究区内若选择合适的探测位置,不考虑水分子散射,则

$$J = J_a + J_s \quad (3)$$

由(3)式表明,卫星探测器上接收的能量主要由两部分组成,即大气程辐射和水体反射,在去掉大气程辐射后该式可改写成

$$J = a + bJ_s \quad (4)$$

式中 a, b 为待定系数, J 为探测到的能量,也可转换为磁带亮度值, J_s 为与泥沙浓度变

化有关的系数,此式为本文用于计算水体悬沙的基本方程。

(2) 计算结果及分析: 利用(4)式的结构,我们对 TM3 的 20 个样品和 TM4 的 15 个样品(表2)分别进行了回归分析,其结果为

$$\begin{aligned} \text{A:} \quad & y = -0.945 + 1.97x \\ & r = 0.73, n = 20 \end{aligned} \quad (5)$$

x 为 TM3 经校正后的灰度值, y 为悬沙含量对数值, r 为相关系数, n 为样品个数。

$$\begin{aligned} \text{B:} \quad & y = 0.02 + 1.03x \\ & r = 0.88, n = 15 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{C:} \quad & y_1 = -47.6 + 24.9x \\ & r = 0.77, n = 15 \end{aligned} \quad (7)$$

x 为 TM4 经校正后的灰度值, y_1 为含沙量 (mg/L), 其他同上式。

由上述两式表明, 经大气校正后的 CCT 数据与泥沙含量对数值之间存在线性相关(图 2), TM4 波段比 TM3 波段相关系数高。

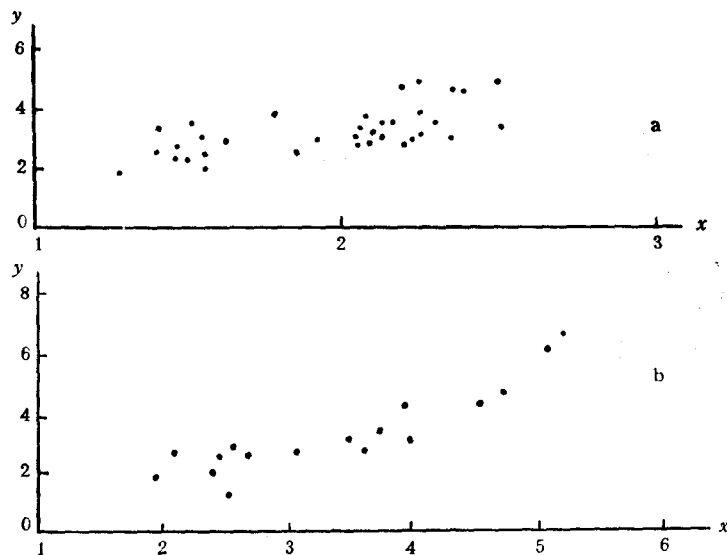


图 2 含沙量对数值 (y) 与 TM 磁带灰度值(校正值) (x) 的相关关系图
a. TM3; b. TM4

四、结 语

1. 在黄河口海域可用准同步的卫星遥感资料研究悬沙的扩散, 两者之间存在线性关系。

2. 在本区用 TM4 波段研究悬沙信息比 TM3 波段更为有效, 或用二者的复相关分析, 以至分段回归。(6)与(7)式表明, 在与遥感信息进行相关分析时, 泥沙含量值宜用对数形式。

3. 泥沙含量的计算值与实测值的对比表明, 用 TM4 作相关分析时, 总体的相对误差

为 39%, 而用 TM3 时, 该值接近 50% (表 2)。误差产生的原因主要是由于卫星过境时的天气状况、海况, 水体取样时间与卫星过境时间不同步, 悬沙的特性和取样时太阳高度角的差异以及操作产生的误差等。要减少上述误差, 可采用增加参与回归分析的参数, 如粒径、颗粒形式等, 以及选择合适的定量分析模型等方法, 从而有效地消除大气辐射影响, 这个问题仍待进一步研究。

表 2 黄河三角洲海区卫星磁带灰度值、泥沙含量实测值、计算值及其误差分析表

分 析 项 目 序 号	A	B	C	D	E	F	G	H
1	2.18	—	4.47	87.4	28.5	58.9	—	—
2	2.15	—	3.31	27.4	26.9	-0.5	—	—
3	2.12	—	2.92	18.5	25.2	6.8	—	—
4	2.06	—	3.09	22.0	22.5	0.5	—	—
5	2.22	4.75	4.72	112.2	30.8	81.4	130.1	-17.9
6	2.10	3.55	2.94	18.9	24.3	5.4	37.8	-18.9
7	2.35	3.67	2.94	18.9	39.8	20.9	42.8	-23.9
8	2.24	3.73	3.55	34.8	32.1	-2.7	45.5	-10.7
9	2.12	3.53	3.28	26.6	25.3	-1.3	33.3	-6.7
10	2.06	2.47	2.62	13.7	22.5	8.8	12.4	1.3
11	2.35	4.55	4.37	79.0	39.8	39.2	105.9	-26.9
12	2.03	3.08	2.69	14.7	23.4	8.7	23.3	-8.6
13	1.92	2.67	2.66	14.3	17.1	2.8	15.3	-1
14	1.57	1.95	1.84	6.3	8.6	2.3	7.3	-1
15	2.39	3.95	4.35	77.5	43.1	34.4	57.1	20.4
16	1.50	2.38	2.09	8.1	7.5	-0.6	11.3	-3.2
17	1.46	—	2.08	8.0	6.9	-1.1	—	—
18	2.51	4.00	3.22	25.0	54.6	29.6	60.1	35.1
19	2.20	2.12	2.69	14.7	48.6	33.9	8.7	6
20	1.55	1.38	2.29	9.9	8.2	-1.7	4	5.9

A: TM₃ 灰度值(校正); B: TM₄ 灰度值(校正); C: 实测含沙量对数值; D: 实测含沙量 (mg/L);
E: 计算含沙量 (TM₃); F: 误差 (TM₃); G: 计算含沙量 (TM₄); H: 误差 (TM₄)

参 考 文 献

- 李成治、黄海军, 1992, 卫星遥感资料在黄河口区泥沙扩散研究中的应用, 黄河流域环境变迁与水沙运行规律论文集, 地质出版社, 3: 149—159。
- 赵太初, 1988, 闽江口悬浮泥沙水体光谱特征现场测量与遥感定量分析, 遥感应用, 1(1): 13—21。
- 恽才兴等, 1987, 河口悬浮泥沙遥感定量研究及其应用实例, 遥感文集, 科学出版社, 99—100。
- 章立民等, 1986, 水体悬浮泥沙的遥感定量分析, 中国地球资源光谱信息及其应用论文集, 能源出版社, 116—119。
- 舒守荣等, 1985, 利用光谱辐射计测定不同深度水体中泥沙含量的新方法, 环境遥感, 1(2): 132。
- Alfoldi, T. T. et al., 1978, Water quality analysis by digital chromaticity mapping of Landsat data, *Can. J. Rem. Sens.*, 4(2): 108—126。
- Amos, C. L. et al., 1979, The determination of suspended sediment concentration in a macrotidal system using Landsat data, *Journal of Sedimentary Petrology*, 49 (1): 59—174。
- Aranuvachapun, S. et al., 1989, Landsat-MSS radiance as a measure of suspended sediment in the Lower Yellow River (Hwang Ho), *Rem. Sens. Environ.*, 25: 145—165。
- Curran, P. J. et al., 1987, Multispectral remote sensing of nearshore suspended sediment: a pilot study *Int. J. Remote sensing*, 8 (1): 103—112。

- Doerffer, R. *et al.*, 1989, Analysis of thematic mapper data for studying the suspended matter distribution in the coastal area of the German Bight (North Sea), *Rem. Sens. of Environ.*, **28**:61—73.
- Gordon, H. R., 1978, Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the oceans, *Appl. Opt.*, **17**:1631.
- Jerry, C. Ritchie *et al.*, 1976, Remote sensing of suspended sediments in surface waters, *Photogrammetric Engineering & remote sensing*, **42** (12):1539—1545.
- John, C. and J. R. Munday *et al.*, 1979, Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement, *Remote Sensing of Environment*, **8**:169—183.
- John, G. Lyon *et al.*, 1988, Determinations of suspended sediment concentrations from multiple day Landsat and AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, **25**:107—115.

USE OF LANDSAT TM TAPES FOR QUANTITATIVE STUDY OF SUSPENDED MATTER DISTRIBUTION IN THE HUANGHE RIVER ESTUARY AREA*

Huang Haijun and Li Chengzhi

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences*)

Guo Jianjun

(*Institute of Geological Remote Sensing, Scientific Research Institute
of Petroleum Exploration and Development*)

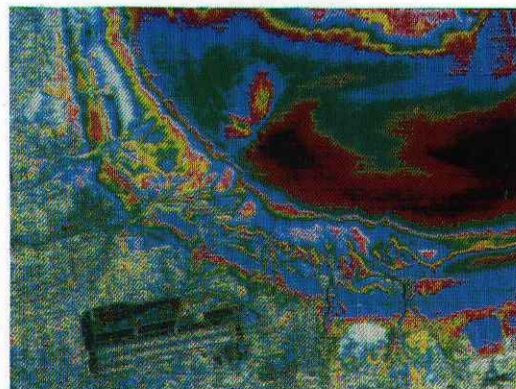
ABSTRACT

A relative analysis of suspended matter concentration of sea surface water sampled in Aug. 1989 from the Huanghe River Estuary area and of Landsat Tape Data taken under the weather condition similar to those during the period of sampling was made. The best band (TM₃) or bands (TM₃ and TM₄) for the study of suspended matter and a relative regression or divided regression formulae were obtained. A simple method eliminating the atmospheric disturbance was proposed after analysing the optic features of Landsat tapes. The error and its cause in the quantitative model was discussed as well.

* Contribution No. 2596 from Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences



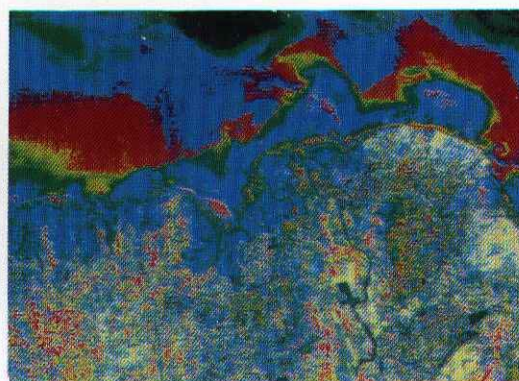
1



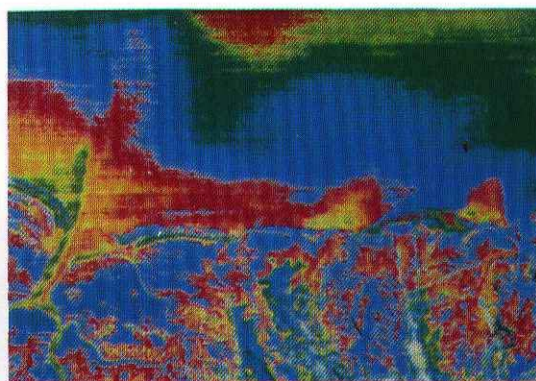
3



2



4



5

1. 黄河三角洲全景 TM 磁带假彩色合成影像；2. 黄河河嘴 TM 磁带假彩色合成影像；
3. 莱州湾西部子区密度分割影像；4. 五号桩码头子区密度分割影像；5. 套儿河口子区密度分割影像