

# 浅海水下地形地貌遥感信息提取与应用

李铁芳 易建春 厉银喜

(中山大学)

(中国科学院遥感卫星地面站)

迟耀斌 苏民生

(北京遥感信息研究所)

(中国地质大学)

宋宗贤

(山东长岛县科学技术委员会)

1990年4月24日收稿

## 摘 要

本文根据笔者在我国渤海海峡、闽江口、瓯江口以及珠江口附近海域的遥感实验,讨论由卫星遥感提供的水下地形地貌信息的特征、机理,提出使用信息论和灰色系统论方法分析水深遥感信息传递的过程。以此为依据,建立水深信息提取模型,研究其实用性、精度和效果。实践表明,水深遥感的测量精度没有达到大、中比例尺常规测量的要求。但作为大面积、短周期的宏观分析,特别是遥感图像上显示的海水表层流场特征,对判别浅海水下地形走向和地貌单元,了解其冲刷、沉积作用的动力因素,动态变化等具有十分重要的意义,它成为常规方法的补充手段。对近海的规划、开发,如港湾海水养殖、航道选址、海上工程、海水排污等方面的海水环境分析与宏观评价及监测,具有一定的优势。本文着重讨论了以下三个问题: 1. 水下地形地貌遥感的原理与信息特性; 2. 水深信息提取及灰色系统方法与模糊判别模型分析; 3. 遥感水下地形地貌的应用与效果分析。

**关键词** 水下地形地貌 遥感信息提取 水深度信息

本文利用陆地卫星资料对我国渤海海峡南部(庙岛群岛)、闽江口、瓯江口及珠江口附近海域进行了试验,分析了水下地形地貌信息的特征、信息传递的机制和信息提取的模型。由于遥感图像为人们提供了从宏观、整体、动力作用的信息来了解水下地形地貌状态及它与水体间的关系,使得遥感水下地形地貌探测的应用获得新的认识。

## 一、卫星遥感水下地形地貌的原理与信息特征

### 1. 水下地形信息传递的机理

卫星传感器所接收到的海水信号可表示为

$$L = L_{SG} + L_{HG} + L_P + L_w \quad (1)$$

$$L_w = \frac{E_0}{\pi} \cdot \frac{\tau}{n^2} \cdot \rho \cdot \exp[-\alpha(\sec\theta + \sec\phi)z] \quad (2)$$

式中  $L_{SG}$  为水面的反射辐射;  $L_{HG}$  为天空光辐射及水面对天空漫射的反射;  $L_P$  为大气柱上的大气分子及悬浮微粒的散射辐射;  $L_w$  为离开水表面的向上辐射,即水介质的散

射辐射;  $E_0$  为水表面的太阳辐照度;  $n$  为海水折射率;  $\tau$  为大气传输率;  $\rho$  为海底底质反射率;  $\alpha$  为海水衰减系数;  $\theta$  为传感器垂直方向的视角;  $\phi$  为太阳角;  $z$  为遥感水深值。

上式中  $L_w$  项包含了由于水的透光性所传递的水下地形地貌信息。随着水体内悬浮物含量的增加, 即水体对太阳光的衰减系数  $\alpha$  的增大而使  $L_w$  携带的水深信息量减少, 但实际上遥感图像上显示的水深信息远比理论推算的多, 入水深度也比推算的大, 遥感水深值  $z$  与实测水深值  $P$  之间的相关值比较, 含沙量高的河口区反而比水体清洁的海区高。例如我们在几个含沙量不同的海区所作的亮度值与实测水深值的相关统计结果列于表 1。

表 1 不同含沙量海区的遥感亮度值与实测水深值的相关度比较

Table 1 The Connective Comparision of Image Brightness With Actual Water Depth On Seas At Different Suspended Sediments

海区	平均含沙量 (克/升)	遥感资料(波段、年、月)		实测水深范围 (m)	相关系数
长岛	<0.1	MSS 5	1981. 11.	0—30	0.78
瓯江口	0.4	MSS 5	1976. 7	0—20	0.93
闽江口	<0.2	MSS 5	1976. 7	0—20	0.75
珠江口崖门	0.2	TM <sub>3</sub>	1988. 7	0—20	0.92

表 1 说明, 水中悬浮泥沙虽减少了光的入水深度, 但在有效的遥感水深范围内, 含沙量高的水域, 遥感光谱的后向能量变化与水深变化的相关程度反而更密切。这种结果表明, 遥感水深信息的传递, 除了由水的透射性质所形成的(反映在(2)式的指数项内  $z$  值)以外, 悬浮泥沙含量的变化也携带着水深变化的信息, 这是通过水下地形的变化, 在水动力作用下影响到悬浮泥沙的含量和分布, 从而又影响到光谱的后向散射比率, 它反映在(2)式的  $\rho$  及  $\alpha$  上。我们的看法与梁顺林等人研究的结果一致。他们于 1987 年指出, 当悬浮泥沙浓度较高时(低的透视深度), 遥感穿透深度大于光学透视深度; 当悬浮泥沙浓度较低时, 遥感穿透深度小于光学透视深度。

表 2 庙岛海区水深、表层流速与像元亮度值之间的相关度比较

Table 2 The Connective Comparision of Image Brightness With Water Depth and Surface Current Speed on Miao Island Seas

实测水深值 $P(m)$	13	21	14.5	13.5	14	17
流速(节) $V$	2.3	0.9	1.8	1	1.5	1.5
亮度值(大气校正) $L$	95	60	65	70	65	60
相关系数 $r$	$r_{PL} = 0.60$		$r_{VL} = 0.71$		$r_{PV} = 0.59$	

实践中还发现在水体清洁的长岛(庙岛)海区, 遥感图像像元亮度值与实测水深值的相关程度还不如像元亮度值与海区水流流速变化的相关度高, 见表 2 所示(每个样点为小

区域内的均值)。

表 2 中  $r_{PL}$  为实测水深值与像元亮度值的相关系数;  $r_{VL}$  为流速与像元亮度值的相关系数。可见水下地形的变化信息也通过海水表层流速、流向的变化来传递,其原因是地形的起伏引起水流流速和方向的改变(见表 2  $r_{PV} = 0.59$ ),导致水面粗糙度或者波浪产生异样,甚至出现泡沫等。这种状态影响到水面对太阳光的反射、入射水体及水体的散射等能量比例关系,从而传递了水下地形、地貌信息。随着海面风力的加大,图像像元亮度值变化与海面流速变化的关系更加密切,即  $r_{VL}$  系数值提高,相应  $r_{PL}$  值降低;同时由于表层流速的加大,对水下地形起伏而引起的流速变化也会加剧,即  $r_{PV}$  相关系数提高,水下地形信息也就更多地依赖于风海流来传递了。海水表面粗糙度变化引起的光谱能量信号反映在(1)式中的  $L_{SG}$  项,可表示为

$$L_{SG} = E \cdot \cos \phi \cdot \exp[-\tau / \cos \phi] \cdot r(\theta, \phi) \quad (3)$$

式中  $E$  为大气顶部的太阳辐照度;  $\tau$  为大气透射率;  $r(\theta, \phi)$  为海面反射函数,它是海况的函数,当水流速度越高,其值越大,当风速一定时,  $r$  值与水下地形变化有关。因此  $L_{SG}$  项也是水动力作用将水深变化传递到水面的光谱信号。

## 2. 遥感水下地形地貌的信息特征

**信息传递的复杂性。** 既有由透水性质直接传递的水下地形信息,也有由水的动力作用因素通过泥沙和水流间接传递的信息,使得它反映的形式多样。

**信息量的不稳定性。** 因为海况变化而影响到水的混浊度和水表面的粗糙度,从而使信息传递的参量发生变化。

由于前两种性质导致了水下信息的模糊性和灰色性。水下地形地貌信息是受干扰的、非线性的不确定量,属于只有部分参变量是可知的一种灰色系统。

## 二、水下地形地貌信息的提取与模糊判别

水下地形地貌信息的特征、传递机理决定了它的提取和判别方法。

### 1. 进行滤波处理

根据水深遥感信息量统计特征和水深分辨率特征进行滤波处理。遥感图像信息量的估计可以假定为平稳的马尔可夫过程来描述。根据信息论的最大熵定理并考虑到遥感图像受到的大气和海水表面粗糙度干扰(噪声),每个像元的平均信息量(熵)用  $H_P$  表示

$$H_P = \sum_{g=0}^k P(g) \cdot \text{Log}_2 P(g) \quad (4)$$

式中  $k$  为灰度(亮度)级数;  $P(g)$  为像元灰度  $g$  的概率。对海域内的图像  $TM_1$ 、 $TM_2$ 、 $TM_3$  作出信噪比( $S/N$ )、熵、有效信息量估计见表 3。

从表 3 中可以看出,  $TM_2$  波段的噪声比  $TM_1$  更为严重,这是由于后者有更好的海水穿透深度,故反映水下地形变化的有效信息量比较大;  $TM_3$  虽然有最大的信噪比和熵,但因它的穿透深度小,只能反映表层和浅层信息比较好。

表 3 庙岛海区 TM 图像不同波段数据的信息量统计\*  
Table 3 The Statistic Information Contents of TM Images On Miao Island Seas

波段	S/N	熵	有效信息量	信息应用
TM <sub>1</sub>	17.9690	4.3163	4.102	水下地形地貌分析
TM <sub>2</sub>	1.9853	3.0858	0.974	水中含沙量、叶绿素
TM <sub>3</sub>	38.3003	4.6737		表层水文状态

\* 此为 1987.3.29TM 图像(庙岛海域)经过大气校正处理的统计分析结果。

在考虑有效信息量的同时,还需要分析波段水深分辨率( $dz$ )影响。由于不同波段其辐射饱和度不同,短波段(如 TM<sub>1</sub>、TM<sub>2</sub>)的水体衰减系数比长波段(如 TM<sub>3</sub>、TM<sub>4</sub>)的要小,同时前者的水深分辨率也比后者的小。1976年 Gordon 指出,在可见光遥感中,传感器所接收到的信号中最大只有 10—20% 来自海水的后向散射,因而传感器的辐射灵敏度在海洋遥感中就显得十分重要。对陆地卫星的 TM 波段饱和辐射度为  $2\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 被量化为 256 个灰级,其辐射分辨率为 0.5%。为求波段的水深分辨率  $dz$ , 令(2)式中的  $L_w$  代入(1)式中,并对  $L$  求导得:

$$dL = dL_w = L_w \cdot [-\alpha(\sec\phi + \sec\theta)z] dz$$

则

$$\begin{aligned} dz &= \frac{1}{\alpha(\sec\phi + \sec\theta)} \cdot \frac{dL}{L_w} = \frac{1}{\alpha(\sec\phi + \sec\theta)} \cdot \frac{dL}{L - (L_{SG} + L_P + L_{HG})} \\ &= \frac{1}{\alpha(\sec\phi + \sec\theta)} \left[ 1 + \frac{(L_{SG} + L_P + L_{HG})}{L} \right] \frac{dL}{L} \end{aligned}$$

由前面所述,来自海洋的信号最大只占传感器所接收到信号的 20%, 所以

$$(L_{SG} + L_P + L_{HG})/L \approx 80\%,$$

因而上式可近似为

$$dz \approx \frac{1.4}{\alpha(\sec\phi + \sec\theta)} \cdot \frac{dL}{L} \quad (5)$$

此式说明可见光水深遥感的水深分辨率取决于水体衰减系数  $\alpha$ ,  $\alpha$  越大,即衰减越快,水深分辨率越大。由此可以了解到随着水体中含沙量的增加,使水体光谱衰减系数减小,导致  $dz$  值升高,即水深分辨率增加。当然含沙量的增加使光的透射深度减小了(即入水深度减小),但对水深变化的敏感程度却提高了。另一方面,由于波段对水体的衰减系数  $\alpha(\lambda)$  是各不相同的,短波段(TM<sub>1</sub>、TM<sub>2</sub>)的衰减系数小,而长波段(TM<sub>3</sub>、TM<sub>4</sub>...)的衰减系数大,因此尽管前者入水的深度比后者大,但对水深变化的分辨率前者却不如后者高。所以在波段最大入水深度范围内,水深分辨率高的波段(低频或长波段)所携带的水深变化的信息量更大些。例如在陆地卫星 TM<sub>3</sub> 波段的入水深度范围内, TM<sub>1</sub>、TM<sub>2</sub> 反映的水深变化的敏感程度不如 TM<sub>3</sub> 波段。自然水深超过 TM<sub>3</sub> 波段的入水深度范围以

外时,  $TM_3$  波段已不可能有水深变化的信息(是指光透射性质的)反回到水面上,此时选用有更大入水深度的短波段 ( $TM_1$ 、 $TM_2$ ) 是合适的。例如我们在闽江口海域做水深信息提取试验(见表4)。

表4 闽江口海区不同水深段与像元亮度值之间的相关度比较  
Table 4 The Connective Comparison of Image Brightness With Different Water Depth Areas on Ming Jiang Estuarine

相关系数 $r$ 水深值 (m)	波段 ( $\mu\text{m}$ )	MSS 4 (0.5—0.6)	MSS 5 (0.6—0.7)	MSS 6 (0.7—0.8)
0—30		0.43	0.39	0.31
分段(水深)		5—30, $r = 0.85$	0—15, $r = 0.70$	0—10, $r = 0.62$

从表4可以看出,在选择0—30m水深进行统计分析时,无论那个波段的数据,像元亮度值与水深值的相关系数均不高。因为对于短波段的MSS4来说,浅水样品出现的饱和辐射及水深分辨率都不高的缘故,使相关系数降低;而在深水段时,水深超出了波段(MSS6)的最大入水深度,反射光能量未能反映出水深变化,也使该波段的相关水平下降。为此应从不同波段的入水深度以及考虑波段的水深灵敏度出发,分段地选用波段数据来提取水深变化信息,这样会使相关系数提高。如水很浅时选用MSS6(或 $TM_4$ );水比较深时则选用MSS4(或 $TM_1$ 、 $TM_2$ )等波段。

以上分析说明,滤波处理的目的是消除或抑制干扰,核心是根据水深条件选取合适的时相及波段进行水深信息提取。

## 2. 求遥感水深值 $z$

根据灰色理论方法简化水深信息传递的灰色系统模型,以便求解遥感水深值  $z$ 。由于在水深信息传递的灰色模型中,包含了许多参变量(见(1)、(2)式),其中部分参量是已知的或者可观测到的,而另外一些是未知的或者是很难确定的参变量。因此要使用灰色系统理论方法,即尽可能利用已知的变量进行外推或者简化某些未知量。例如选择风平浪静、平潮时卫星过境的图像,可以认为此时的大气和海面子系统为稳定的结构,即(1)式中的  $L_{SG}$ 、 $L_{HG}$  及  $L_P$  为常量,其中水面很平静时,  $L_{SG}$  很小,可以不予考虑。而  $L_{HG} + L_P$  也可以通过海上与卫星的同步光谱测量或者直接在图像上选取特殊的水深点像元来确定。最后对(2)式简化(线性化)得到遥感水深值  $z$

$$z = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{\pi} \cdot \frac{\rho \cdot \tau}{n^2}\right) - \ln(L_w)}{\alpha(\sec\phi + \sec\theta)} \quad (6)$$

式中  $E_0$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ 、 $\pi$  为已知量,  $\rho$ 、 $\tau$ 、 $n$  及  $\alpha$  是可以从海上观测,或者从图上查找某些

边界条件来近似。也可以通过实际水深值  $P$  与 (6) 式的遥感水深值  $z$  的相关分析进行外推。我们正是使用后一种方法对山东庙岛群岛海域进行试验，相关系数由处理前的 0.78 提高到 0.92。

### 3. 通过表层流场信息判别水下地貌单元

卫星过境时记录了海面瞬时表层流的状态。因为水流速度大时，海面粗糙度增加，或者泡沫多了；不同特征的水团或流系，其水中悬浮物的物质或含量有异，反映为水色不同。以上因素都可以在图像上表现为像元亮度值或者图像的纹理特征差异，显示出流的迹线、时线或流线等流场状态。水下地形的起伏或不同动力地貌类型的边界上，会引起其上覆水体流向、流速的变化而传递到水表面，反映为 (1) 式的  $L_{SG}$  信号中。实际表层流场还受到水面风场及水流控制，因此是一种模糊的水下地貌信息，应使用模糊函数进行描述和判别

$$\mu_g(G) = [\mu_e(E) \cap \mu_\theta(\theta)] \cap L_w \cap \mu_s(S) \quad (7)$$

式中  $\mu_e(E)$  为表层流场信息函数； $\mu_\theta(\theta)$  为反映流系间的相互关系函数，如平行、交汇、聚、散、顶托等的动力作用； $\mu_s(S)$  为形态模糊函数，如槽状、洼地、S 形……； $\cap$  表示模糊函数的逻辑“与”判别运算。其判别流程如图 1 所示。

### 三、应用效果分析

由于可见光海水遥感光谱特性及其分辨率的限制，即使进行了各种信息处理，也不可能达到大、中比例尺常规测量的精度要求。但从实用的目的出发，有时可不用常规方法的概念来衡量遥感探测成果的应用效果和价值。因为它们各有优势，互为补充。遥感的优势在于信息的宏观性、直观性和整体性，是脱离水面所进行的大面积、短周期测量，对危险海域或不可及的、变化迅速的海区进行的监测和预测，是常规方法所不及的。在生产实践或规划过程中，往往需要把水体的动力特征及其下垫面作整体来考虑，例如浅海港湾的水产养殖规划问题，要求提供涉及水下地形地貌及水动力作用的水交换条件资料，而遥感方法却能作出独特的贡献。例如我们为山东长岛县提供庙岛群岛海域的水下地貌图、登州水道变迁图及水交换条件图等。见图 2 (图版 1) 图 3 和 4 所示。

由于遥感水下地形地貌信息的直观性和连续性，因此对研究与地形地貌条件相关的水下生物分布时可作出有益的结果。例如我们使用卫星遥感方法确定威胁大亚湾核电站的安全运行的取水口堵塞物——马尾藻分布，是根据马尾藻生长的地形(水深约 5m 左右)和地貌(砾石滩)的特殊条件，通过遥感数据提取了水下砾石滩地貌信息，作为判别马尾藻

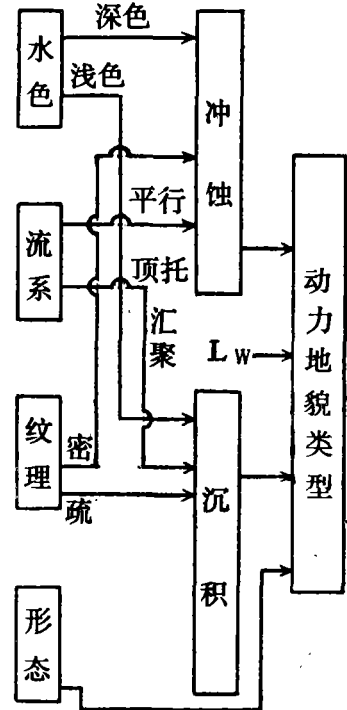


图 1 水下动力地貌模糊判别

Fig. 1 Fuzzy Recognition of Underwater Dynamic Topography

生长分布范围的控制因素,从而消除了与马尾藻有相近光谱的特殊干扰物,使得马尾藻分布和产量估算比较符合实际,见图 5 所示 (图版 I)。

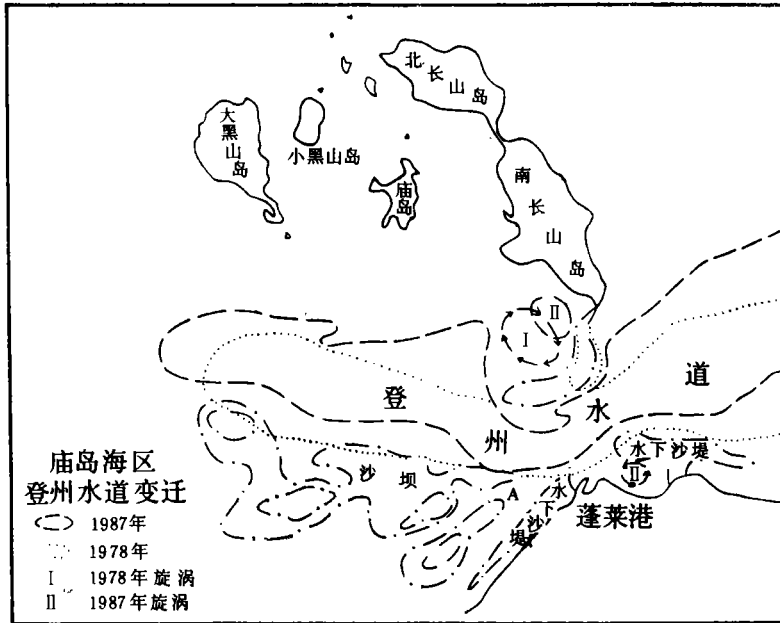


图 3 水道变迁动态

Fig. 3 The State of Channel Change

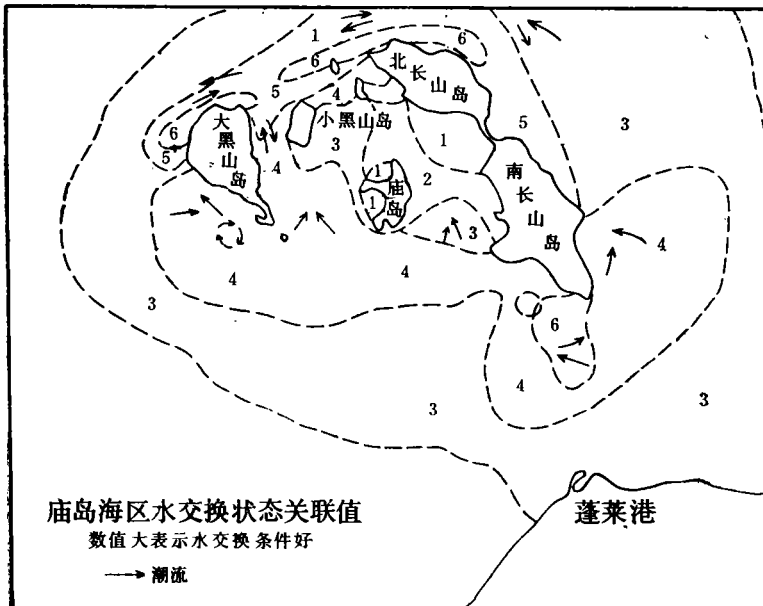


图 4 水变换相对状态

Fig. 4 The Relative State of Water Exchange

## The Extraction of Geomorphologic Remote Sensing Information on Shallow Sea Under-water Terrain and Its Application

Li Tiefang Yi Jianchun

(Zhong Shan University)

### Abstract

By using the data of the landsat and with the help of computer image processing method, the information of shallow sea's configuration and terrain are obtained in the areas of Chang Dao Island (Southern Bohai Strait), Ming Jian, Ou Jian and Pearl river mouth. In this paper, the auther discusses the characteristics of under-water terrain and the module of picking up water depth message. To obtain the better result, the multiseasonal and multispectral data are needed to pick up the information. It can be seen that the application of satellite remote sensing and image processing technology is one of the method of shallow sea investigation, and it's a useful supplement for ordinary investigation, especially for the investigation in the changeable and dangerous oceanic areas. Also, its applications in sea shore planning, developing and managing such as environmental monitoring and evaluating for aquatic culture in bay.

**Key words** Under sea-water terrain Extraction R. S. Informaion Water depth message

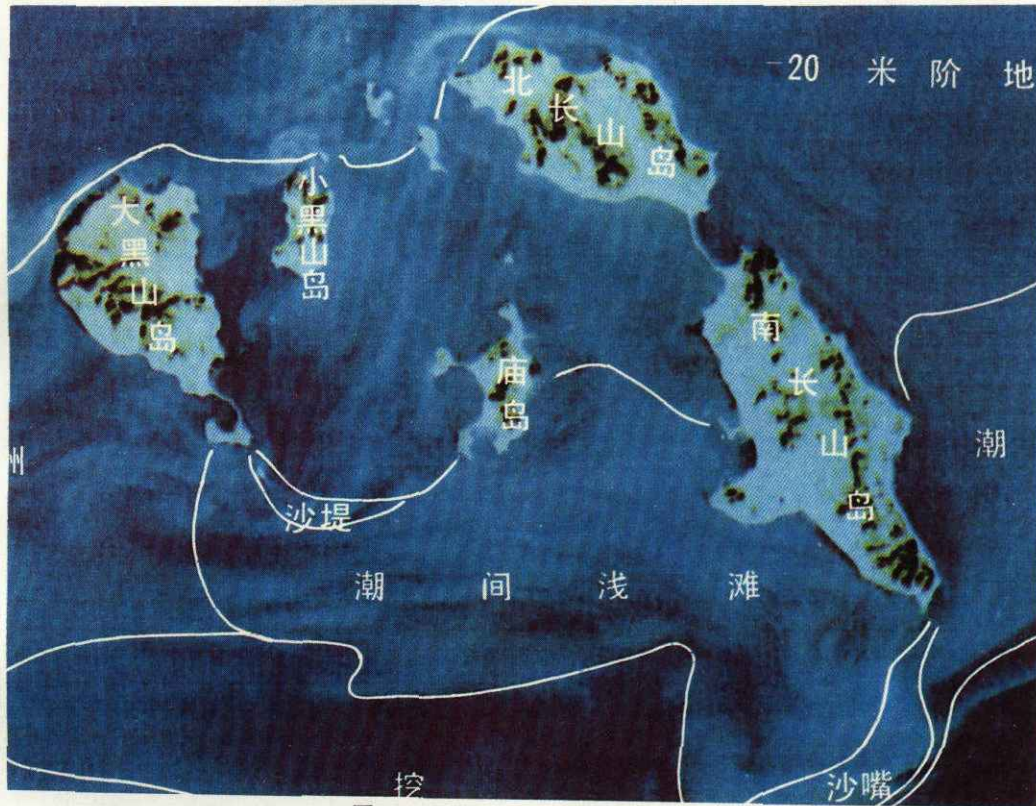


图 2 长岛（庙岛）水下地貌图

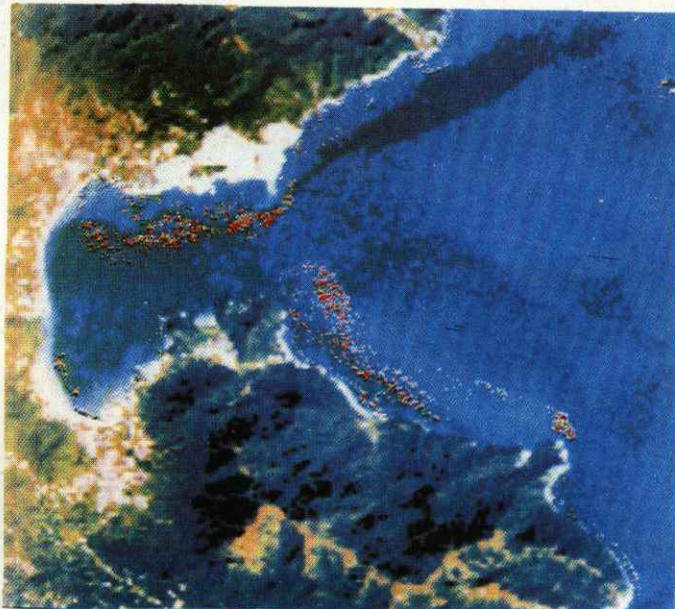


图 5 大亚湾的大鹏澳 马尾藻分布（红、黄色）