

# E断面黑潮流速结构变异特征 的初步分析

苗育田 俞善庆 乔荣珍

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

## 摘 要

本文使用CSK资料并结合一部分GEK表层流资料, 对E断面较详细地分析了下列内容:

1. 黑潮流场的时间和空间变化特征.
2. 黑潮的流轴结构和主轴随深度的右偏现象, 同时给出了黑潮水文要素的某些参数指标.
3. 对台湾以东海域、东海黑潮以及过E断面的黑潮进行了类比.
4. 计算了地转流量, 分析了它的变化. 特别指出了夏、冬半年沿垂直方向流量分布的巨大差异.

## 一、引 言

前人作过关于黑潮变异特性的研究, 得到了许多可喜成果. 在此本文择取CSK<sup>1)</sup> (1965—1969年) 和部分表层实测流速资料GEK<sup>2)</sup> (1960年1月—1968年5月) 对日本屋久岛东南E断面, 进行计算、绘图表和分析, 旨在用以标志黑潮强度的水文要素时空变异特性, 进而寻求黑潮变化的某些特征.

E断面黑潮的研究首推日本学者. Nitani (1972) 指出东海和E断面的黑潮流量间存在反位相关系; 小长俊二等 (1980) 利用1955—1979年观测资料讨论过上述关系, 解释了该断面流量减少的原因<sup>[1]</sup>. E断面横贯黑潮主干及逆流区. 位于屋久岛东南水深陡降的陆架上, 是东海黑潮出吐噶喇海峡后第一个深水断面. 设E<sub>1</sub>至E<sub>7</sub>站, 其中GEK于每相邻两站中间增测一点, 顺次命名为a、b、c、d、e、f, 呈一字形排开, 除E<sub>1</sub>水深不足200米外, 其余均超过800米 (见图1).

本文1982年11月11日收到, 修改稿1983年10月8日收到.

- 1) 国际合作调查资料, 本文除另加说明外, 均系CSK分析讨论.
- 2) 日本气象厅海洋气象观测资料.

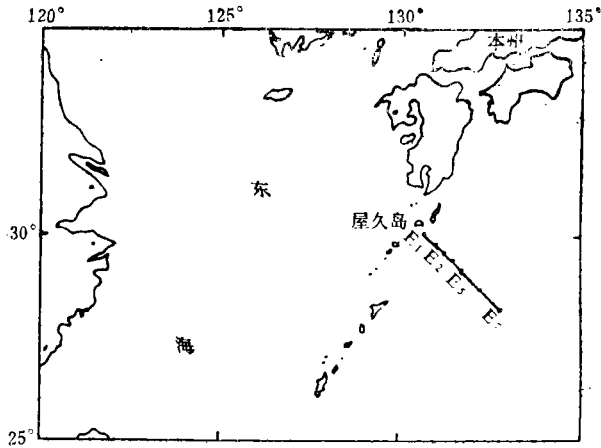


图1 E断面地理位置

## 二、流速分布变化特征

### (一) GEK表层流速

将收集的E断面280站次GEK实测表层流速资料，按其与断面正交和平行分解成 $u$ 和 $v$ 两个流速分量（ $u$ 以顺流方向为正， $v$ 以自 $E_1$ 至 $E_7$ 为正）。然后求各站 $u$ 与 $v$ 的平均值及合成矢量，详见表1和图2。

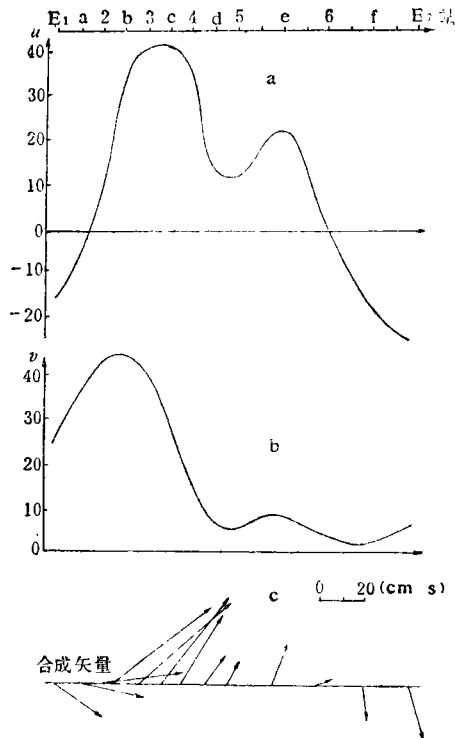


图2 E断面 $u$ (a)、 $v$ (b)及合成流速(c)的分布

表1 E断面 $u$ 、 $v$ 平均值及合成值

站号	$u$ (厘米/秒)	$v$ (厘米/秒)	合成	
			值 (厘米/秒)	方向 (度)
$E_1$	-16	25	30	122
a	-6	35	36	99
$E_2$	5	42	42	83
b	38	46	58	50
$E_3$	39	41	56	47
c	42	32	53	37
$E_4$	36	18	41	27
d	15	11	18	35
$E_5$	13	5	14	23
e	24	9	25	22
$E_6$	1	5	5	77
f	-18	2	18	175
$E_7$	-25	7	26	165

由表1及图2可知，黑潮表层平均流速分布有下列特点：

1. 高流速区位于 $E_2$ — $E_4$ 站间，这是黑潮流轴所在位置，最大流速57.9厘米/秒，流向东北出现在 $E_3$ 站，流轴左侧流速迅速递减，右侧递减较平缓，至 $E_5$ 站后又稍有回升，但幅度不大，如以大于40厘米/秒作为黑潮主流区，则主流流幅约40海里。

2. 在黑潮左侧，离流轴约15—20海里处，出现逆流，最大逆流值为35厘米/秒，流向东南，右侧逆流距流轴较远，它在离轴60海里左右处出现，最大逆流值为25厘米/秒，流向东南或南，不论左侧或右侧逆流，其流速远较主流弱，约为主流速的一半。

3. 图2a是与断面正交的 $u$ 分量廓线，有两个峰，位于主峰右侧的次峰，峰值不高，如以 $u$ 分量零线作为黑潮主逆流分界线，则主流流幅为90海里左右，图2b表示与断面平行的 $v$ 分量廓线，在流轴附近，比 $u$ 分量大，说明黑潮通过断面时，流向偏东，在整个断面右侧 $v$ 分量迅速衰减，量值较小。

## (二) GEK表层流速变动概况

图3表示18次流速观测值的 $u$ 分量廓线，这些廓线形状虽各有异，但都有一主峰，峰值富集于 $E_2$ — $E_4$ 站间（约50海里），其中 $E_3$ 站出现率最高为32%，表明黑潮流轴位置相对稳定，只有1966年3月、1968年4月右摆到e站（离 $E_1$ 70海里）两次和1966年1月左摆至 $F_1$ 站（离 $E_1$ 20海里）一次，说明黑潮右摆幅大于左摆幅，这与后面CSK资料计算结果颇相似，同时由图3断面两侧几乎每次观测都有逆流，故认为逆流出现并非偶然现象而

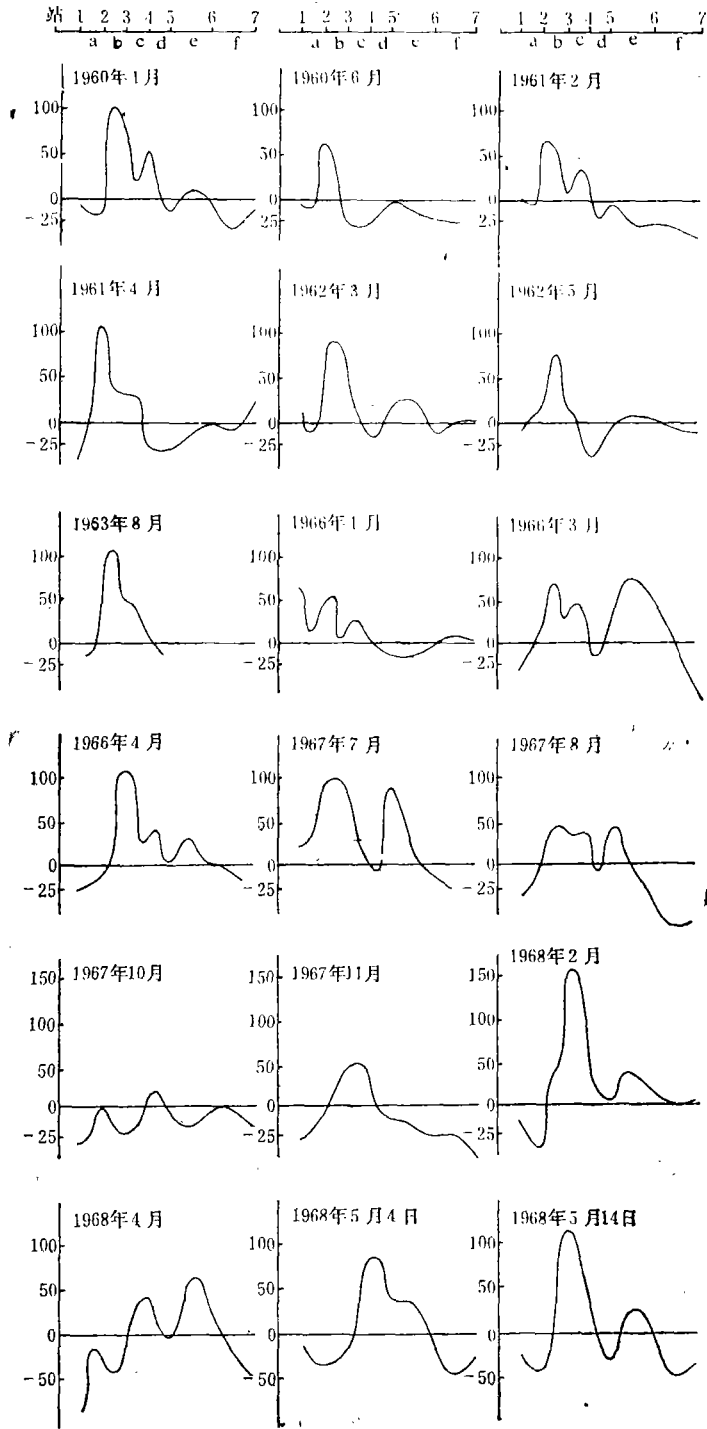


图3 E断面流速u分量分布廓线

是相当稳定的。若以最大流速点位置为流轴所在位置, 则流轴处的流向变化不大, 22次GEK记录, 最大流速的流向散在 $30^{\circ}$ — $110^{\circ}$ 间的19次, 占86%, 足见流向主要在 $80^{\circ}$ 角范围内变动。然而流速的变化相当可观。例如, 流轴处的实测最大流速175厘米/秒, 出现在1968年5月3日的 $E_6$ 站和同年2月25日 $E_5$ 站, 流向依次为 $170^{\circ}$ 和 $70^{\circ}$ 。而此间, 流轴处实测最大流速序列中的最小值仅为62厘米/秒, 出现在1967年11月 $E_4$ 站, 流向 $30^{\circ}$ 。最大与最小值变幅高达113厘米/秒, 而 $E_2$ — $E_4$ 间平均流速是64厘米/秒, 故上述变幅接近平均流速的2倍。

### (三) 最大流速的分布及变化

E断面CSK五年资料计算表明, 流轴处最大流速是逐时变化的, 且变幅较大。最大流速序列中的最低值略过1节, 最高值超过3节(夏季)。与GEK最大流速变幅一样, 这些流速极值位于表层至250米层内, 其中表层出现率为53%。主流强时, 最大流速多居表层, 弱时移居中层, 最大流速水平分布极不均匀, 2—3站占37%, 3—4站为45%, 4—5站具14%, 1—2和6—7站均为零, 5—6站几近于零。2至4站(40海里左右)的最大流速出现率之和为82%, 流速极值位置相对集中, 再次指明黑潮流轴位置相当稳定。管秉贤(1964)曾将最大流速所处位置作为黑潮流轴视性位置, 这一结论在E断面流速分析中又一次得到了证明。沿E断面流速极值的频率分布廓线见图4。

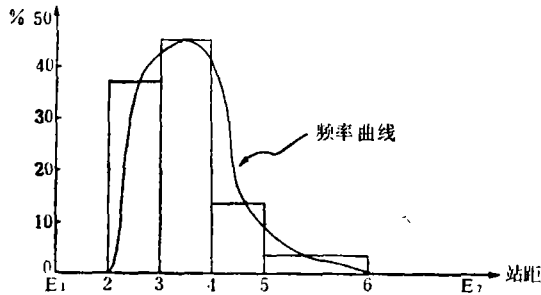


图4 1965—1969年最大流速位置频率分布

日本学者增泽让太郎(1965)在研究日本以南海域黑潮中强调, 黑潮流速夏大秋小这一结论几乎被公认。本文用GEK资料分析得到了完全相同的结论。但对CSK资料计算和进而得到的最大流速出现率及平均值仅得到了夏大的结论。对此作者设想E断面属盛行季风区, 夏季该断面现场风测资料统计结果, 风向绝大多数介于东南、南和西南之间。故沿黑潮前进方向的风分量, 在风摩擦层内将对黑潮流速予以强化作用。季风效应可能是导致流速夏强的原因之一。当然, 黑潮本身变化更是不能忽视的。

最大流速另一特点是流速增强, 流轴接近于岸; 沿岸水位降低。该现象在本州南部黑潮中均可发现, 但有趣的是在分析E断面资料时, 也得到上述结论的前者。见图5。最大流速大于80厘米/秒以上者, 均介于离岸40至60海里间, 距岸较近; 而小于75厘米/秒者, 离岸距离介于60至80海里间, 甚至有大于80海里者, 离岸较远。这与二谷颖男<sup>[1]</sup>在本州以

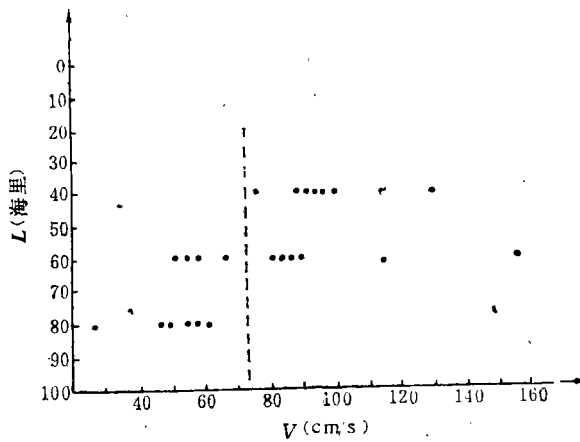


图5 E断面最大流速与离岸距离点聚图

南得到的看法相吻合。若将最大流速大小视为黑潮强弱的标志，则流速大黑潮势强，贴在于岸，反之则弱，远离岸。

#### (四) 黑潮的流幅和厚度

黑潮主逆流的平均流幅（横贯海流的水平宽度）和厚度（流轴的垂直尺度）随时间推移和空间变化差别显著。详见下表2、表3。

表2 表层平均流幅分布

海 区	主 流 流 幅 (海 里)			右側逆流流幅 (海里)
	$\geq 10$ 厘米/秒	$\geq 25$ 厘米/秒	$\geq 1$ 节	
E 断 面	90	75	40	37
东 海 黑 潮 <sup>(4)</sup>	72	40	25	13
台 湾 以 东 <sup>(1)</sup>	87	50	35	27
平 均	83	55	34	26

表3 平均厚度(分布)

海 区	主 流 厚 度 (米)		右側逆流厚度 (米)
	$\geq 10$ 厘米/秒	75%流量深度	
E 断 面	637	400	482
东 海 黑 潮 <sup>(4)</sup>	514	350	170
台 湾 以 东 <sup>(1)</sup>	558	300	452
平 均	576	370	338

由表2知黑潮主流幅多年平均值不管以大于10厘米/秒还是大于25厘米/秒甚至1节计,均表明:台湾以东海域接近平均值,东海黑潮比该值低,E断面则高于平均值的情况,逆流幅变化趋势与主流相似.除此流幅变幅也较大.仅以大于10厘米/秒流幅的变动而论,E断面表层变幅为60—120海里;东海黑潮为50—90海里,台湾以东可与东海黑潮匹敌<sup>3)</sup>.黑潮主流幅随深度不断收缩变窄,故使黑潮流量、质量和动量输送绝大多数集中于中上层.

由表3可清晰看到台湾以东和东海黑潮流轴厚度较三大海域平均值略低和偏低,而E断面高于平均值的结论.至于流幅的季节性变异,E断面夏季表层流幅平均值约89海里,冬季99海里,似有夏稍窄冬略宽之势.总之,在跨越20°N到30°N的黑潮流轴多年表层平均流幅只有83海里(大于10厘米/秒计),流速在1节以上的流幅更窄,平均约34海里(E断面稍宽为40海里);而主流厚度(75%流量所及深度)平均约370米(E断面稍厚为400米).结合GEK表层流速分布特性综合分析,证明黑潮确为流轴相当稳定的一支西部狭窄带状边界流.

### 三、黑潮的流轴结构

GEK流速的 $u$ 分量分布廓线与CSK海流要素计算结果均指出,黑潮流轴大致分为单轴和双轴(多轴)两种类型.

#### (一) 单轴型特点

黑潮的单轴结构如图6所示.在黑潮主流厚度范围内,只有一个明显的高流速区,自表层一直延伸到主流厚度下界,流轴右侧常伴随一支较主流弱得多的逆流,但流轴左侧逆流较少见,与GEK资料分析不尽符合.主流区速度分布绝大多数随深度单调递减,显示主流强度随深度变弱的趋向.这种单轴型结构占E断面研究资料的95%,它支配着黑潮的流场.大于10厘米/秒的流速等值线深达600米,1节等值线可及350米至400米层.黑潮主流区速度分布,除垂直方向由强变弱外,尚有高流速核下移特性,最深达250米.此时自上而下流速由次大变大再变小.据推测前进中的黑潮主流核并非始终位于某一固定水深内,它时上时下变化,具波状特性,类似黑潮主流核在水平方向左摆右移的形貌.在横贯黑潮主流的断面任意深度上,均有一明显的流速舌,舌轴两侧有较大的水平流速梯度区,相对舌轴左右不等,一般呈右区大于左区的非对称形.速度梯度平均值 $-\frac{\partial c}{\partial n} = -1.5 \times 10^{-5}$ /秒.

黑潮表层轴心90%以上落在宽达40海里范围内(E断面2—4站).不足10%的落在该域外.故舌轴位置相当稳定.考察期间的E断面黑潮主轴几乎终年位于屋久岛东南陆坡上方一个狭窄流带内.即沿1000—2000米间的等深线流动,此处正是深度梯度最大处(东海和台湾以东黑潮主流分别沿200—1000米、2200—4500米间的等深线流动<sup>3)</sup>).将最大流速点作为流核位置,则黑潮流轴(E断面)最大左右摆幅分别为20海里和60海里,与GEK

3) 许卫桐、苗育田等,东海黑潮水文特征,海洋实践,1979,3,43—50.

资料分析大致相同。黑潮流轴的摆幅右大左小，不对称，是 E 断面流速结构的又一特点。

### (二) 双轴（多轴）型特点

有时在横贯 E 断面黑潮流轴的任意深度上，自左而右流速分布呈双峰现象，直至相当大深度（1968 年 4 月图略），将此视为黑潮双轴结构（Taft, 1972）。此外 E 断面黑潮尚发现正反流相间排列，反映出动力起伏面左低右高相继出现，本文将此也视为双轴结构。在 GEK 资料中也屡见不鲜（台湾以东黑潮于 1967 年春季，1968 年春秋两季都有不同程度的反映。而东海黑潮的上述特点显著变弱<sup>21</sup>）GEK 和 CSK 资料分析都指出：黑潮流轴多核结构不但存在而且不限于表层。总之，似有呈单轴时，主流流速增强，厚度大，流幅变窄；呈双轴（多轴）时，流速减弱，厚度稍薄，而流幅变宽的特点。前者夏季多见；后者其余三季均有。

### (三) 黑潮流轴右偏现象

横贯各流速断面的黑潮流轴，随深度逐渐移向黑潮右侧的现象，数年中不分春夏秋冬

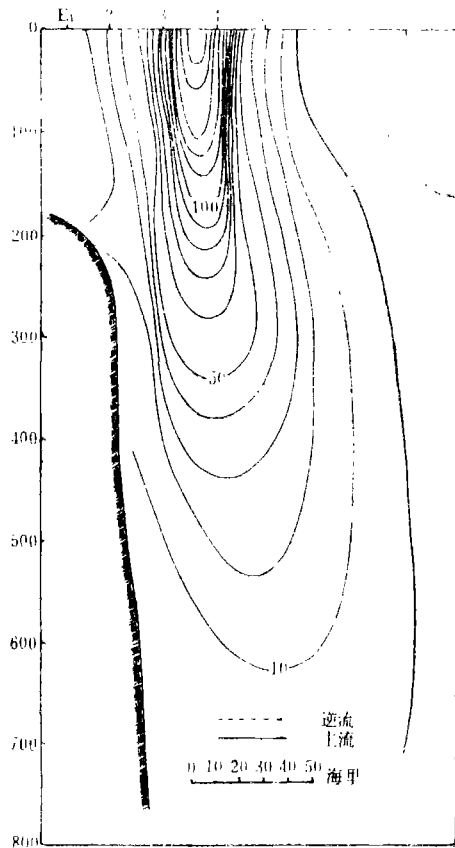


图6 黑潮流轴右偏现象(1967年)



几乎普遍存在。E断面流轴右偏率占统计资料的90%；东海黑潮接近100%<sup>3)</sup>。等流速峰脊线大致与黑潮流经海区左侧陆坡廓线平行(见图6)。流轴右偏除与地形效应密切相关外,尚与海流强度、流轴结构及主流来向相对于地形的倾斜方向等因素有关。流轴右偏受地形影响的程度,E断面500米层相对于表层主轴右移的多年平均值是25海里;东海黑潮约15海里<sup>3)</sup>。

## 四、黑潮流量

### (一) 流量分布

E断面黑潮体积输送大于台湾以东和东海黑潮<sup>3)</sup>。为进一步研究E断面黑潮动力学特性,采用CSK资料,计算过该断面的平均质量、动能和动量。结果表明,多年平均正向质量、动能和动量输送分别为 $32.8 \times 10^6$ 米<sup>3</sup>/秒、 $4.4 \times 10^6$ 吨米<sup>3</sup>/秒<sup>2</sup>和 $15.1 \times 10^6$ 吨米/秒。同时,计算了E<sub>1</sub>至E<sub>6</sub>每相邻两站沿垂直方向的质量、动能和动量输送,其中E<sub>2</sub>—E<sub>6</sub>三要素相对于总输送量的百分比分别为70、88和79。尽管E<sub>2</sub>—E<sub>6</sub>间距仅60海里左右(占断面长度的3/8),却集聚了全部质量、动能和动量的70%以上。E<sub>4</sub>—E<sub>6</sub>间三要素输送量随深度有明显地增加,从而定量地解释了黑潮主轴右偏的客观存在性。从考察期间每相邻两站垂直流量沿断面分配看,黑潮流量轴类型分析(1967年10月;1968年4月;1969年7月为例)相似于流轴结构分析,故此处从略。从三要素多年平均值累积百分比分布曲线知,自表层到400米深,质量输送达77%,动量为88%,动能占94%,说明三要素的输送量主要集中于400米内,故400米视为黑潮主流厚度,且动能较之动量更居上层。

### (二) E断面流量冬、夏两种不同分布型

计算沿E断面垂直方向每间隔100米的质量输送得出:质量随深度出现冬夏两种不同分布型。(1)自表层到250米层,呈抛物型曲线分布(图7a)。极值点位于100米至200米之间,大于250米者,接近线性锐减,该分布型,以夏季为主,春秋少,冬季消踪匿迹(出现在夏半年);

(2)图7b自表层直达底层近于线性锐减,与(1)中的250米层以下曲线趋势几乎吻合。元月份频见,2、3、4月零星可见,夏季空白(出现在冬半年)。本文特别强调了流量的上述两种不同分布类型。

至于250米层以下,两曲线演变趋势相当一致表明:受外界扰动(太阳辐射等气象因素的影响)甚小,与温盐密度场分析相符相称。

总之,黑潮流量的变化相当复杂,不但取决于流速大小、流场结构、流幅和厚度等因子,当考虑质量输送时,还涉及密度场的空间分布。计算得出,E断面质量输送最大值是 $54 \times 10^6$ 米<sup>3</sup>/秒(1965年9月),最小值为 $23 \times 10^6$ 米<sup>3</sup>/秒(1965年12月),二者之比为2.3,与GEK流速极值的变幅比相当。

以上作者从E断面黑潮的流速场、流轴结构和流量等时空变化几个侧面作了个例分

析, 指出了各要素变化的异同点. 并对不同区域的黑潮作了类比分析.

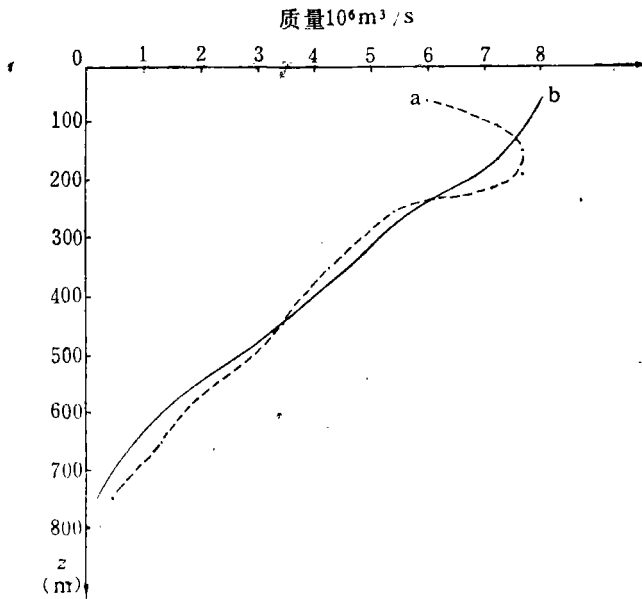


图7 E断面流量曲线冬夏两种分布型

a——1965年8月12日(夏) b——1967年1月13日(冬)

本文承蒙管秉贤研究员审阅, 并给予许多指导, 特此致谢.

### 参 考 文 献

- [1] 小長庚二, 西山勝暢, 石嶋廣, 屋久島南東E線の流量について, 気象研究所報告, 101, 1980, 1—2.
- [2] H. Stommel著, 毛汉礼译, 湾流, 1958.
- [3] 管秉贤, 黑潮流速流量的分布, 变化及其与地形关系的初步分析, 海洋与湖沼, 6 (1964), 3, 229—251.
- [4] 管秉贤, 刘举平等, 东海G断面上二十年来 (1956—1975) 黑潮表层流速的变动, 科学通报, 24 (1979), 21, 990—994.
- [5] 二谷颖男, 南海域に於る最近の黒潮動向, 水産海洋研究会報第24号, 1965, 133—137.
- [6] 増沢讓太郎, 黒潮流速の季節变化の資料, 水産海洋研究会報第24号, 1965, 23—24.
- [7] Покутов, В. В., Сезонная Многолетняя Изменчивость Меандрирования Основной Струи Куро-сио к югу от Японии, Дальн. Гидромет. Ин-т. Вопросы Океанографии Дальневосточных Морей и Северо-Западной Части Тихого Океана, Гидрометеиздат, Ленинград, Труды Вып. 45 (1974), 97—106.
- [8] Taft, B. A., Structure of the Kuroshio, South of Japan, *Journal of Marine Research*, 38 (1978), 1, 77—116.