

台湾—西表岛间黑潮多频振动特征的剖析*

陈上及 马继瑞 杜兵

(国家海洋局海洋科技情报研究所,天津)

提要 本文利用日本东海大学在我国台湾—日本西表岛间的锚系测流资料,进行了调和分析,得出了各层潮流的调和常数、椭圆要素,分析了黑潮潮流的基本特征,并进行流速、温度、盐度的谱分析。结果表明,黑潮除有明显的中频潮振动外,还显著地存在着以数天乃至数十天为周期的各种低频振动。在最大熵谱分析中,经显著性周期检验,有不少谱峰已超过显著性水平,其中有的谱峰值为日潮振动的3—5倍,仅次于半日潮振动。此外,各层之间频域相关性分析表明,除半日潮为最大外,低频段上有的凝聚函数也较显著。

黑潮在东海的水文特征及其变异,对日本南岸黑潮的弯曲和变异有着直接的影响,与我国沿海地区气候的变化更有密切关系。我国学者朱祖佑^[1]和管秉贤^[2,4]分别对台湾以东和东海黑潮流速、流量的变异及其与日本以南黑潮大弯曲的关系,尤其对东海黑潮流速结构的特征和变化,都做了很多研究,主要从 GEK (电磁海流计) 资料和根据温、盐度资料算得地转流和输送量,并结合风应力场资料进行了阐述和相关分析。

1978年,日本东海大学曾在台湾—西表岛之间设了一个锚系测流站 (24°24.2'N, 123°36.2'E, 下称M站),水深为1000—1020m。在该站共进行了两次长期观测。第一次(1978年10月3日—1979年3月4日)观测层为300和700m;第二次(1979年12月2日—1980年3月25日)观测层为30, 100, 300和700m,取样时间间隔为半小时。其中30m层只记录4天就因故中断。东海大学稻葉荣生等(H. Inaba, et al., 1981)^[6],曾用第二次观测资料进行调和分析 and 谱分析,其中着重分析了4个主要分潮调和常数、日潮和半日潮的谱值,以及流速与水温的相关性等。

本文利用M站第一、第二两次观测的海流和温、盐度资料,对黑潮流速的结构、多频振动,尤其是低频振动特征进行了初步分析。

一、实测海流的基本特性

根据实测海流资料,绘制了流向、流速频率分布图(见图1)。由流向频率图可知,各层流向分散于各个方位,其中以东北(N-NE-E)方向频率最大,100, 300和700m层各为62, 73和46%,说明这里的海流黑潮占主导地位,尤其在100, 300m层,黑潮更占绝对优势,当然各层的潮流也是较为显著的。其次,由流速频率图可知,大部分流速在5—30cm/s之间,其频率各层都在80%以上。流速大于30cm/s的频率,100, 300和700m层各

* 山东海洋学院叶安乐和海洋科技情报研究所王骥、刘天华、崔贺臣同志对我们的工作给予了大力支持,在此一并致谢。

收稿日期: 1986年7月10日。

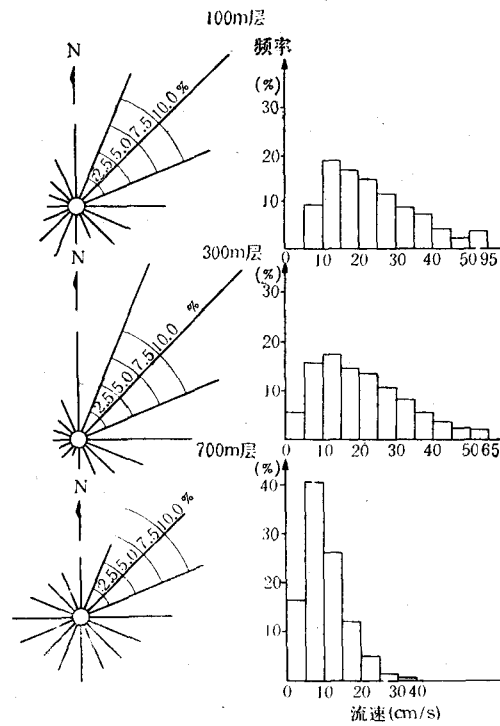


图 1 M 站 100, 300, 700m 层流向流速频率图

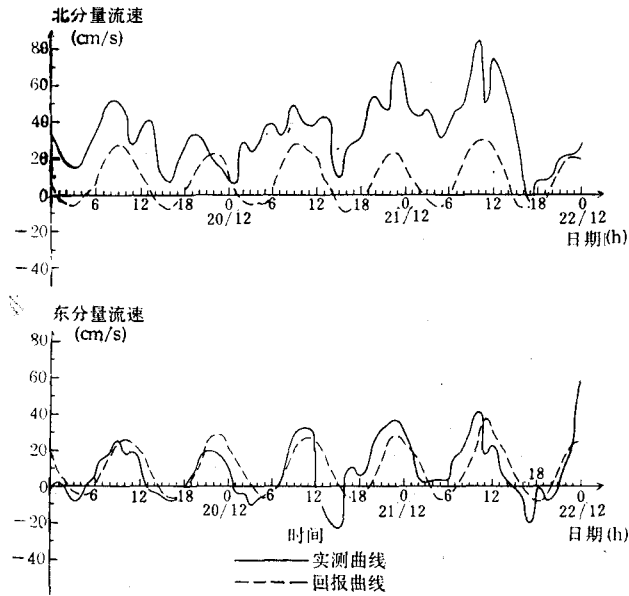


图 2 M 站 100m 层流速东、北分量流速实测与回报值的比较

为 19, 15 和 1%。各层实测最大流速分别为 93, 64 和 38cm/s。

图 2 为任意 3 天 100m 层实测流速东、北分量实测和回报流速的过程曲线。由图 2 可见,北分量几乎全为正值,反映了黑潮的主导作用。此外,东、北分量都有显著的半日潮

潮流,两者振幅相差不大,但北分量位相提前1—3时。

图3为日平均东、北分量流速曲线和海流矢量图。各层矢量多指向东北,流向较为稳定,表现出黑潮流系的特征。100和300m层流速较大,矢量平均流速分别为16和13 cm/s,流速稳定度均为75%;700m层流速锐减,矢量平均流速仅3.5 cm/s,稳定度为29%。由此可见,这里黑潮的流核主体可能位于700m以浅的水层。由图3还可看出黑潮除叠置着中频潮振动外,还包含着几至几十天的低频振动。

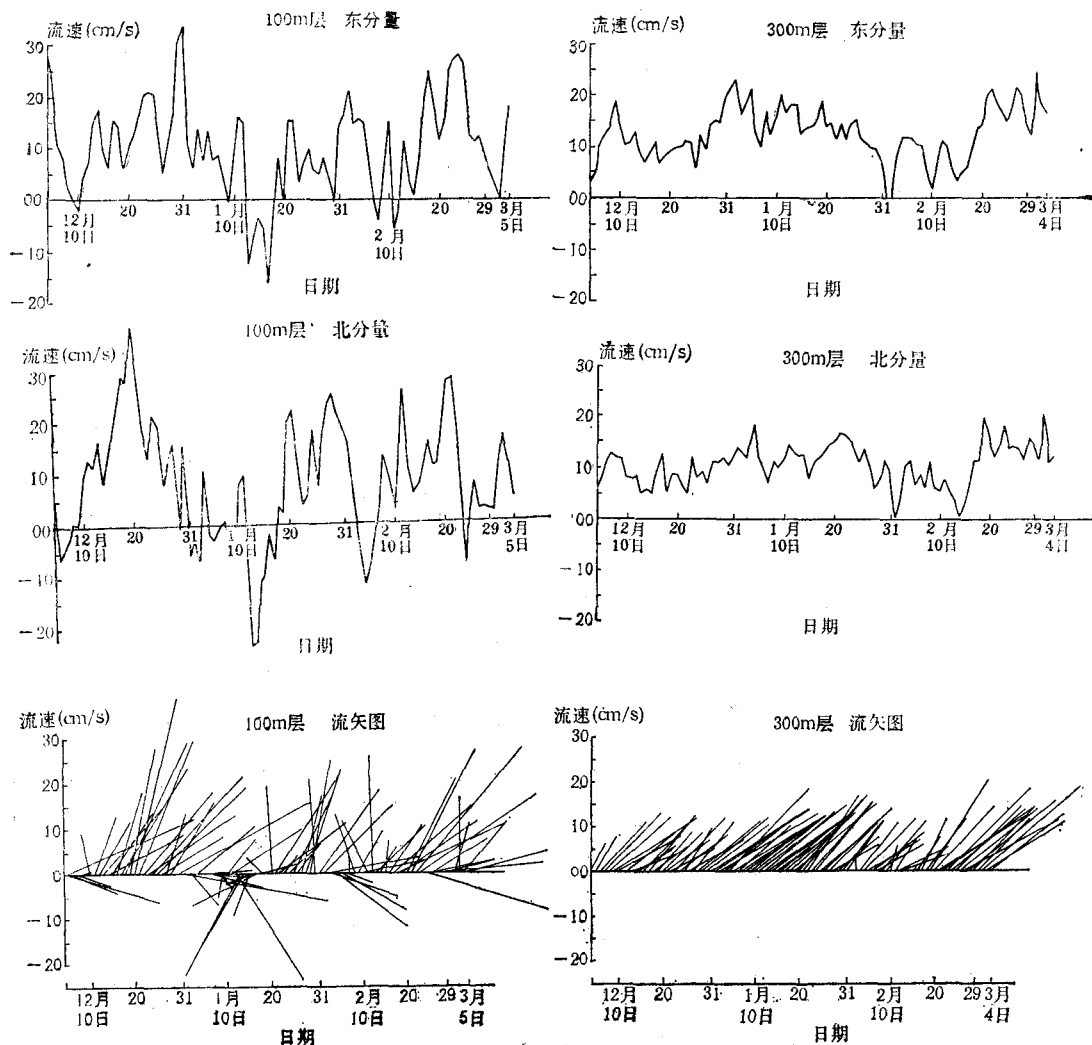


图3 M站100和300m层逐日平均流速的东、北分量曲线和矢量图

二、黑潮的潮振动特征

将实测流速的东、北分量,温、盐度时间序列分别减去其均值,用FFT法进行了谱分析。从功率谱图(图4)可看出,海流矢量旋转谱的最高峰值均出现在0.08c. p. h处,相当于半日潮的周期。温、盐度谱值在0.08c. p. h处也很显著。这些都证实黑潮存在着显著

表 1 各层潮流调和常数

水层(m)	30				100				300*				700*			
	北分量		东分量		北分量		东分量		北分量		东分量		北分量		东分量	
	u	g	v	g	u	g	v	g	u	g	v	g	u	g	v	g
M_2	11.8	259	13.0	270	10.8	269	12.0	294	11.0	228	3.3	268	4.1	123	6.9	144
S_2	6.1	28	2.0	50	4.5	316	4.5	345	5.4	277	1.2	347	2.1	163	4.0	177
N_2					2.4	271	1.4	310	2.7	211	1.7	259	1.0	100	1.3	143
K_1	4.4	134	5.1	157	3.3	151	0.6	200	2.4	67	1.7	113	0.6	331	0.8	36
O_1	3.5	157	6.0	316	1.5	116	0.5	141	1.6	206	0.3	47	1.7	67	1.4	145
Q_1					1.7	69	1.7	76	0.4	33	1.2	23	0.9	139	1.1	227
M_4	2.5	162	3.0	311	0.5	160	0.4	193	0.5	110	0.7	26	1.1	295	0.5	313
M_6					0.2	277	0.2	44	0.3	247	0.1	198	0.1	121	0.2	222
MS_4	1.2	55	2.5	195	0.5	224	0.3	197	0.3	132	0.3	23	1.1	344	0.4	144
K_2					1.6	316	1.6	345	2.0	277	0.5	348	0.8	163	1.5	177
P_1					1.0	151	0.2	200	0.7	67	0.5	133	0.2	331	0.3	36
余流	20.7cm/s 88°				12.7cm/s 51°				14.7cm/s 47°				3.1cm/s 66°			

* 为 1978 年 11 月 4 日—1979 年 2 月 2 日和 1979 年 12 月 4 日—1980 年 3 月 4 日两次记录算得的平均值。
u, v 的单位为 cm/s, g 的单位为(°)。

表 2 各层潮流椭圆要素

水层(m)	主要分潮	长半轴 \bar{w} (cm/s)	短半轴 w (cm/s)	椭圆率 r	旋转方向 左(+),右(-)	长轴方向(°)	最大流速迟角 τ (时)
30	M_2	17.5	1.7	0.1	-	228	2.9
	S_2	6.4	0.7	0.1	-	18	1.0
	K_1	6.6	1.3	0.2	-	49	9.8
	O_1	6.9	1.1	0.2	-	299	10.1
100	M_2	16.0	3.0	0.2	-	231	3.6
	S_2	6.2	1.5	0.2	-	225	5.0
	K_1	3.3	0.4	0.1	-	8	10.1
	O_1	1.6	0.2	0.1	-	17	8.5
300*	M_2	11.3	2.0	0.2	-	194	1.7
	S_2	5.4	1.1	0.2	-	185	3.3
	K_1	2.7	1.0	0.4	-	30	5.4
	O_1	1.6	0.1	0.1	+	171	1.9
700*	M_2	7.8	1.2	0.2	-	60	4.8
	S_2	4.4	0.4	0.1	-	63	5.8
	K_1	0.9	0.5	0.6	-	62	1.3
	O_1	1.7	1.2	0.7	-	24	6.4

* 合意同表 1。

的潮振动,并以半日潮为主。

为进一步阐明各分潮的特性,30m 层用准调和分析法,其它各层用最小二乘调和分析法,分别算出各分潮的调和常数和椭圆要素,分别列于表 1 和表 2。

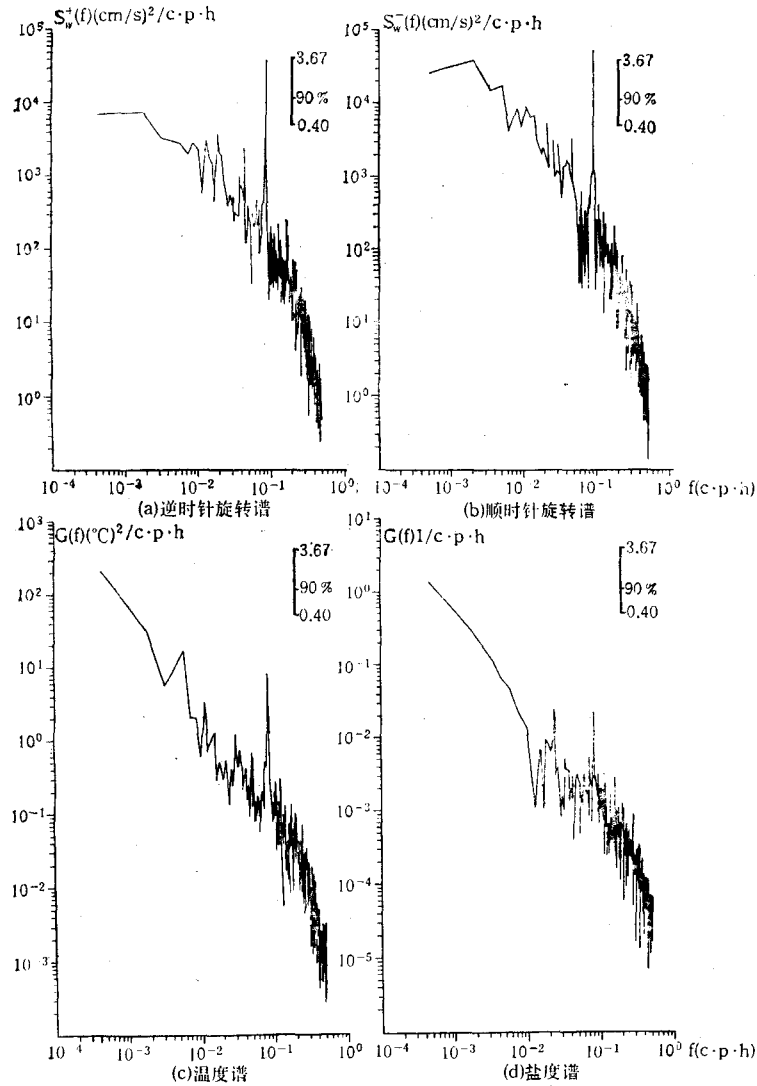


图 4 100m 层海流旋转谱和温、盐度功率谱

上述结果指出,各层潮流均以半日潮为主。30m 层属不规则半日潮 $\left(\frac{\overline{W}_{K_1} + \overline{W}_{O_1}}{\overline{W}_{M_2}} = 0.77\right)$, 100m 层以深各层均为规则半日潮 $\left(\frac{\overline{W}_{K_1} + \overline{W}_{O_1}}{\overline{W}_{M_2}} < 0.5\right)$ 。各层椭圆率甚小,几乎接近于往复流。潮流旋转方向,除 300m 层 O_1 分潮为左转外,其它均向右转。椭圆长轴方向,30—300m 层均为 NNE—SSW, 700m 层为 ENE—WSW, 基本与东海大陆坡等深

线平行。显然,这是潮波受大陆坡的屏障作用所致。 M_2 分潮的最大流速为 0.35kn。 S_2 、 K_1 分潮的最大流速约为 M_2 分潮的 1/3,长轴方向均为 NE-SW。 O_1 分潮流速更小,100m 层的最大流速不到 2cm/s。

根据各主要分潮椭圆的长半轴,用下式

$$\bar{w} = 2(1.33\bar{w}_{M_2} + 1.37\bar{w}_{S_2} + \bar{w}_{K_1} + \bar{w}_{O_1})$$

可求得各层最大可能潮流流速,以 30m 层最大,约为 1.8kn;以下各层随深度递减,700m 层的最大潮流流速约为 0.8kn。 M_2 分潮的最大流速到达时间,以 300m 层最早(月中天后 1 时 40 分),30m 层次之(月中天后 2 时 54 分),700m 层最晚(月中天后 4 时 50 分)。

这里的潮振动与东海陆架海区的潮流相比,有显著差异:(1)流速较小,仅为东海陆架区潮流的 1/4—1/10^[2];(2)椭圆长轴方向沿 NE-SW 走向几乎与东海陆架区的椭圆长轴方向相垂直,而且椭圆率较小,各层旋转方向均为右旋。

为了进一步分析这里的流速结构,以 100m 层为例,将由表 1 中的调和常数算得的回报流速与实测的流速相比较。由图 2 可知,东分量两者颇相接近,而北分量流速实测值比回报值大一倍多,其标准差可达 19.3cm/s。因而可以认为,这里的流场较为复杂,基本上由黑潮和潮流组成,并以黑潮为主导。而黑潮流速也并非为定常,显著地存在着各种长周期波动。当研究或预报这里的海流时,若只考虑中频潮振动,仅预报潮流,那是很不够的。而若把黑潮当作稳定的定常流也是不正确的。必须同时考虑黑潮的各种低频振动,才能抓住问题的实质。

三、黑潮的各种低频振动

上面已经指出,黑潮流速除了有显著的潮振动外,还显著地存在着几天乃至几十天周期的低频振动,这一点可以从功率谱结果进一步来阐明。由图 4 明显可见,M 站诸要素各层的谱值均随频率呈负指数关系变化,即谱线总的趋势自右向左上倾。这意味着频率越低,谱值越小,反映了能量向低频段运移。在这一总趋势上,除了叠加着半日潮和日潮等中频谱峰外,还明显地在低频段出现一些长周期谱峰。由图 4 可粗略地看出,这些低频段上的振动分别以 2 天,5—7 天,10 天以及准月为周期。这些结果与文献[2]的颇为一致。为了证实这些低频振动的显著性,我们特将其与半日潮、日潮的谱峰值和振幅相比较,并用最大熵谱作了显著性周期检验。

表 3 列举了海流和温度各低频谱峰所对应的振幅及其谱值与半日潮、日潮谱峰值的比值。例如,100m 层流速东分量 6.3 天周期的谱峰值为全日潮周期谱峰值的 5 倍,其振幅可达 4.4cm/s;北分量 5.2 天周期的谱峰值为全日潮周期谱峰值的 3 倍,其振幅达 4.7 cm/s,均仅次于半日潮流的振幅。这一特性不仅表现在海流和温度谱中,在盐度谱中也有反映。如 100m 层的盐度,周期为 2.5 天的谱峰值与半日潮周期的盐度谱峰值相近,为全日潮周期谱峰值的 3 倍。由此可见,黑潮低频振动的能量是比较显著的,它们仅次于中频振动的半日潮,却比全日潮的大。

为了进一步分析黑潮的低频振动显著性周期,本文还对各要素的日平均序列进行了最大熵谱分析。结果表明,100,300 和 700m 层各要素日平均时间序列最大熵谱线上均存在若干谱峰(图 5 仅列出 100m 层最大熵谱)。为确定这些低频谱峰是否显著,按照文献

表 3 黑潮低频振动的振幅及其单边谱峰值 (G_e) 与半日潮谱峰值 (G_s)、
全日潮谱峰值 (G_d) 之比

水层 (m)	要素	周期 (天)	振幅	G_e/G_s^*	G_e/G_d^*
100	东分量 (cm/s)	6.3	4.4	0.2	5.0
	北分量 (cm/s)	5.2	4.7	0.3	3.0
	水温(°C)	7.8	0.211	3.3	32.6
300	东分量 (cm/s)	7.7	2.5	0.8	1.4
	北分量 (cm/s)	7.7	1.6	0.1	0.5
	水温(°C)	7.7	0.115	0.1	0.7
700	东分量 (cm/s)	10.3	2.2	0.2	0.9
	北分量 (cm/s)	10.3	1.7	0.2	0.9
	水温(°C)	10.3	0.074	0.7	1.0

* 为用时域 3 段平滑谱计算结果。

表 4 流速和水温日平均时间序列最大熵谱峰值的显著性检验结果

水层 (m)	要素	谱峰周期 (天)	$R(1)/R(0)^*$	双边检验水平 α	谱峰值**	假设红噪声理论谱值**
100	流速东分量	27.9	0.614	0.05	979.7	686.0
	流速北分量	32.8	0.696	0.05	3189.9	1995.0
	水温	7.8	0.929	0.05	0.742	0.330
300	流速东分量	8.4	0.720	0.10	147.9	120.97
	流速北分量	4.1	0.587	0.10	28.3	25.4
	水温	29.1	0.940	0.05	6.523	2.950
700	流速东分量	24.0	0.819	0.05	391.0	179.0
	流速北分量	21.8	0.700	0.05	183.9	62.8
	水温	7.1	0.857	0.05	0.069	0.058

* 为 $R(1)$ 和 $R(0)$ 分别迟后 1 天和 0 的自相关函数。

** 表示谱值单位为 $(\text{cm/s})^2/\text{cpd}$ (流速谱) 和 $(^\circ\text{C})^2/\text{cpd}$ (温度谱)。

[8]介绍的方法,用红噪声假设对它们进行了显著性周期检验。根据文献[7]和[9],本文假设样本最大熵谱近似服从卡方 $\alpha\chi^2_\nu$ 分布,其中 α 为系数, ν 为自由度, ν 的大小按文献[7]的方法估计。分析的最大熵谱阶数为 30—40,显著性检验水平 α 取作 0.05—1.0。检验结果表明,有相当一部分低频(包括准月周期)谱峰值超过了显著性检验的临界值。表 4 仅列出其中峰值较大、周期较长者。从统计上来说,黑潮确实存在着显著的低频波动。正由于这些低频振动的存在,致使流速和温、盐度的日平均时间序列均呈现较大的变化。如图 3 所示,100m 层日平均余流北分量的最大、最小流速分别为 37.0cm/s 和 -23.2cm/s,东分量的最大、最小流速分别为 33.2cm/s 和 -14.9cm/s,其波动幅度超过了 M_2 分潮的最大可能流速。这足以说明低频振动对黑潮的流速变化起着显著的作用,而东海陆架区流速的变化是以潮效应为主^[10]。

日平均时间序列最大熵谱分析结果表明,温、盐度同海流相比,能量更集中于低频段内。在周期 20—30 天低频段内,温、盐度最大熵谱谱峰值,大部分未达到显著性检验的标

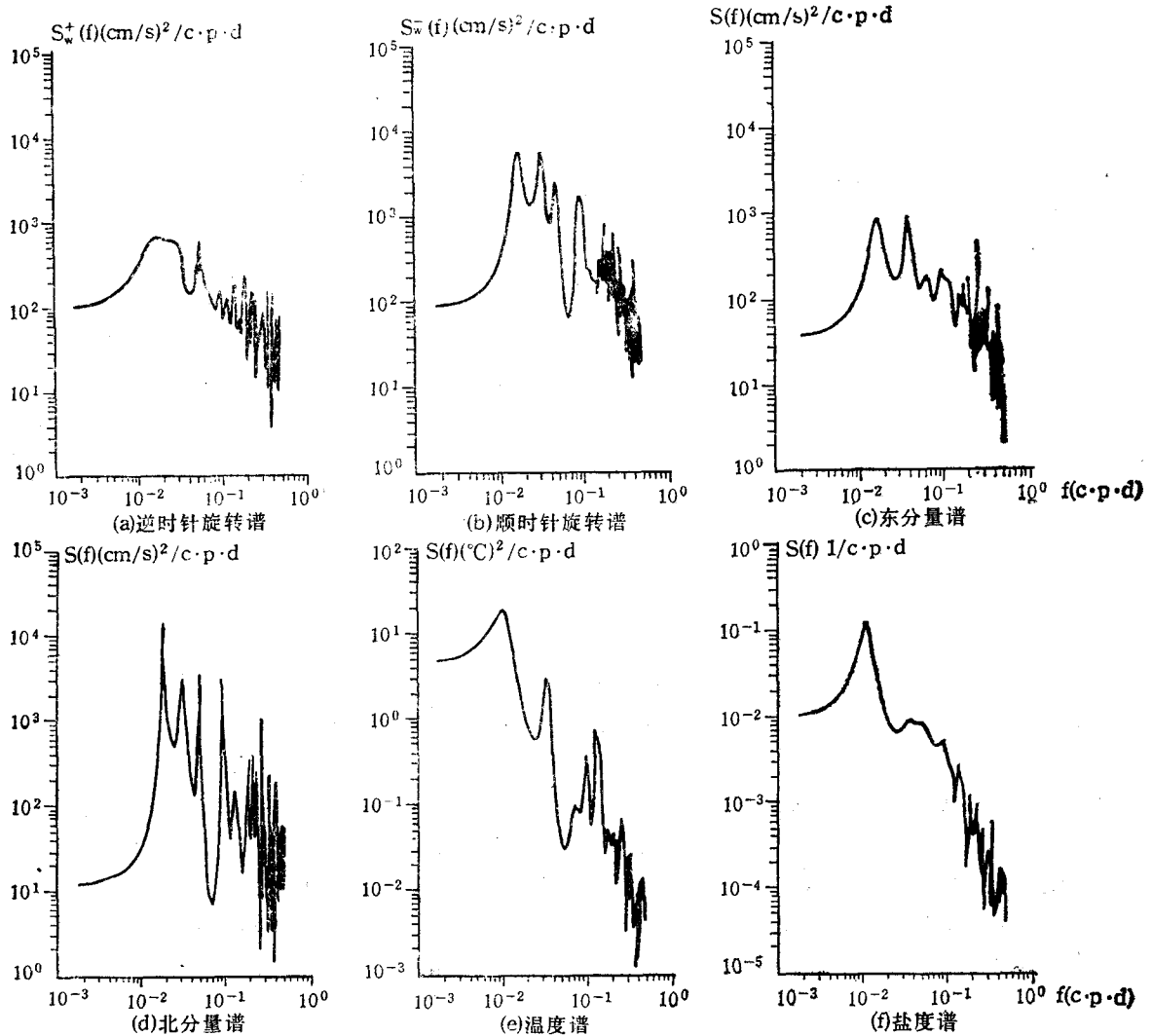


图5 100m层海流和温、盐度日平均时间序列最大熵谱

准。它们显著地反映出代表时间持续性的红噪声性质，其中尤以盐度更为明显。因此在建立预报模型时，对不同要素的上述差别，应予以注意。

此外，黑潮在此处明显地存在着惯性振动。在对周期图和自由度为6或8的功率谱所作的显著性周期检验结果中，各层惯性周期振动都较显著，尤其从海流旋转谱中可更直观地看到这种振动的存在。700m层惯性振动的谱峰位置稍微偏离理论的惯性频率，这与文献[5]的论述相符。

至于各层之间海流和温、盐度的频域相关特性，由于现有观测资料取样长度较短，难以分析周期长达一个月的低频相关，本文用不同的自由度分析了各要素层与层之间周期在几天以内的频域相关。结果表明，各要素两层间的凝聚函数，以半日潮的为最大(图6仅列出100m与300m层海流矢量相关)。由图7可知，100m层半日潮流椭圆主轴方位也较

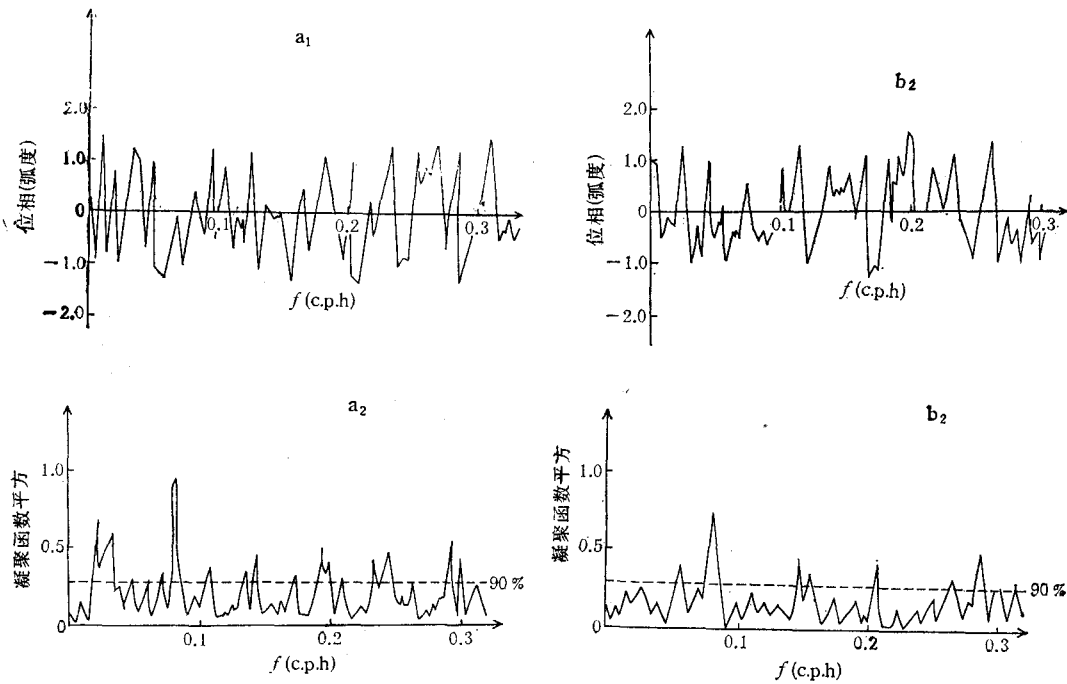


图6 100m与300m层间的海流矢量频域相关函数

a_1 . 正频域位相; a_2 . 正频域凝聚函数平方; b_1 . 负频域位相; b_2 . 负频域凝聚函数平方。

稳定, 其它层次亦然。这都说明这里半日潮效应比较显著。海流和温、盐度各层之间的凝聚函数平方, 在以几天为周期的低频段上, 有的已达到和超过显著性相关临界值, 标志着这些要素的低频振动, 层与层之间是密切相关的。此外, 在这一频段上, 温度的凝聚函数 100m 与 300m 层间的要小于 300m 与 700m 层间的 (图 8 仅表示 300m 与 700m 层间的)。这可能是由于 300m 以浅海水层化显著, 内波导致的温度变化较为复杂, 而 300m 与 700m 层间海水层化渐趋减弱的缘故。这一水文结构在文献 [3] 中的断面图上也明显可见。

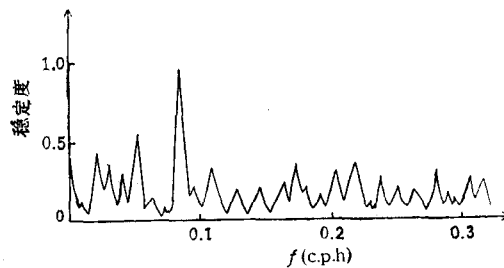


图7 100m层椭圆主轴方位稳定度

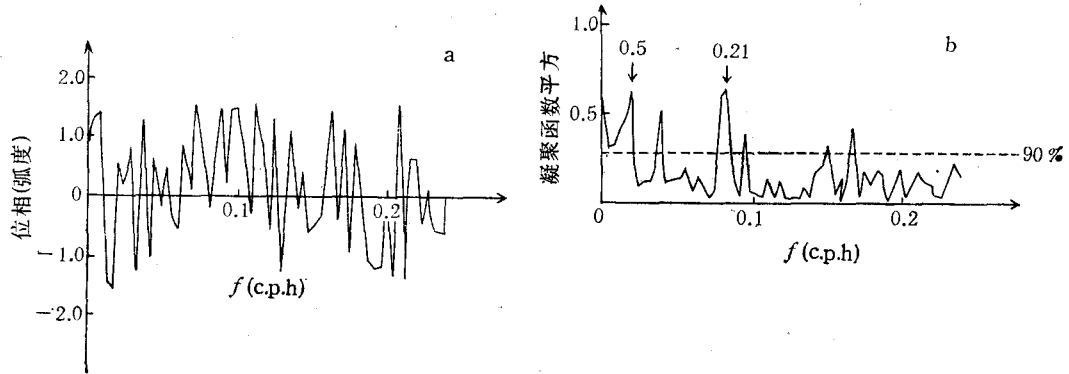


图 8 300m 与 700m 层间温度频域相关函数

四、小 结

通过对 M 站海流、温度和盐度连续观测资料的分析,可以看出东海黑潮水文结构的多频振动特征。

1. M 站是以黑潮为主导,但潮流的特征和温、盐度的潮效应也相当显著。

2. 各层潮流均以半日潮为主,椭圆率甚小,属接近于往复流的旋转流。长轴方向呈 ENN-WSS 向和 ENE-WSW 向,与大陆坡等深线平行,旋转方向均为右旋。最大可能潮流 30m 层为 1.8kn, 700m 层为 0.8kn。

3. 经功率谱分析和最大熵谱谱峰显著性检验表明,黑潮流速显著存在着几天乃至几十天的周期振动。温、盐度谱估计中,代表时间持续性的红噪声性质比较明显,其中尤以盐度最为显著。

4. 这里的黑潮流速存在惯性振动,计算的惯性振动谱峰所处的频率稍微偏离该站的理论惯性频率。

5. 流速、温度、盐度各层间的频域相关中,半日潮振动的凝聚函数最为显著。在几天为周期的低频段内, 100m 与 300m 层之间的温度的凝聚函数要小于 300m 与 700m 层之间的。

参 考 文 献

- [1] 管秉贤, 1981. 苏澳-与那国岛断面上黑潮流速结构的特征及其季节变化. 海洋科学集刊 18: 1—18.
- [2] 刘举平, 1984. 东海黑潮区域水位的低频变化. 海洋与湖沼 15(3): 230—239.
- [3] Chu Tsu-you, 1976. Study of the Kuroshio Current between Taiwan and Ishigakijima. *Science Reports of the National Taiwan University* 6: 1—24.
- [4] Guan Bingxian, 1983. Analysis of the Variations of volume Transports of the Kuroshio in the East China Sea. *Chin. J. Ocean. Limn.* 1(2): 156—166.
- [5] Gonella, J., 1970. A Local Study of Internal Oscillations in the Upper Layers of the Ocean. *Deep-Sea Res.* 18(8): 775—788.
- [6] Inaba, H., K. Kawabata and H. Futl et al. 1981. Current Measurement in the East China Sea. Proceedings of the Japan-China Ocean Study Symposium on "Physical Oceanography and Marine Engineering in the East China Sea". Tokai University, pp. 95—117.
- [7] Jenkins, G. M. and D. G. Watts, 1968. *Spectral Analysis and Applications*. San Francisco, Holden-day, pp.

209—420.

- [8] Mitchell, J. M. Jr, 1966, *Climate Change*. W. M. O. Tech. Note, pp. 33—57, 79.
- [9] Tad, J. U. and T. N. Bishop, 1975. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 113(1): 183—200.
- [10] Zhao Jinsan, Qiao Rongzhen and Dong Ruzhou et al., 1983. An analysis of current conditions in the investigation area of the East China Sea. *Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea*. 1: 314—327.

AN ANALYSIS ON CHARACTERISTICS OF MULTIFREQUENCY OSCILLATION OF THE KUROSHIO BETWEEN TAIWAN AND IRIOMOTE-SHIMA

Chen Shangji, Ma Jirui and Du Bing

(*Institute of Marine Scientific and Technological Information, SOA, Tianjin*)

ABSTRACT

Based on the data of moored Aanderaa current meters near the Kuroshio path between Taiwan and Iriomote-Shima gathered by Tokai University, Japan, the harmonic analysis of tidal current and the spectral analysis of current, temperature, and salinity of sea water are made in this paper. The results show that besides the obvious mid-frequency oscillation, i.e. the tidal fluctuation, there exists various remarkable low-frequency oscillations, with periods from a few days to tens days. After having significant tests of maximum entropy spectrum, we found that the low-frequency oscillations are more significant and their powers are 3—5 times that of diurnal tidal constituent, next only to the semidiurnal one. In addition, in the low-frequency section, the coherence between any two levels are notable. Through the analysis, we obtained a brief sketch of the velocity structure, the characteristics of multifrequency oscillation and the features of variation of the Kuroshio to the east of Taiwan.