

利用卫星象片分析长江入海 悬浮泥沙扩散问题*

恽才兴 蔡孟裔 王宝全
(华东师范大学) (上海航道局)

在长江丰沛的水量中悬浮着数量可观的泥沙,不仅沿程影响整个流域的水文特征及河床地形的塑造,而且当其随流输移入海以后,继续改变着我国黄海南部及东海北部海岸带与大陆架海域的自然状况。新中国建立以来,地貌学者曾经围绕长江三角洲地貌发育和长江河口整治任务,探讨过长江入海泥沙的分配与沉积过程^[1]。海洋动力学者在研究中国近岸流系过程中,发现长江冲淡水消长变化的范围极广^[2]。在东海、黄海底质调查时,分析出我国陆棚区海底沉积物最主要的来源为河流悬浮物,其中长江泥沙所占的比重较大^[3]。通过海洋渔业资源调查,证明凡是迳流量大的河口海区,都可以成为各种经济渔虾的产卵场及肥育索饵场⁴,如吕四渔场及舟山渔场分布在长江口海区的南北两侧,就是明显的例子。最近的调查报告中亦曾提及长江泥沙的影响⁵。上述情况都涉及到长江入海水流和泥沙的扩散问题。本文利用1976—1978年美国大地卫星所拍摄长江口的3张不同时期象片,以及16张气象卫星(NOAA-5)象片,依赖卫星遥感覆盖面积大、同步性好、便于动态监测等优点,对长江口入海悬浮泥沙扩散问题作了初步分析。由于搜集的卫星象片资料不够系统(气象卫星象片以冬季居多),陆地卫星象片数量较少等原因,给全面分析带来一定困难,加上量测过程中的误差,文中提及的一些数据和推论仅供参考。

一、长江入海悬浮泥沙在口门分配扩散的趋向

长江口属分叉河口。源远流长的长江每年携带9240亿立方米的水量和4.86亿吨泥沙分由北支、北港、北槽、南槽四条汉道流入东海。由于迳流和潮流这两种动力因素相互消长,造成泥沙交换频繁,河床冲淤多变,影响了入海航道的稳定性。为摸清河口地区泥沙运动规律和淤积原因,有关单位曾多次组织常规性水文测验,但都难以取得大面积同步资料。美国陆地卫星象片为这方面提供了丰富的信息。据研究表明,多波段象片MSS-5(0.6—0.7微米)图象密度对水体悬浮泥沙反应最敏感,底片上显示的不同灰度级别可以代表表层1米厚水层的含沙量数值^[5]。如通过模拟试验或现场同步采样则可以得出悬浮泥沙含量与灰度之间的定量关系。为此,我们选用了1976年10月21日、1978年7月4

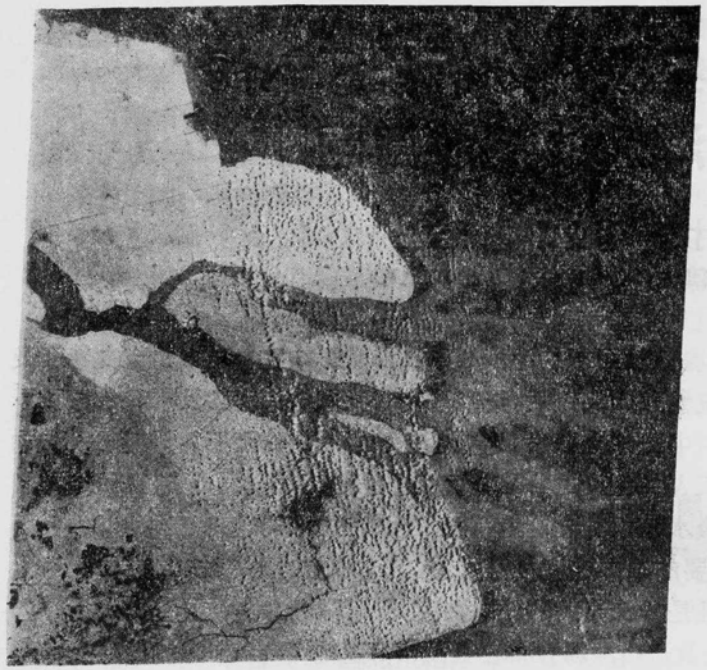
* 本文写作过程中,胡嘉敏、陈敏照、徐永良、袁国超、益建方、孙禧兰、王柏棠等同志参加了资料搜集及部分解译工作,谨此致谢。

1) 参见国家科委海洋组海洋综合调查办公室,1964年全国海洋综合调查报告第二分册及第十一分册。

2) 参见华东师大河口海岸研究所,1979年全国海涂资源考察温州地区试点报告。

本刊编辑部收到稿件日期:1980年7月8日。

日以及 1978 年 8 月 9 日三个不同日期的 MSS-5 或 MSS-6 的卫星象片共四幅,对长江口不同季节,不同潮情条件下入海泥沙分配扩散情况作概要分析。



象片 1 1978 年 8 月 9 日, MSS-6 卫星象片

1978 年 8 月 9 日(农历七月初六)上午 9 时 47 分,陆地卫星-3 号在长江口上空成象时,正值长江洪水期寻常潮时刻,(大通站 8 月平均流量 29900 秒立方米,中浚当日平均潮差 2.99 米)口门地区潮情处于落急后期(表 1),风向 SW,风速 9.6 米/秒。上海航道局当时亦组织有关单位在现场进行了大规模同步水文测验,一些地面测试数据完全可以与空

表 1 1978 年 8 月 9 日长江口水文情况表

潮位 \ 潮时	07	08	09	10	11
横沙	1.12	0.66	0.34	0.28	0.80
中浚	0.99	0.57	0.28	0.38	1.45
大载山	0.97	0.83	1.19	1.91	2.77

中取得的信息相配合,据上述各方面影响因素考虑,这幅象片具有明显的代表性,本文作重点分析。从图象上可以看出(象片 1,象片 2),随着河口区段含沙量的不同,象片上灰度的层次界限分明。我们将水体中不同含沙量所反映的灰度差异分为浑水舌、浊水、沉积羽流、冲淡水四个级别,现分述如下:

1. 浑水舌

浑水舌是悬浮泥沙随迳流排泄入海的主体,含沙量最高,据实测资料验证为 0.6—1.0 公斤/立方米左右。浑水流在河槽地形约束和落潮流动力轴运动惯量的影响下,分布形态呈条带状,流束宽度一般为 5—8 公里(图 1)。由于河口入海河道流量分配不均(表 2),因此表现在浑水舌延伸的距离上也有所差异。如北港浑水舌末端的位置在 $31^{\circ}13'N$, $122^{\circ}28'E$, 离 $122^{\circ}00'E$ 经线 45 公里¹⁾,北槽浑水舌末端的位置在 $31^{\circ}06'N$, $122^{\circ}25'E$,

1) 长江口北港,北槽,南槽 $122^{\circ}00'E$ 经线位置附近是河口盐淡水交会地带,故以此作为浑水舌计算的起始距。

离 $122^{\circ}00'E$ 经线 39 公里; 南槽浑水舌延伸的距离最短, 其位置在 $31^{\circ}00'N$, $122^{\circ}13'E$, 离 $122^{\circ}00'E$ 经线 21 公里。这与实际水文测验中北港、北槽、南槽水沙分配的数值相协调。由此引证, 目前长江入海泥沙的分配状况北港居首位, 北槽其次, 南槽最小。其变化原因与南支河段南门通道近几年来扩大加深有关。

2. 浊水

当浑水舌伸向口外后, 由于脱离河口地形的约束, 在旋转潮流的带动下, 与海水发生

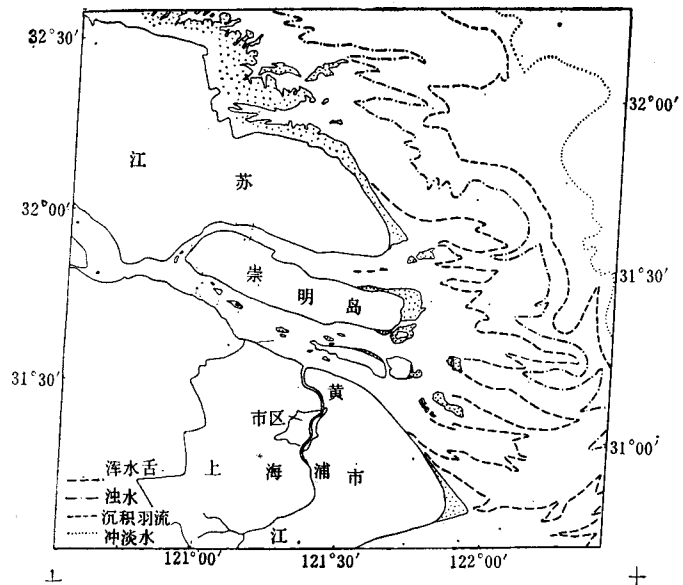


图 1 长江浑水舌分布形态

表 2 1978 年 8 月 9 日长江口入海流量分配表

流量 断面名称	项目	涨潮总量	落潮总量	净出流量	百分比
北 港		89,700	173,350	83,650	77.32%
南 港		115,950	140,500	24,550	22.68%
北 槽		49,270	89,395	40,125	—
南 槽		30,975	18,905	-22,070	—

混合, 浑浊的含沙水流开始扩散成云团状, 其外缘的分布界线为 $122^{\circ}25'—122^{\circ}30'E$, 大致相当于 -10 至 -15 米等深线部位。

3. 沉积羽流

长江入海泥沙进一步扩散沉积, 含沙浓度显著减小, 在东海近岸流系及风海流的侧向牵动影响下, 其外缘向北偏转, (其中风力为 5 级的西南风起了一定助长作用), 泥沙扩散方向指向苏北沿海。沉积羽流的扩散分布范围一般在 $122^{\circ}30'—122^{\circ}35'E$ 之间。由于河水比重轻于海水, 因此沉积羽流的流动方式成为海面上浮动漂移的水层, 这种现象可以从 MSS-6 与 MSS-5 两张象片对比中发现。(象片 1, 2, 3)。

4. 冲淡水

这是长江入海泥沙扩散的外缘部分。其外侧边界可达 $122^{\circ}40'—122^{\circ}45'E$, 由于入海泥沙进一步扩散沉降, 水体中悬浮泥沙的含量显著减小, 水色与外海水体接近, 与海水的主要区别在于含盐量比较少, 故命名为冲淡水。

1976 年 10 月 21 日 9 时 36 分陆地卫星-2 号所摄的象片, 代表了长江口枯水季节悬浮泥沙扩散流态(象片 4, 表 3), 由于枯水季节长江来沙量减少, 河口浑水舌分布不明显,

象片上的灰度只能分为浊水和沉积羽流两级,外缘范围在 $122^{\circ}20'E-122^{\circ}25'E$, 泥沙扩散指示的方向为 SE (图 2)。

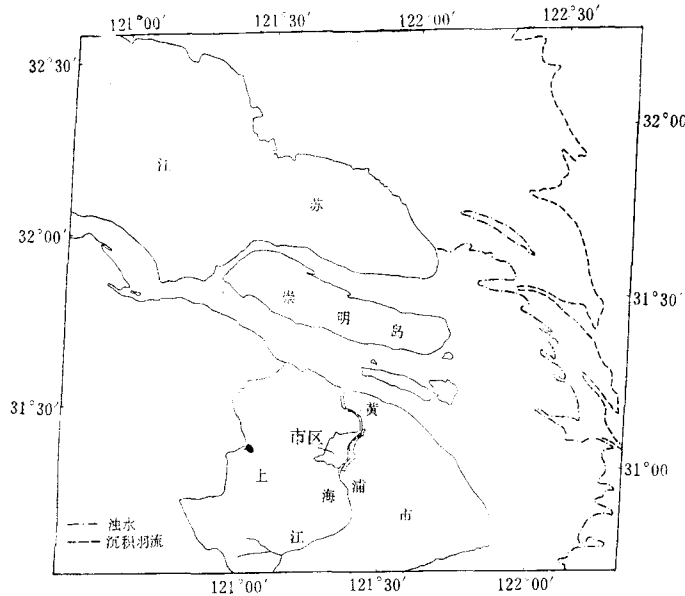


图 2 长江口枯水季节入海悬浮泥沙扩散方向

表 3 1976 年 10 月 21 日(农历九月二十八日)长江口水情风情表

站名	潮位					风情		大通站月平均流量
	07	08	09	10	11	风向	风速	
横沙	1.90	2.81	3.29	3.45	3.31	SW	3.9 米/秒	25,800 立方米
中凌	2.33	3.05	3.41	3.40	3.00	S (引水船)	6 米/秒 (引水船)	

此外,从象片 3 还可以看出,南汇边滩处长江口与杭州湾的交界。当长江口泥沙随落潮流排泄入海时,在南槽口门附近与杭州湾来水相汇,两股落潮流相交汇的地点约在 $30^{\circ}40'N, 122^{\circ}08'E$ 附近。汇合点以内属落潮缓流区,有利于悬移质泥沙沉降堆积。这是南汇边滩逐年向海伸展的原因所在。

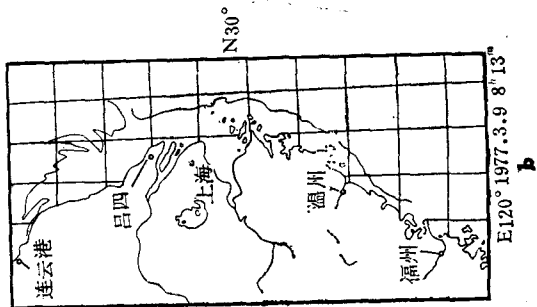
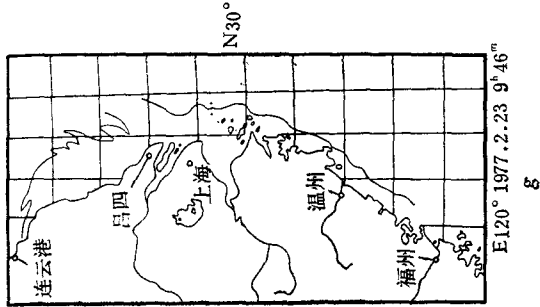
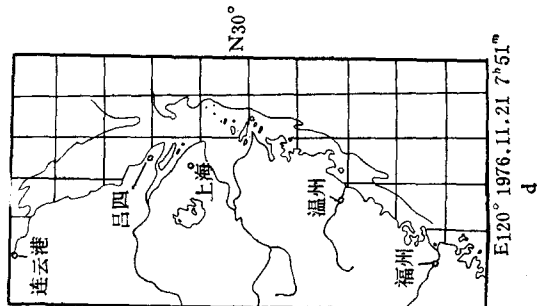
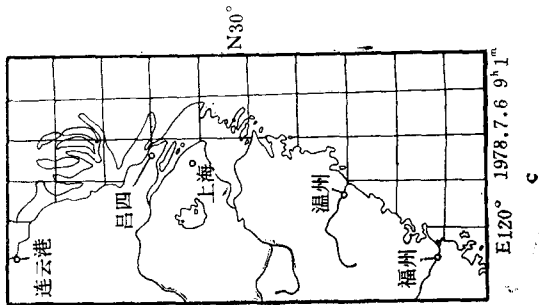
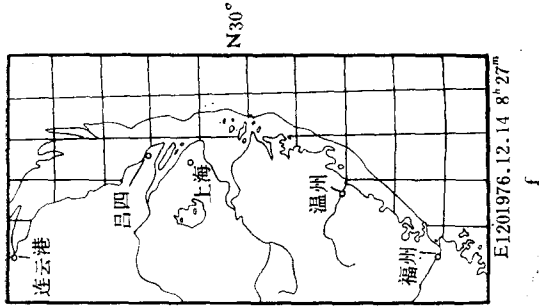
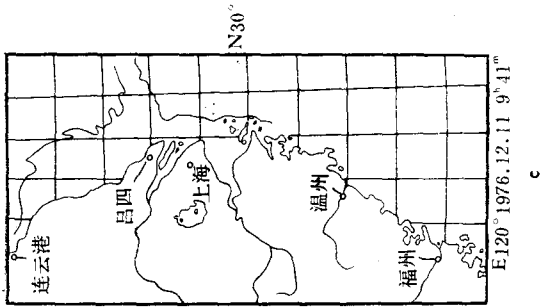
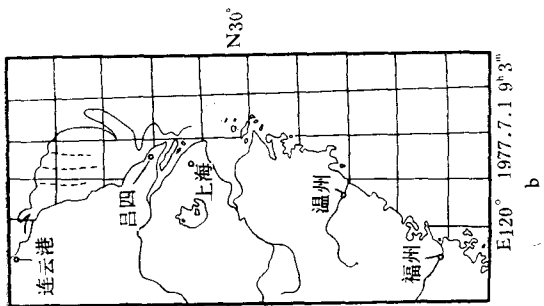
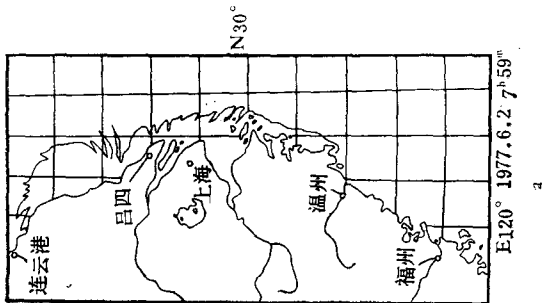
综上所述,三张不同时期成象的卫星象片影象给出了长江口入海悬浮泥沙扩散的基本方式。洪水期,入海迳流量增大,浑水线向外海扩展,边缘受由南而北的近海沿岸流侧向拖曳的影响,悬浮泥沙北去为主,一部分倒灌进入北支,一部分被带到苏北南部沿海;枯水期,长江入海迳流减弱,上游带来的泥沙随落潮流出口门,直接扩散南下。因此,长江入海泥沙的分配,除直接参与拦门沙和水下三角洲塑造外,南汇边滩及北支河槽成为主要淤积区,苏北南部沿海夏季受到长江输沙影响,冬春季节浙东沿海承受一部分长江来沙。

二、长江入海悬浮泥沙扩散影响的范围

浩瀚的长江将大量水沙输入东海以后,主要在外海水团牵动和浅海潮流搬运作用下,其扩散影响范围很广,一般航摄像片及陆地卫星象片已无法监测其动态变化。为此,我们选用覆盖面积大、成象重复性能高的 NOAA-5 气象卫星象片作为分析依据¹⁾。由于近岸带海况比较复杂,故将不同流量,不同潮型和不同风情条件下的悬浮泥沙扩散状况列表统计说明(表 4)。从表 4 中可以看出,1976 年冬季至 1978 年冬季十六张气象卫星象片中,苏浙沿海近岸部分都存在数十公里宽的浑水带,其宽度受长江入海迳流量,潮流变化及风向风速三个因素控制。其中风向风速的改变可以引起浑水带大幅度的变动。如图 3a—3c 成象时间均为洪水期大潮,流量及涨落潮流程都居首位。但因风情属于离岸的 SW 风,风速小,吹程短,生波条件差,悬浮泥沙不易掀动。反映在图象上的浑水带宽度就比较窄,就长江口海区来说,浑水扩散的外缘,在南汇咀附近离岸约 60 公里,相当于 122°30'E 位置;崇明以东及启东咀沿海分别为 50 公里 (122°25'E) 和 30 公里 (122°15'E)。如遇涨潮,浑水带被压缩成 15 公里宽的狭窄条带 (122°00'E 以内),这种状况实际上代表了风浪掀沙作用微弱的条件下洪季长江入海悬浮泥沙扩散的边界。图 3d—3p 十三张图象代表冬春季节不同潮情及风情下的流态。由表 4 可知,当西北风或东北风风速超过 7 米/秒时,浑水带的宽度剧增。若遇落枯潮情,浑水带宽度更大,如启东咀附近浑水扩散的外缘离岸可达 80 公里,南汇咀远达 95 公里,浙东沿海在 55—65 公里左右。由此可以证明,象片上所反映的浑水带,有一部分实际上是属于风浪掀动的影响,泥沙就地沉浮,其所占的宽度可达 20—30 公里,真正受长江入海泥沙扩散影响的范围分布在近岸 30—50 公里海区。长江入海泥沙扩散影响情况统计表还进一步告诉我们,浑水带除宽度上有变化外,纵向南北界线亦有季节性调整,夏季在东南季风作用下,长江入海泥沙可扩散至吕泗洋面,向南影响至温州瓯江口附近。冬春季节,偏北风盛行,长江入海泥沙顺岸南下,最远可及福建闽江河口,一般在敖江口与沙埕港之间移动。

悬浮泥沙是近岸水流运动良好的指示剂。无论是陆地卫星象片还是气象卫星象片都反映出苏北沿岸有着复杂的流系,就潮波传播系统而言,以东台县瓠港为中心,涨潮时,南北同时来潮向瓠港会合辐集,潮差沿程增大,至瓠港附近达最大值,能量集中;落潮时,水流由瓠港向南北扩散。就地形而言,吕四以北,射阳河以南,苏北中部海岸散布着滩槽相间的指状沙洲,其分布排列的方向与涨落潮流路一致,水流和地形相互作用反映在泥沙运动上就呈现出苏北海岸特有的扇状沉积羽流,由卫片影象量计得知,沉积羽流扩散的北界可达连云港海州湾,一般只及灌河口附近;沉积羽流的南界,因受长江冲淡水顶托,被限制在 32°00'N 附近。卫星象片上值得引起注意的影象是 32°00'—33°00'N 之间,有一股宽达 50 公里的向东扩散的浑浊流(图 3e)。它有可能是三种不同水体交会的标志,浑浊流的北侧为向南逐一扩散的黄海冷水团^[4],南侧似乎有一股恒定由南向北流动的沿岸流,近岸部分的长江冲淡水,在这股沿岸流牵动下,转折引向外海,由此说明长江入海悬浮泥沙扩散影响的北界不过吕四洋。黄海浑浊水体实际上是长江浑水系与苏北海岸浑水系共同

1) 参见上海中心气象台、南京气象台,1976—1978 年 NOAA-5 气象卫星云图资料。



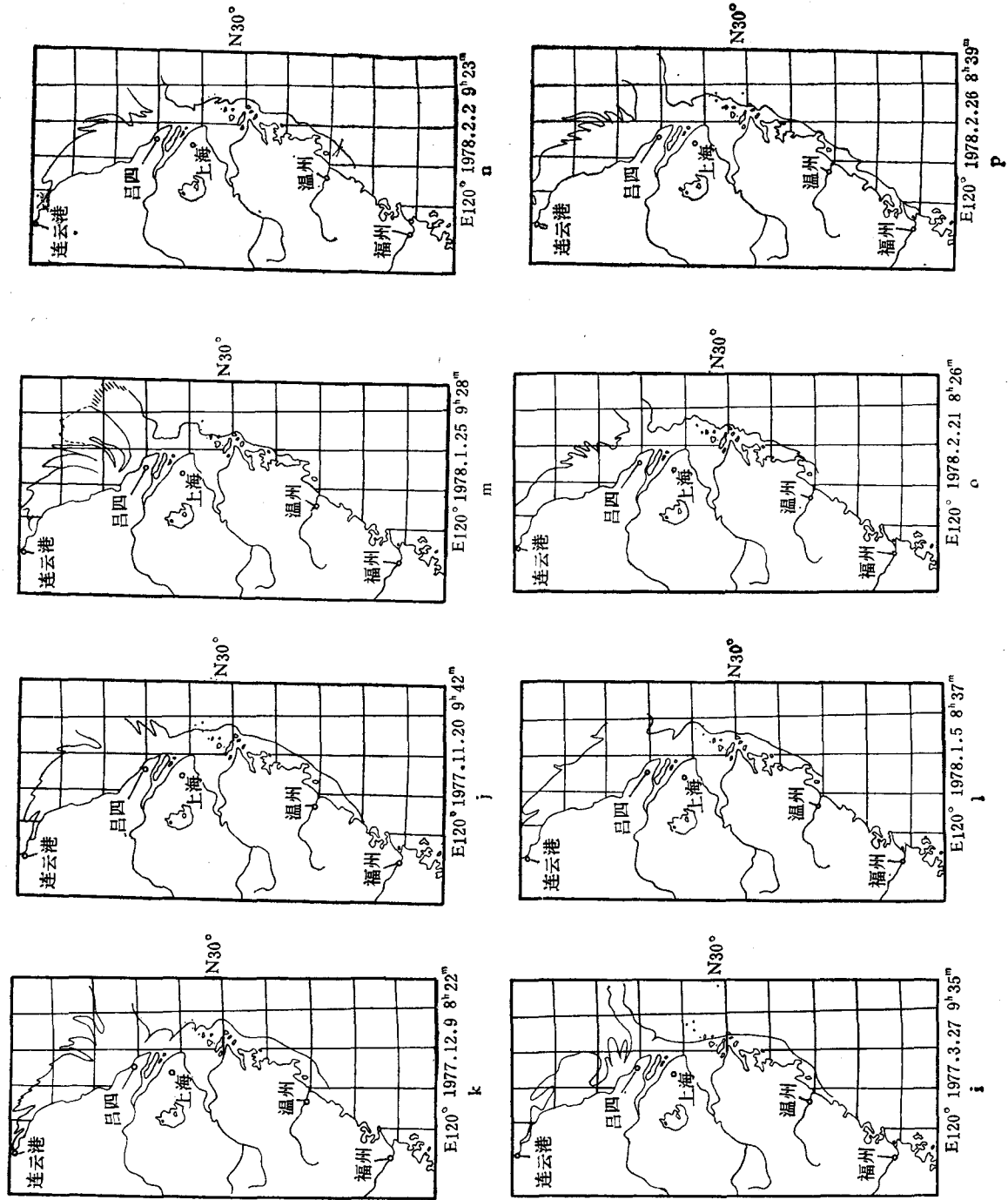


图 3 长江入海悬浮泥沙影响范围图(a-p)

单位: 公里

表 4 长江入海泥沙扩散影响情况统计

图 象 号	成 象 时 间	潮 型	潮 情	风 情		大通站月 平均流量 (秒公方)	浑 水 扩 散				响 范 围			扩 散 南 界	
				风 向	风 速 (米/秒)		启 东 咀	崇 明	南 汇 咀	象 山 咀	瓠 江 口				
1	1977.6.2 7:59 (农历4月16日)	大潮	落枯	W	5-8	51,900	30	122°15'E	45	122°20'E	60	122°30'E	40	122°30'E	瓠江口
2	1977.7.1 9:03 (农历5月15日)	大潮	涨满	SW	1-5	54,100	15	122°00'E	15	122°00'E					
3	1978.7.6 9:01 (农历6月2日)	大潮	中涨	SW	6.0	39,400	15	122°00'E	50	122°25'E	55	122°27'E	25	122°25'E	
4	1976.11.21 7:50 (农历10月初一)	大潮	落枯	NW	7-9	22,700	60	122°35'E	55	122°30'E	90	122°50'E	45	122°35'E	闽江口
5	1976.12.11 9:41 (农历11月21日)	寻常潮	落枯	NE	2	12,400	45	122°20'E	55	122°30'E	50	122°25'E	25	122°25'E	
6	1976.12.14 8:27 (农历11月24日)	寻常潮	中落	S	2	12,400	60	122°25'E	48	122°20'E	65	122°30'E	30	122°30'E	沙埭港
7	1977.2.23 9:46 (农历1月6日)	寻常潮	初涨	SSW	7	10,400	80	122°40'E	70	122°35'E	85	122°40'E	40	122°32'E	闽江口
8	1977.3.9 8:13 (农历1月20日)	大潮	初涨	NNE	11-13	10,100	70	122°38'E	80	122°37'E	88	122°40'E	45	122°35'E	歙江口
9	1977.3.27 9:35 (农历2月8日)	寻常潮	落枯	NE	3-7	10,100	60	122°35'E	40	122°15'E	35	122°17'E	25	122°20'E	歙江口
10	1977.11.20 9:42 (农历10月10日)	寻常潮	涨满	SW	7	21,100	80	122°40'E	60	122°30'E	80	122°35'E	50	122°38'E	歙江口
11	1977.12.9 8:22 (农历10月29日)	寻常潮	涨满	SSW	1	11,500	50	122°25'E	72	122°35'E	80	122°35'E	40	122°32'E	闽江口
12	1978.1.5 9:28 (农历11月26日)	小潮	涨满	WNW	6.5	11,200	75	122°40'E	85	122°40'E	95	122°55'E	40	122°32'E	歙江口
13	1978.1.25 9:28 (农历12月17日)	大潮	初涨	NE	2.6	11,200	40	122°15'E	40	122°15'E	75	122°38'E	20	122°18'E	
14	1978.2.2 9:23 (农历12月25日)	小潮	中落	NW	5.0	10,000	80	122°40'E	60	122°30'E	70	122°35'E	50	122°38'E	歙江口
15	1978.2.21 8:26 (农历1月十五)	大潮	初涨	NNW	3.5	10,000	50	122°25'E	50	122°25'E	85	122°40'E	35	122°27'E	歙江口
16	1978.2.26 8:39 (农历1月20日)	大潮	初涨	NNE	1.0	10,000	80	122°40'E	70	122°35'E	90	122°50'E	35	122°27'E	闽江口

组合而成。从含沙量分布分析,黄海浑浊水近岸部分浓度较高,其分布范围在吕四至废黄河口为 $121^{\circ}00'$ — $122^{\circ}00'E$ 之间,废黄河口以北则在 $121^{\circ}00'E$ 经线以西,至连云港附近仅存 20 公里左右的狭长条带。

此外,风海流对表层悬浮泥沙扩散方向也有很大影响,如 1979 年 10 月陆地卫星拍摄的一张长江口幅象片,当时正值小潮落潮时刻,潮流流速较小,由 4 级偏南风吹拂形成的风海流可以使长江口表层悬浮泥沙整体向东北方向漂移(图 4),图中还反映出北港仍然

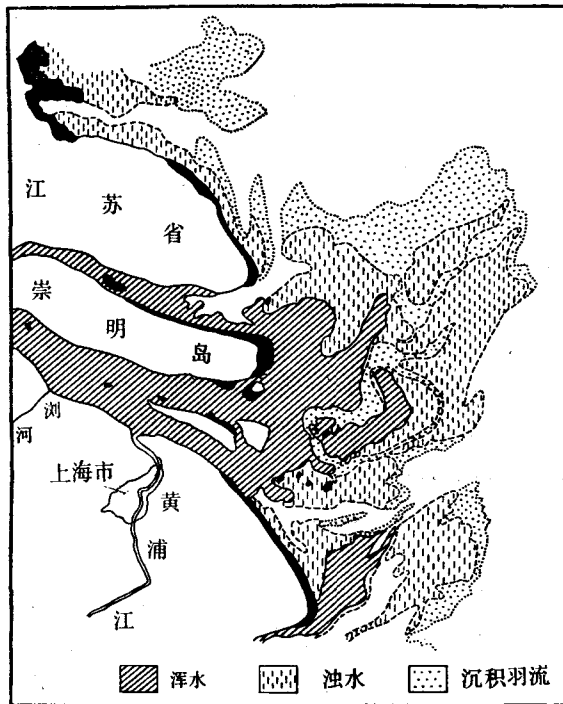


图 4 风海流对表层悬浮泥沙运动的影响

是长江入海迳流分配的主汊,泥沙行至口门佘山附近海域,由于受小尺度涡旋的影响,悬浮泥沙扩散范围增大。由此可以说明,利用卫星遥感资料还可以协助查明近岸带风海流和各种小尺度涡旋的流态。

三、几点认识

陆地卫星和气象卫星象片为海洋科学研究提供了大量有用的信息,仅从近海表层悬浮泥沙的空间分布及动态一项资料,就可以初步阐明一般常规海洋调查中难以确定的问题。这些问题是:

1. 1978 年 8 月 9 日长江口卫星象片上所反映的浑水舌形态,说明了上游来水来沙在口门附近常以轴流形式输送入海。流轴线的位置与北港、北槽、南槽主槽深泓线吻合,流幅宽度一般为 5—8 公里左右,其两侧边界大致与 -5 米等深线相当。这就进一步证实了长江口口门附近大片浅水区域纯属潮滩性质,在正常年份基本上不起排洪泄沙作用。因此,在确定长江口入海航道整治方案时,采用围滩造田,束水攻沙建造人工岛等工程措施

似乎是可行的。

2. 多波段卫星象片第5波段及第6波段影象上所显示的多级灰阶表征了水体中悬浮泥沙的不同含量。无疑,长江口海区承受长江流域来沙首当其冲,含沙量一般较高,苏北沿海及杭州湾是其扩散影响所及的范围,含沙量相应较低,如图象中吕四附近海区水体的灰阶要比长江口门附近低两级,明显反映出长江入海悬浮泥沙影响了南北两侧海域。多年来,一些学者曾经多次提出苏北沿岸泥沙影响长江口淤积的论断,看来卫星象片上直观的悬浮泥沙分布影象特征表明了主要是长江本身的泥沙导致了口门航道的淤积。

3. 多次重复摄影的气象卫星象片为我们判定长江入海泥沙扩散影响的范围提供了一定的依据。卫星资料说明,长江入海泥沙影响的北界在苏北吕四—遥望港之间,扩散的南界达浙闽沿岸,这为浙闽沿海港湾淤泥质海岸的发育提供了源源不断的物质来源。

4. 长江冲淡水影响的范围极广,它影响着我国东、黄海近岸部分水体的温、盐、密、水色、透明度、营养盐类等海洋要素的分布。河口迳流带来了丰富的生物营养盐类,为浮游生物大量繁殖提供了有利条件,混合海水区对鱼类来说具有适宜的生殖生活条件。苏北吕泗渔场之所以成为小黄鱼的主要产卵场及回游活动区,这与低盐浑浊的长江冲淡水和高温、高盐、透明度大的黑潮分支¹⁾交换混合有直接关系,卫星象片上所指示的混合海水区范围大致在 $31^{\circ}30'N-33^{\circ}00'N$, $122^{\circ}00'E-125^{\circ}00'E$ 以内。由此可以推断,通过遥感技术探测近海表层水系混合水区的变化,可及时提供重要的渔业情报。

5. 本世纪五十年代以来,中、日、美、苏等国的海洋学者曾对影响我国东、黄海流系的黑潮进行了系统调查和分析,其中对黑潮的水文特征及海流结构研究得比较详细,有关黑潮的运行途径及变动规律亦有专题注述^[4],但都侧重阐述 $126^{\circ}E$ 以东(陆棚前缘)黑潮流轴部分。对于黑潮分支对我国近岸流系影响程度的探讨,因资料不足而尚未深入。我们从卫星象片表征的信息证明由南向北流动的沿岸流可能是黑潮分支的一部分,它可以牵动长江冲淡水,甚至将口门扩散的悬浮泥沙带至黄海南部后经 $32^{\circ}00'N$ 纬线附近的海区送至外海。从现有卫片资料分析,这股沿岸流在1976年至1978年期间,冬春季节北上的流势相当强劲,而夏秋季节的影响反而较弱。这一现象为我们进一步探讨黑潮运动规律和东海、黄海我国近岸流系的分布提供了新的线索。

参 考 文 献

- [1] 毛汉礼、甘子钧、蓝淑芳,1963年。长江冲淡水及其混合问题的初步探讨。海洋与湖沼 5(3): 183—206。
- [2] 陈吉余,1957年。长江三角洲江口段地形发育。地理学报 23(3): 241—253。
- [3] 范时清、秦蕴珊,1959年。中国东海和黄海南部底质初步研究。海洋与湖沼 2(2): 82—84。
- [4] 管秉贤,1964年。黑潮流速流量的分布变化及其与地形的关系初步分析。海洋与湖沼 6(3): 229—251。
- [5] William Thomson, 1976. Sediment Measurement in Estuaries and Coastal Areas: Section IV, Indirect Measurement of Sediment. NASA CR-2769.

1) 据气象卫星 NOAA-5, 1977年12月9日和1978年3月29日红外图象分析,以及地面水温等温线的分布验证,可以认为在此时期黑潮分支从台湾岛两侧进入东海,它直接影响长江口佘山附近 ($31^{\circ}14'N$) 及吕四外海 ($32^{\circ}00'N$)。

**AN ANALYSIS OF THE DIFFUSION OF SUSPENDED SEDIMENT
DISCHARGED FROM THE CHANGJIANG RIVER
BASED ON THE SATELLITE IMAGES**

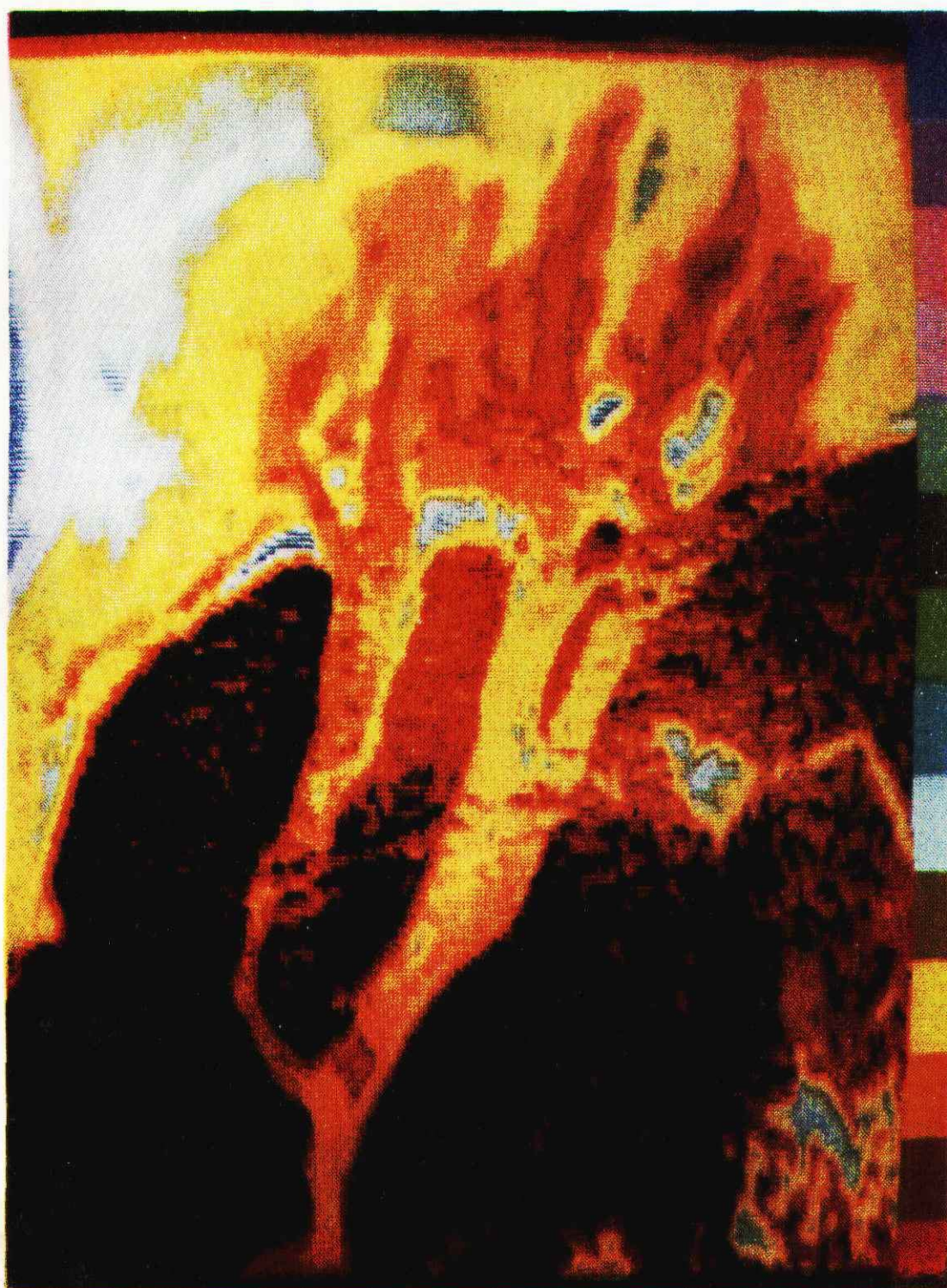
Yun Caixing Cai Mengyi and
(*East China Normal University*)

Wang Baoquan
(*Shanghai Waterway Bureau*)

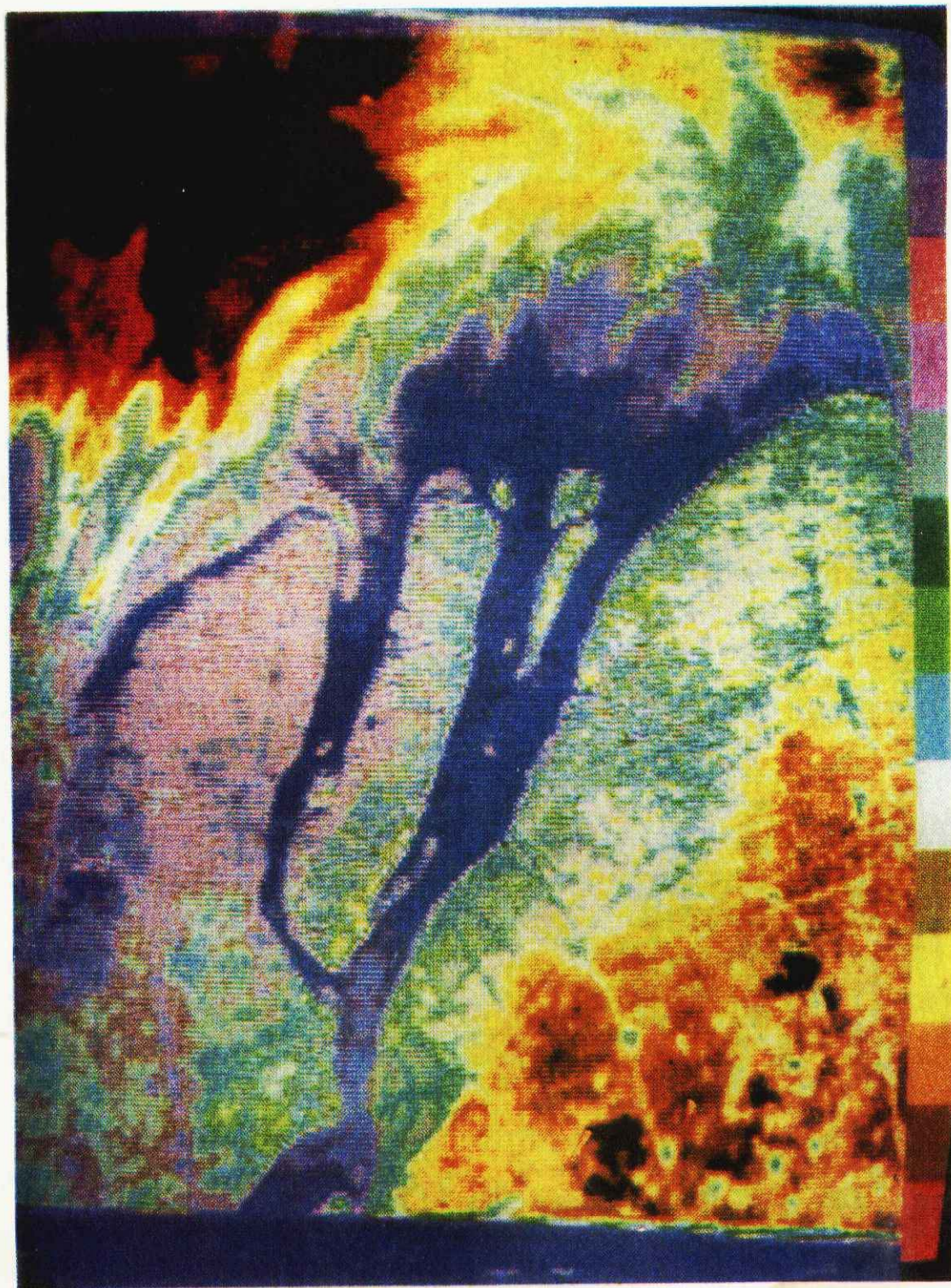
ABSTRACT

The suspended sediment discharged by the Changjiang River into the sea not only causes direct siltation in the estuarine region, but also affects the nearby continental shelf. This paper proposes to analyse the diffusion of this suspended sediment based on the satellite images. Recent data from Landsat Images reflect that the amount of discharge from the North Channel is greater than that from the North Passage, while the latter is greater than the South Passage. On its way into the sea, the suspended load forms a distinctly step by step diffusion and deposition. The sedimentation may be divided into four stages: muddy stretch, turbid flow, plumes and freshening stream. Owing to the effect of drift and ocean wind current, the direction of diffusion is north-eastward in high flood season and south-eastward in low flood season.

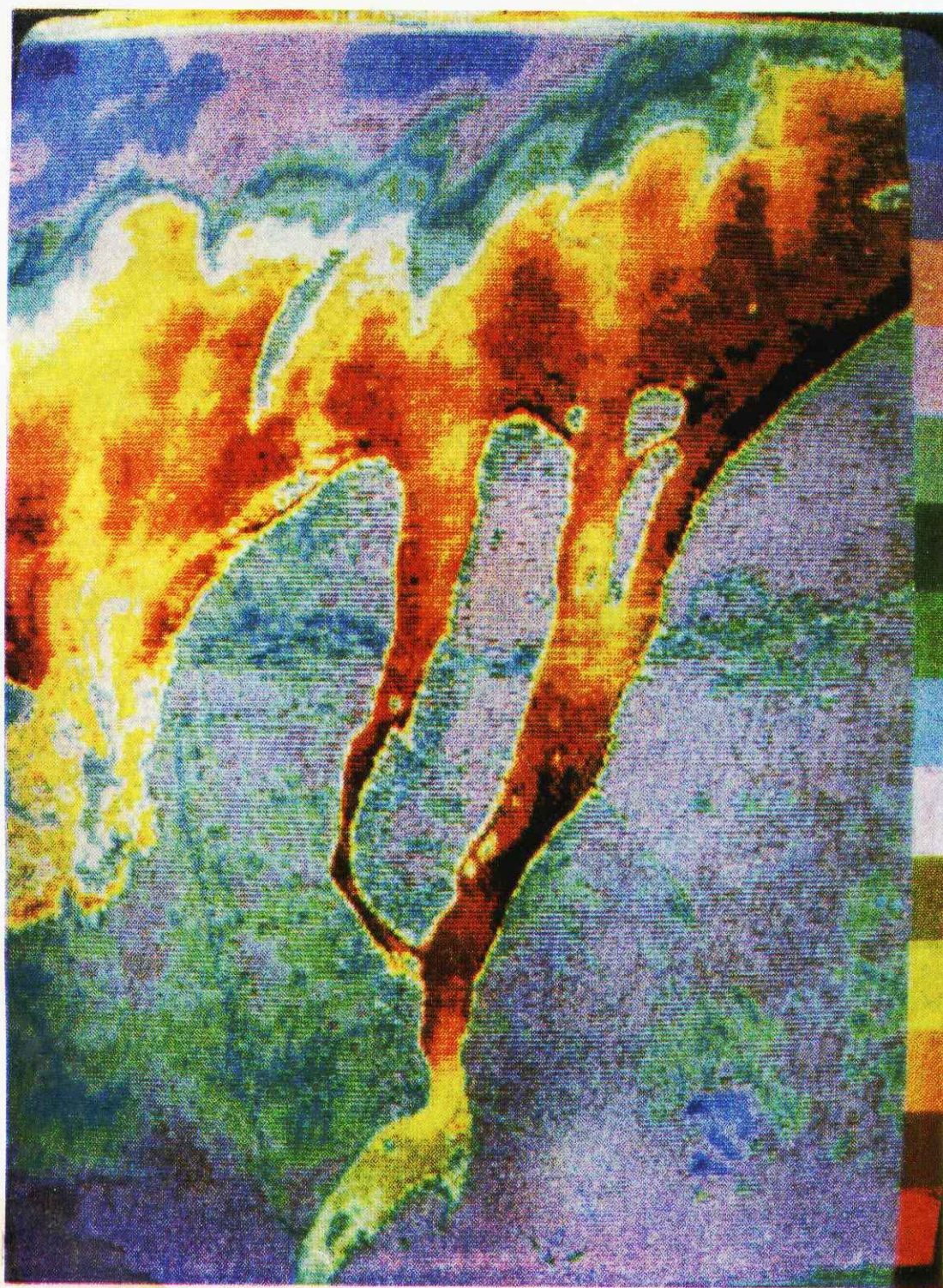
Meteorological satellite images displayed turbid flow section of about a few tenth of kilometer in width off the coast of Jiangsu and Zhejiang provinces. The diffusion of suspended sediment from Changjiang River can extend from Lusi Sea area to Zhejiang and Fujian Provinces in the south. Particular attention must be called to the fact that there exists a stable turbid current of a width of 50 kilometers between $32^{\circ}00'$ — $33^{\circ}00'$ N. It was formed by the concurrence of Huanghai Sea cold mass, Kuroshio tributary and Changjiang freshening stream.



1978年8月9日，MSS-5卫星象片



1978年7月4日，MSS-5卫星象片



1976年11月21日，MSS-5卫星象片