

# 湾流北侧切变波卫星观测与 发生机理研究

郑全安

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

N. E. Huang V. Klemas

(美国特拉华大学)

## 提 要

本文利用卫星红外资料分析了哈特勒斯角东北沿湾流北侧的切变波运动特征。观测到的波动平均波长为75km, 平均波幅(波峰至波谷)为17km, 平均周期为27h。观测表明, 切变波以100cm/s的平均速度向东传播。一次切变波发生事件持续时间为一周。对1977年至1982年切变波发生频率的统计分析表明, 发生频率与湾流不稳定性密切相关。文中对1982年春季发生的一次切变波事件的兴衰过程与NOAA浮标同步测得的风应力资料进行了相关分析, 据此提出了大气作用是切变波激发机制的观点。

无论在气象卫星红外谱段照片中(见图版I), 还是在海洋卫星(Seasat)合成孔径雷达(SAR)照片中<sup>[1]</sup>, 都可发现, 沿着湾流北侧与陆坡水之间的锋面, 常常会出现波长为100km量级的低频波动。这种波动的幅度不大, 对湾流的主流轴方向不构成影响, 因此与湾流的弯曲不同。这种波动发生在切变界面上, 所以被称为切变波。1981年Mollo-Christensen等人首先从NOAA-6卫星拍摄的一张哈特勒斯角以东湾流的红外照片中, 发现了这种波动的影像, 并对其机理进行了推测<sup>[2]</sup>。

由于缺乏空间和时间连续的现场直接测量资料, 卫星遥感看来是目前研究切变波的唯一可行途径。作者利用NOAA卫星的热红外照片时间系列, 测定了湾流北侧哈特勒斯角以东切变波的波长、波幅和相速度, 对切变波发生频率进行了统计分析, 并对1982年3、4月间发生的一次切变波事件的整个兴衰过程与NOAA自动浮标同步测得的风应力资料进行了相关分析; 对发生机理进行了讨论。

本文的研究海域为 $35^{\circ}$ — $38^{\circ}$ N,  $70^{\circ}$ — $75^{\circ}$ W。在此海域内湾流自哈特勒斯角附近向右转, 并与陆坡水相切东去。

## 一、资料和方法

本研究的主要资料是上述海区的热红外卫星照片。这些卫片是由装载在TIROS-N

和 NOAA 系列气象卫星上的甚高分辨力辐射计 (VHRR) 和高级甚高分辨力辐射计 (AVHRR) 拍摄的。这两种传感器性能相近,空间分辨力相同(所有谱段的天底点分辨力约为 1km)。两者主要差别是: VHRR 的热红外谱段的波谱范围为 10.5—12.5 $\mu\text{m}$ , 而 AVHRR 为 10.5—11.5  $\mu\text{m}$ (NOAA-7 为 10.3—11.3 $\mu\text{m}$ )。图版 I 示出 AVHRR 热红外照片的一个典型例子(NOAA-7 卫星于 1982 年 11 月 11 日拍摄,轨道号 7148)。照片中湾流边界及其北侧的小尺度波动影像都十分清晰。可以看出,这种波动具有由不稳定性引起的切变波的典型特征,包括破碎的形式在内。

我们对 1980 年 10 月、1982 年 3 月和 11 月发生的三次切变波事件进行了仔细测量,所采用的卫片轨道号和时间列于表 1。文中为讨论方便有时仅采用时间或轨道号来表示某张卫片。由于原始卫片带有几何失真,所以需经光学纠正后再进行测量,以便尽可能减

表 1 用于定量测量的卫片

轨道	6993 N6	7000 N6	3908 N7	3915 N7	3929 N7	3936 N7
时间	80,10,31 12:32:01	80,10,31 23:51:31	82,3,27 07:56:05	82,3,28 19:22:01	82,3,28 19:09:01	82,3,29 07:32:01
轨道	3943 N7	3950 N7	3985 N7	14363 N6	7141 N7	7148 N7
时间	82,3,29 18:56:41	82,3,30 07:20:16	82,4,1 18:23:41	82,4,2 12:45:46	82,11,11 07:41:01	82,11,11 <sup>1</sup> 19:05:21

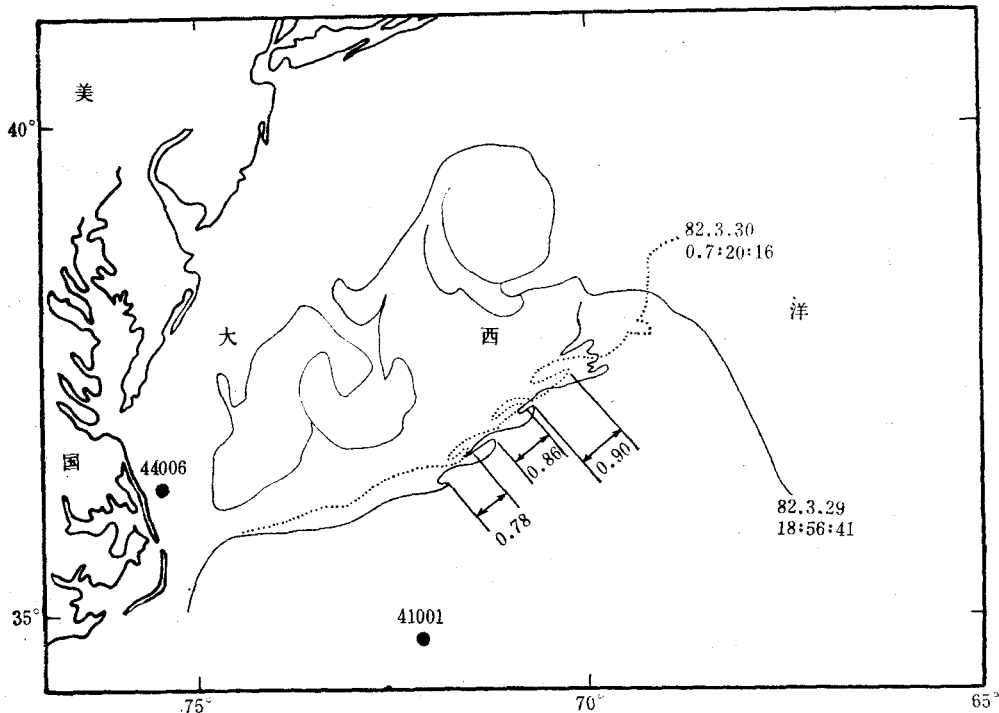


图 1 说明切变波演进的一个典型例子

切变波热红外边界是用透明图从两张纠正过的卫片上描绘下来的。卫片的轨道号为 3943N7 (实线, 1982 年 3 月 29 日 18 时 56 分 41 秒拍摄) 和 3950 N7 (虚线, 1982 年 3 月 30 日 7 时 20 分 16 秒)。波的位移以现象的特征长度  $L (=100\text{km})$  为单位测得。

小误差。表征切变波的各种长度可直接测量或者用两张透明图互相重叠来测量。图 1 为利用时间间隔 12h 的两张卫片测量切变波相速度的一个例子。图中表示各波谷位移的数字以现象的特征长度  $L(=100\text{km})$  为单位。估计波长测量结果的不确定性约为 10km (或 10%), 波幅为 5km (或 20%), 相速度测量相对误差在 20% 以内。

除红外卫片之外, NOAA 浮标同步气象观测资料被用于探讨切变波的发生与大气作用之间的关系。浮标站的位置分别为  $34^{\circ}41'59''\text{N}$ ,  $72^{\circ}18'00''\text{W}$  (41001 站) 和  $36^{\circ}18'00''\text{N}$ ,  $75^{\circ}23'59''\text{W}$  (44006 站), 已在图 2 中标出。两站皆靠近切变波发生海域。

我们采用 Garratt<sup>[2]</sup> 的经验公式, 由测得的风速来计算海面的风应力, 即

$$T = \rho C_{10} W_{10}^2$$

式中  $T$  为风应力 ( $\text{dyn}/\text{cm}^2$ );  $\rho$  为空气密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $W_{10}$  为浮标测得的 10m 高的风速 ( $\text{cm}/\text{s}$ );  $C_{10}$  为 10m 高风速的无量纲曳力系数, 用下面的经验公式来计算:

$$C_{10} = (0.75 + 0.067W_{10}) \times 10^{-3}$$

式中  $W_{10}$  以  $\text{m}/\text{s}$  为单位。

## 二、测量结果

### 1. 波长、波幅和无量纲能量

经过光学纠正后, 首先直接从卫片上测得了切变波的波长和水平幅度。每次事件的测量结果都有差异。所有波长测量值的总平均为 75km, 其中 1980 年 10 月 30 日事件的波长为 128km; 1982 年 3 月 27 日至 4 月 2 日波长平均值和标准偏差为  $67 \pm 19\text{km}$ ; 1982 年 11 月 11 日为  $100 \pm 27\text{km}$ 。波幅的总平均值为 17km, 其中 1980 年 10 月 30 日为 35 km; 1982 年 3 月 27 日至 4 月 2 日为  $14 \pm 8\text{km}$ ; 1982 年 11 月 11 日为  $28 \pm 6\text{km}$ 。

描述切变波的兴衰过程, 有代表性的方法是计算半周期的无量纲能量变化。作为一级近似, 忽略波的破碎, 并且假设切变波为正弦形, 那末, 与地球物理流体力学中的罗斯贝波相似<sup>[4]</sup>, 切变波的半周期无量纲能量可用下式计算:

$$E = (K^2 + F) \frac{A^2}{4}, \quad (1)$$

式中  $E$  为半周期无量纲能量;  $K$  为无量纲波数;  $A$  为无量纲波幅, 参数  $F$  定义如下:

$$F = \frac{f^2 L^2}{gD} \quad (2)$$

式中  $f$  为科氏参数;  $L$  为现象的特征尺度;  $g$  为重力加速度;  $D$  为水深。对于本研究的情况,  $F/K^2 \ll 1$ , 因此(1)式简化为:

$$E = \frac{K^2 A^2}{4}. \quad (3)$$

(3)式可改写为如下形式:

$$E = \frac{\pi^2}{4} \left( \frac{H}{\lambda} \right)^2, \quad (4)$$

式中  $H$  和  $\lambda$  分别为有量纲波幅和波长。因此, 测得了  $H$  和  $\lambda$ , 就可计算出  $E$ 。

将 1982 年 3 月 27 日至 4 月 2 日切变波事件的波长和波幅测量结果以及无量纲能量

的计算结果列入表 2。可以看出,三个波参数都不是固定不变的,而是随着时间变化。从能量的角度看,每个波都经历了一个产生、成长、破碎、衰弱和消失的过程,持续约一周。因此切变波是一种不稳定过程。

表 2 切变波波长、波幅和无量纲能量测算结果

(1983 年 3 月 27 日至 4 月 2 日)

时 间	参 数	波 的 序 号		
		1	2	3
82,3,27 07:56:05	波长 $\lambda$ (km)	0	0	0
	波幅 $H$ (km)	0	0	0
	无量纲能量 $E \times 10^{-2}$	0	0	0
82,3,27 19:22:01	$\lambda$ (km)	35	56	—
	$H$ (km)	3	8	—
	$E \times 10^{-2}$	1.8	5.0	—
82,3,28 19:09:01	$\lambda$ (km)	44	67	58
	$H$ (km)	6	11	6
	$E \times 10^{-2}$	3.9	6.8	2.7
82,3,29 07:32:01	$\lambda$ (km)	44	72	100
	$H$ (km)	7	21	22
	$E \times 10^{-2}$	6.5	20.0	12.0
82,3,29 18:56:41	$\lambda$ (km)	61	72	106
	$H$ (km)	22	25	25
	$E \times 10^{-2}$	32.5	29.6	13.8
82,3,30 07:20:16	$\lambda$ (km)	61	72	83
	$H$ (km)	17	16	28
	$E \times 10^{-2}$	18.4	11.5	27.5
82,4,1 18:23:41	$\lambda$ (km)	61	65	82
	$H$ (km)	6	8	8
	$E \times 10^{-2}$	2.6	3.7	2.2
82,4,2 12:45:46	$\lambda$ (km)	0	0	0
	$H$ (km)	0	0	0
	$E \times 10^{-2}$	0	0	0

## 2. 相速度和周期

利用上述透明图方法,测出时间接续的两张卫片上切变波的位移,就可求出相速度。而切变波的周期,可以根据波动的普遍公式  $T = \lambda / C$ , 由已知的波长和相速度来计算。对前述三次切变波发生事件的测量和计算结果列入表 3。相速度的平均值和标准偏差为  $100 \pm 26 \text{ cm/s}$ , 周期为  $27 \pm 10 \text{ h}$ 。

通常认为,切变波以两侧水体的平均流动速度传播。我们所研究的切变波,北侧陆坡水向西流动的速度比南侧湾流向东流动的速度要小得多,因此可以忽略不计,这样,切变波速度应为湾流速度的  $1/2$ , 即湾流的速度应为同时、同地的切变波相速度的两倍。用这

种方法导出的湾流平均速度为 200cm/s (4 节), 这与以往的实测结果很吻合。这也是对本文方法和结果的很好验证。

表 3 切变波相速度和周期测量结果

时 间	1980,10,30	1982,3,28-30					1982,11,11			均值	方差
波长 (km)	128	61	72	83	72	72	68	114	117		
波幅 (km)	35	17	16	28	21	25	22	28	33		
相速度 (cm/s)	96	97	107	112	90	96	41	122	136	100	26
周期 (h)	37	18	19	21	22	21	47	26	24	27	10

### 3. 发生频率统计

由于切变波是一种短暂现象, 每次事件仅持续数日, 因此找出其发生频率很有意义。为此, 我们查阅了 1977 年至 1982 年 11 月大约 4000 张卫片。其中, 870 张为研究海域无云或部分无云, 内有 57 张卫片记录着切变波存在。发生百分比为 6.6%, 统计结果列入表 4。

表 4 无云(或部分无云)卫片与切变波存在卫片的逐月分布

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	总计
1977	CF*			5	6	1	8	2	2	2	1	3	6	36
	SW*			1								1	3	5
1978	CF	1			19	10	20	17	1	7	7	2	8	92
	SW				2	1	2			1	1		1	8
1979	CF	3	4	11	9	2	11	5	2	6	19	7	14	93
	SW			3	2	1	3	1					2	12
1980	CF	4	4	15	13	13	9	23	18	12	35	19	15	180
	SW	1	1	2							4			8
1981	CF	9	14	19	26	30	23	24	25	49	20	26	11	276
	SW									1	1	3		5
1982	CF	14	14	25	41	27	14	10	11	8	12	17		193
	SW			5	4							10		19
总 计	CF	31	36	75	114	83	85	81	59	84	94	74	54	870
	SW	1	1	11	8	2	5	1	0	2	6	14	6	57
发生频率 (%)		3.2	2.8	14.7	7.0	2.4	5.9	1.2	0.0	2.4	6.4	18.9	11.1	6.6

\* CF 代表研究海区无云或部分无云卫片数; SW 代表发现切变波卫片数。

从表 4 可以看到, 可供利用的卫片逐月分布是不均匀的, 冬季的一、二月份无云卫片的总数最低。假设切变波在有云和无云天气发生概率是相等的, 那末就可以用逐月的无云卫片总数去除出现切变波的卫片数, 得出该月的发生频率。对这一假设有可能提出两点质疑, 第一是对某一给定月份, 无云卫片总数有可能太少, 而不足以得出具有统计意义的结果; 第二是云盖有可能与产生或激发切变波的特殊气象过程有关, 而云盖又将切变波掩盖起来, 在红外卫片上无法看到。对于第一点, 即使是无云卫片数量最少的一月份也收集到了 31 张 (其中仅观察到一次切变波事件), 这一数目可以给出具有统计意义的结果。至于第二点, 由于红外遥感不具备穿云破雾能力, 单靠红外资料, 不能绝对肯定地得到解

决。正如后边要讨论的,切变波的产生与局地风情有密切关系,特别是北风。而北风的发生通常与冷锋面的突破相联系,同时这也是一种生云过程。因而,不能完全排除冬季一、二月份由云盖可能引起的统计偏差。

### 三、发生机理初探

Mollo-Christensen 等人曾提出,发生在哈特勒斯角以东湾流北侧的切变波是由  $M_2$  潮周期性激发引起的,因而其周期应为 12.4h<sup>[3]</sup>。他们仅根据一张卫片提出了这种推测,没有进行仔细的测量和时间系列分析。对多年、多张卫片的测量结果(见表 3)表明,切变波的周期不是常数,其总平均值为  $27 \pm 10$ h, 远大于  $M_2$  潮的周期。

对切变波逐月发生频率的统计结果表明(如表 4 所列),切变波的发生是有季节性的,这就进一步否定了  $M_2$  潮是激发源的观点。逐月发生频率曲线如图 3b 所示,这是一个明显的双峰分布。两个峰出现在 3 月和 11 月,而极小值出现在 8 月。有趣的是,这一分布与湾流位置的平均位移曲线<sup>[5]</sup>(见图 2a) 明显相似。湾流的绝对位移大时,切变波发生频率也高。这种相关性是因为,切变波是由斜压不稳定引起的,而斜压不稳定则与湾流的切变流相联系。但是,应该指出,切变流仅仅是必要条件而不是充分条件。首先,不稳定应该与

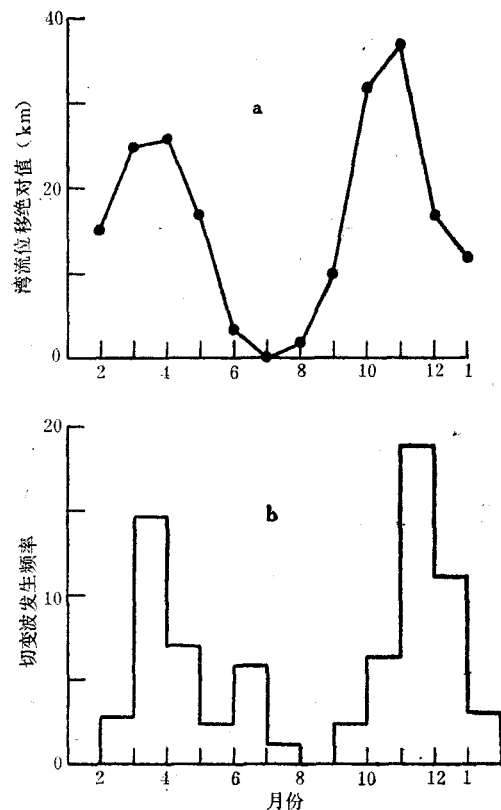


图 2 切变波事件逐月发生频率与湾流离开历史平均位置的绝对位移之间的比较

湾流资料来源于 Worthington<sup>[7]</sup>, 切变波发生频率是用该月无云或部分无云的卫片总数为基数计算的。两种现象明显相关的双峰分布反映了两种过程的季节变化。

切变强度有关,因此,当流速最大时不稳定最可能发生。根据历史资料,最大流速仅出现在湾流处在最南位置时,这样,切变波发生频率曲线应是单峰的。而实际上却是双峰的。这就需要进一步分析和解释。测量结果已经排除了潮汐激发说,所以必须寻求其它可能的激发机理。除海洋本身的运动之外,大气作用是明显的激发因子。为了检验这一激发因子,我们收集了 NOAA 浮标 1982 年 3、4 月的气象观测资料。根据浮标测得的风速和风向计算出的风应力与 1982 年 3 月底、4 月初发生的切变波事件的无量纲能量随时间变化同时绘于图 3。可以看到,3 月 27 日至 29 日,两个浮标站仅出现一次明显的强北风过程。切变波则跟随在强北风过程之后产生,其能量逐渐成长直至最大,而后当风向逐渐转南,波能量则逐渐衰减。虽然我们没有足够的同步资料对更多的切变波事件与气象过程的相关性进行仔细验证,但是,每张卫片中与切变波并存的云形,都显示出在切变波现象成长阶段之前,海区为强北风。当北风停息后(这也可由云形显示出来),切变波会很快衰减、消失。

上述事实表明,风可能是切变波的激发机制。因为北风能引起西向的 Ekman 传输,

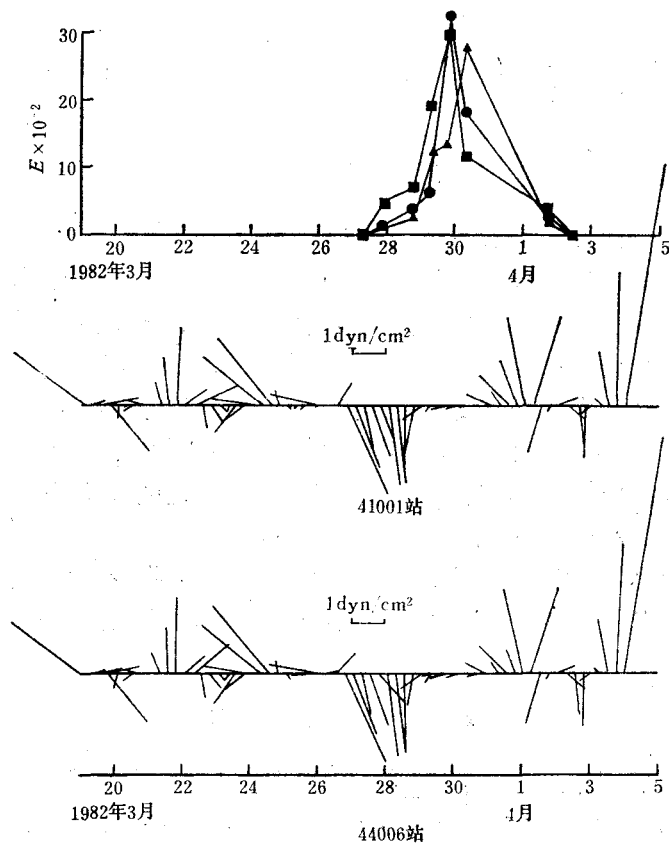


图 3 切变波无量纲能量密度的消长过程与浮标风应力的对照  
浮标号为 41001( $34^{\circ}41'59''\text{N}$ ,  $72^{\circ}18'00''\text{W}$ )和 44006( $36^{\circ}18'00''\text{N}$ ,  $75^{\circ}23'59''\text{W}$ )。除 3 月 27 至 29 日明显的强北风过程外,整个期间的风应力强度和方向都是多变的。无量纲能量密度随着单向北风型的建立开始成长,风转向后开始衰减。这一现象反映出大气作用力在激发不稳定方面可能起着决定性作用。

与局地湾流反向流动,从而增强了相对切变效应。如果北风变成一种稳定的和盛行的大气作用力,这会造成一种均匀的表层漂流,上述的“增强效应”将会降低。另一方面,风向的变化可能加大切变不稳定。按照这一假设,可以解释已经观测到的切变波事件的其它动态特点:在研究海区,间歇的短期持续北风与多变风情仅发生在春、秋两季。因而,切变波的发生应是双峰的;由于一个天气循环通常为5至7天,所以一次切变波事件的兴衰过程也恰为一周左右。

除红外卫片外,我们还查阅了由Fu等人<sup>[1]</sup>编辑的海洋卫星1号的合成孔径雷达资料。在三幅覆盖哈特勒斯角海域的图像中,都显示出了切变波。在这些合成孔径雷达图像上测得的波长和波幅与利用红外卫片测得的结果十分吻合。

我们还发现沿着湾流弯曲夹带的狭长冷水楔和黑潮北侧都存在性质相似的切变波。某些切变波事件发生在远离沿岸水的海域,那里潮汐振荡和反射的影响都可以忽略。我们研究的某些切变波事件的位置通常比Mollo-Christensen等人报道的实例稍偏东,但是,这些波并不是在沿岸或陆架区产生,然后顺流传播至研究海域。切变波事件的时间过程清楚地显示出,它们的发生是局地不稳定所致,基本上在局地产生、成长、衰减和消失,水平传播距离并不大。

因此,根据上述分析,我们认为大气作用是切变波的激发机制,而强的切变流则是发生这种现象的必要条件。

#### 四、结 论

根据本文的研究结果,可以得出如下结论:

1. 卫星遥感时间系列(或称多时相)资料可以成功地用于大范围海洋现象的动态观测与研究,对原始资料进行必要的筛选和处理,可以从中提取海洋现象的定量测量结果。
2. 对湾流北侧切变波的观测结果表明,其周期为 $27 \pm 10$ h,而且不是一种定常现象,其发生有一定季节性。每次切变波事件持续一周左右。这些事实证明Mollo-Christensen等人提出的, $M_2$ 潮是切变波激发机制的推测是不正确的。
3. 切变波的发生依赖于湾流的运动,利用切变波的相速度可以测出湾流的局地流速,测量结果与现场实测数据很吻合。
4. 根据目前可利用的资料(卫片、浮标资料等)和本文的初步分析,只能认为大气作用是切变波的激发机制。当然这一观点还有待于进一步的现场实测资料和理论模拟来证实。

#### 参 考 文 献

- [1] Fu, L-L. and B. Holt, 1982. Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar. Jet Propulsion Lab. Pub. pp. 81—120.
- [2] Garratt, Q. J. R., 1977. Review of drag coefficient over oceans and continents, *Monthly Weather Review* 105: 915—929.
- [3] Mollo-Christensen, E., P. Cornillon and A. D. S. Mascarenhas, Jr., 1981. Method for estimation of ocean current velocity from satellite images. *Science* 212: 661—662.
- [4] Pedlosky, J., 1979. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York. pp. 121—122.
- [5] Worthington, L. V., 1976. On the North Atlantic Circulation. The Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore p. 104.



## SATELLITE OBSERVATIONS AND STUDY ON OCCURRENCE MECHANISM OF THE SHEAR WAVES ALONG THE GULF STREAM NORTH WALL

Zheng Quanan

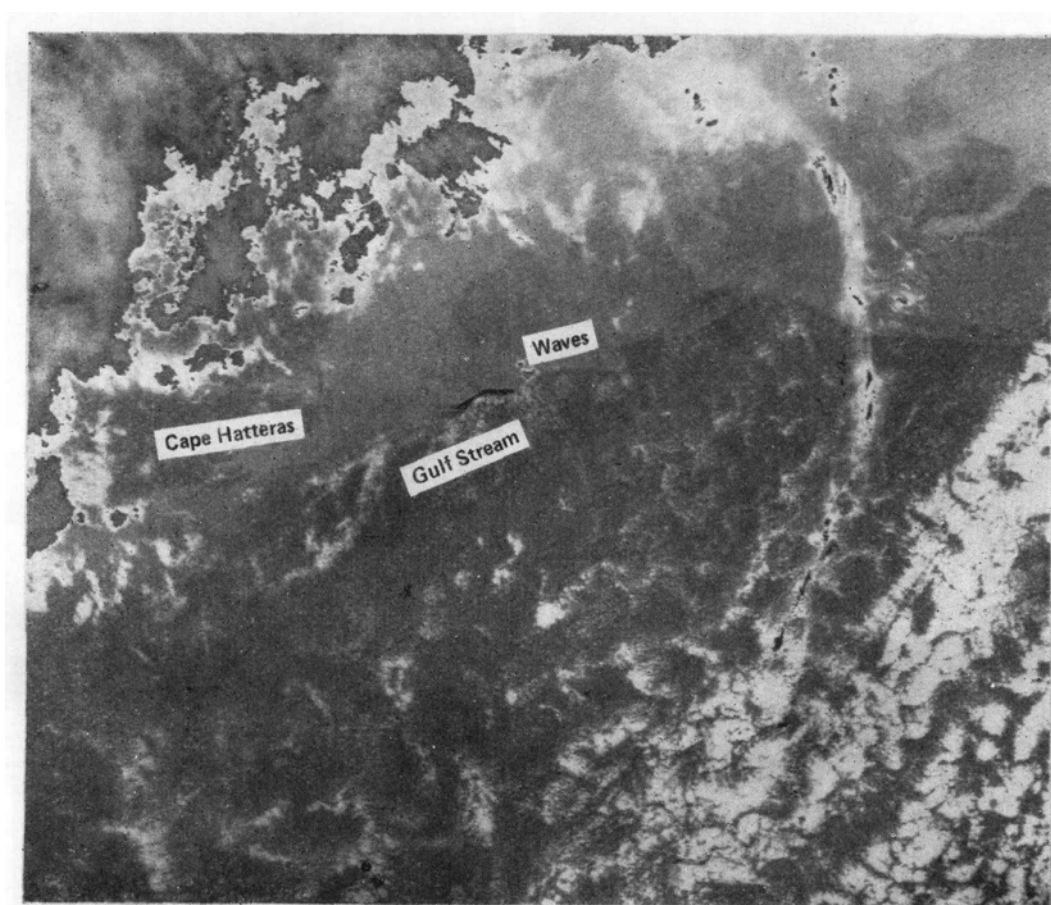
*(First Institute of Oceanography, National Bureau of Oceanography, Qingdao)*

N. E. Huang and V. Klemas

*(CMS, University of Delaware, U. S. A.)*

### ABSTRACT

By using satellite IR data, the motion features of the shear waves along the Gulf Stream north wall northeast of Cape Hatteras are analyzed in this study. The average wavelength of this kind of waves is 75 km, the average amplitude (crest to trough) 17 km, the average period 27 hours. Observations show that the shear waves propagate easterly at an average velocity of 100 cm/s. One event of the shear waves persists about a week. Statistics of occurrence frequency of the shear waves from 1977 through 1982 indicates that occurrence frequency is relative to instability of the Gulf Stream. Comparing the evolution process of a shear wave event in the spring of 1982 with the wind stress data synchronously measured from NOAA buoys, meteorological forcing as the triggering mechanism is suggested.



哈特勒斯角以东湾流及其北侧切变波的红外影象  
NOAA 卫星 1982 年 11 月 11 日 19 时 05 分拍摄, 轨道号 7148