

137°E 经向断面上的副热带逆流*

顾 玉 荷

孙 湘 平

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

许 兰 英

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘 要 根据 137°E 断面 1967~1995 年间冬、夏两季的温、盐资料, 计算和分析了该断面的地转流和副热带逆流. 主要结果如下: (1) 副热带逆流在冬季和夏季均存在. 冬季, 副热带逆流出现 1 支、2 支、3 支、4 支 4 种形式, 夏季出现 2 支、3 支两种形式, 两季均以 2 支形式占优势. (2) 冬季副热带逆流主要出现在 22°~23°N、26°~27°N 两区间; 夏季主要出现在 21°~22°N、24°~25°N 两区间. (3) 副热带逆流的流速呈带状结构, 多为单束单核, 个别为单束双核形式. 流速具有夏强, 冬弱的特点. (4) 副热带逆流的流量年际差异较大, 多年平均而言, 冬季流量为 $14.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 夏季的为 $22.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. (5) 冬季, 副热带逆流的“源地”与黑潮“源地”同为一体. 前者是台湾省以东黑潮东侧海流的一个分支, 并沿着暖脊、冷槽边缘而东流.

关键词 137°E 断面 副热带逆流 多支性 带状结构

1 引言

1967 年和 1969 年, 日本学者首先在北太平洋西部发现了副热带逆流^[1~4]. 30 a 来, 不仅证实副热带逆流是带有全球性的海洋现象, 同时对副热带逆流的特征、形成机制和原因等作了广泛的研究, 取得较大进展. 但在一个固定断面上, 探讨副热带逆流的多年变异还很少见有报道, 本文拟对 137°E 断面作这方面的尝试.

日本气象厅进行的西北太平洋 137°E 断面调查, 已持续了 30 a. 该断面北起 34°N, 南至 1°S 附近, 横穿黑潮、黑潮逆流、副热带逆流、北赤道流、北赤道逆流、南赤道流 6 支主要的纬向海流. 此文只讨论副热带逆流. 有关 137°E 断面的地理位置、纬向海流的示意模式与实例, 分别绘在图 1.

本文于 1998-06-03 收到, 修改稿于 1998-10-26 收到.

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 49576281).

第一作者简介: 顾玉荷, 女, 60 岁, 研究员, 现主要从事海流、潮流研究.

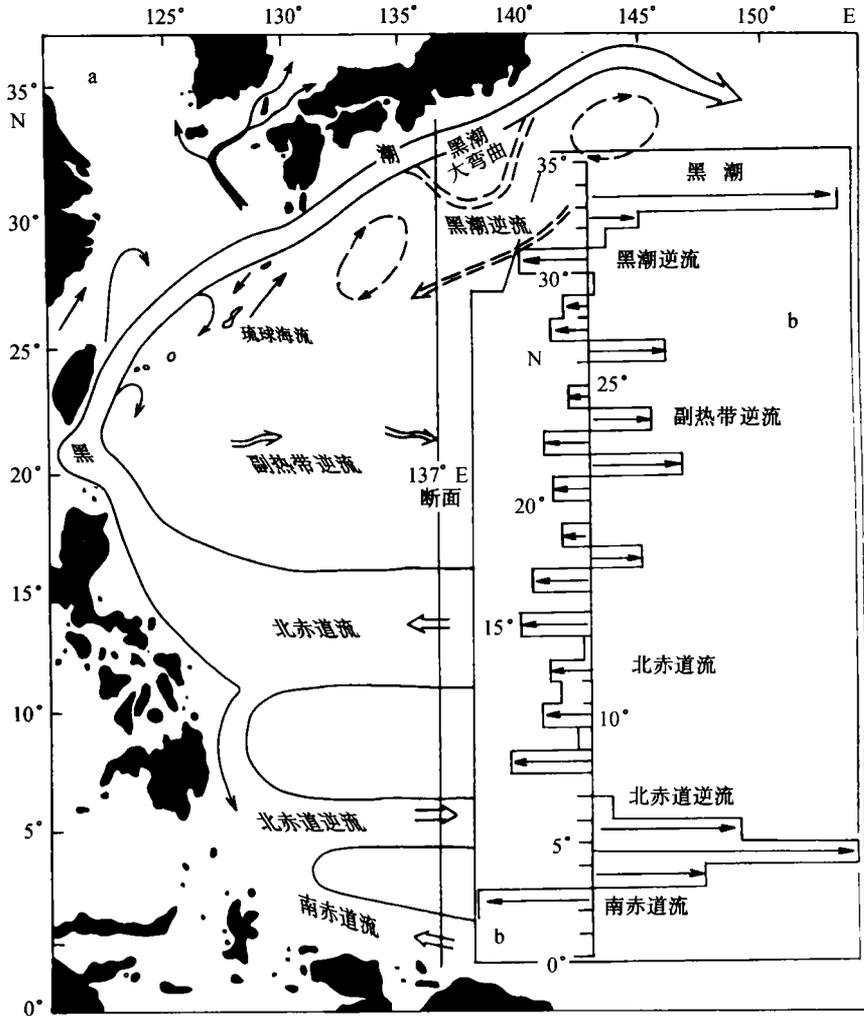


图1 137°E断面的地理位置、6支纬向海流示意分布(a)与实例(1974年6月)(b)

关于副热带逆流,未见有明确的定义和范围.这里以西北太平洋海域的北回归线($23^{\circ}27'N$)为界,分别向北、向南伸展5.5个纬度,即在该断面上,把 $18^{\circ}\sim 29^{\circ}N$ 这一区域视为副热带逆流区,在该区内流速不小于 10 cm/s 的东向流作为副热带逆流.取此范围的理由:(1)南侧的北赤道流的北界,有时达 $18^{\circ}\sim 19^{\circ}N$ 附近,北侧的黑潮,一般位于 $34^{\circ}N$ 附近,但大弯曲发生期间,有时黑潮最南达 $31^{\circ}N$.(2)体现了前人^[5-7]研究副热带逆流的界线.考虑到地转流的计算误差,流速不宜取太小,故暂定流速不小于 10 cm/s .按这样的暂定条件,根据 $137^{\circ}E$ 断面的温、盐资料,计算和分析该断面的地转流,动力零面取 1000 m .资料年限:冬季1967~1995年,夏季1972~1995年(1994年夏季缺测).资料来源,取自“日本气象厅海洋气象观测资料”第41~86号^[8].利用这样长时间系列的资料来分析副热带逆流,尚属首次.限于观测资料为冬、夏季,故文中只讨论冬季和夏季的情形.

2 流路

因篇幅所限,此处取 10 a 为例(图 2). 为了使副热带逆流清晰显目,将图 2 中的西向流部分省略(若西向流保留,结果如图 1b 所示). 分析各年的断面流速结构与海流的纬向分布可知:该断面上每年均有副热带逆流出现,副热带逆流出现的范围很广泛,在 $18^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$ 之间,几乎每个纬度上皆有出现的可能;在时间上,副热带逆流也不连续,即此年在某一纬度上出现后,前一年或下一年并不一定在同一纬度上重复出现,表明副热带逆流的流路十分复杂,稳定性差,变化多端. 但有一个事实非常明显,它决不仅仅是单支海流,而是存在着两支和多支的现象(图 2). 多年的统计结果(表 1)表明:

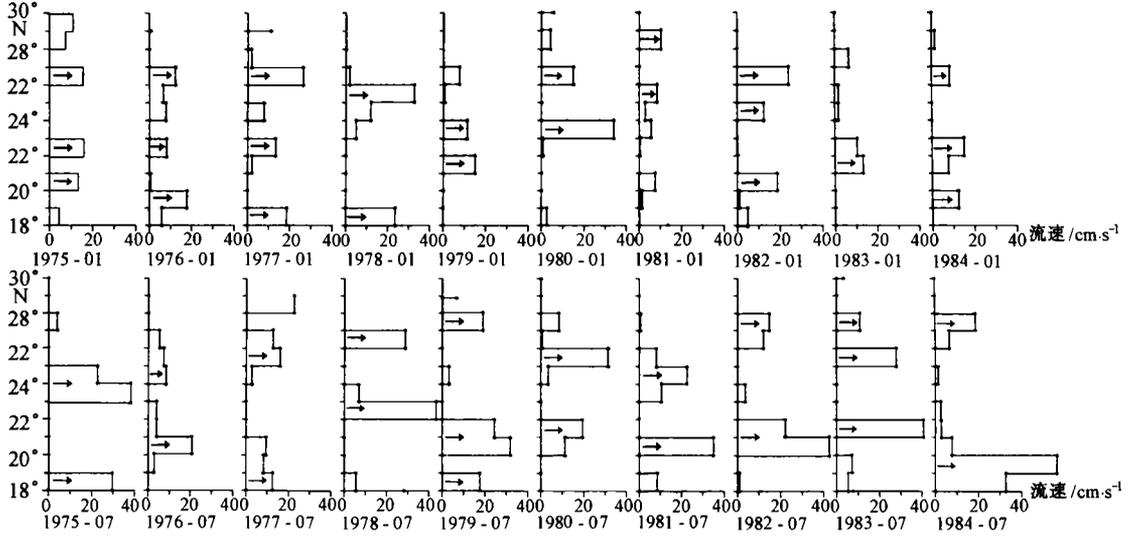


图 2 冬、夏季 137°E 断面上的副热带逆流(表层)(1975~1984 年)

表 1 137°E 断面上副热带逆流出现情况统计

冬季(1月)				夏季(7月)			
分支数	出现年数/a	年 份	出现率/%	分支数	出现年数/a	年 份	出现率/%
1 支	2	1983、1995	6.9				
2 支	16	1968、1969、1970、1971、 1972、1973、1978、1979、 1980、1981、1985、1987、 1988、1990、1991、1993	55.2	2 支	14	1972、1975、1976、1977、 1978、1980、1981、1982、 1984、1985、1988、1989、 1990、1993	60.9
3 支	10	1967、1975、1976、1977、 1982、1984、1986、1989、 1992、1994	34.5	3 支	9	1973、1974、1979、1983、 1986、1987、1991、1992、 1995	39.1
4 支	1	1974	3.4				

冬季,副热带逆流出现 1 支、2 支、3 支、4 支 4 种情况;夏季,只有 2 种情况,即 2 支和 3 支.

各支出现的年份、出现年数和出现率均列入表 1, 表中冬、夏季的出现率, 分别指 29 和 23 a 间某支出现的百分比. 该表说明: 冬季, 137°E 断面上出现的副热带逆流, 以 2 支的形式为最多, 占统计年份的 55.2%; 其次为 3 支形式, 占 34.5%; 1 支、4 支形式最少, 仅占 6.9% 和 3.4%. 夏季的情况与冬季的稍有不同, 主要是 1 支和 4 支的形式没有出现过, 但仍以 2 支的形式占优势, 占统计年份的 60.9%, 3 支的形式约占 39.1%. 这就是说, 从多年平均统计结果看, 无论冬季或夏季, 在 137°E 断面上, 副热带逆流以 2 支的形式出现机会最多, 其次是 3 支, 1 支和 4 支最少. 说明冬季和夏季均有副热带逆流存在.

在纬度上, 副热带逆流是否均匀分布还是比较集中在某个范围? 或叫“多现地段”. 为此, 对该断面每个纬度上副热带逆流出现情况作一统计(图 3). 图 3 中冬、夏季出现次数, 分别指统计年份间某纬度区间出现的次数(1 次/a). 由图看出, 在 18°~29°N 之间, 副热带逆流并不是平均地分布在各个纬度上, 而是出现的机会有明显差异. 现按出现次数多少来排列顺序, 并取百分率在 30% 以上者, 则冬季, 22°~23°N、26°~27°N 这两个区间出现的副热带逆流为最多, 占 48.3% 和 37.9% (记 A 支和 B 支); 21°~22°N 和 19°~20°N 为次多区间, 占 31.0% (C 支). 夏季, 以 21°~22°N、24°~25°N 以及 25°~27°N 区间出现副热带逆流的机会最多, 占 45.5% 和 40.9% (记为 A' 支和 B' 支); 20°~21°N 区间居第三, 占 36.4% (C' 支). 从总的趋势看(图 3), 在 137°E 断面, 冬季副热带逆流出现的纬度区间比较窄而集中, 夏季的比较宽而分散.

N	流速/cm·s ⁻¹	出现次数	排列顺序	百分比/%	
29°	12.1	7	5	24.1	
28°	18.0	5	7	17.2	
27°	15.1	11	2	37.9	→ B
26°	18.3	4	8	13.8	
25°	13.5	8	4	27.6	
24°	17.7	7	5	24.1	
23°	13.4	14	1	48.3	→ A
22°	17.3	9	3	31.0	→ C
21°	18.2	6	6	20.7	
20°	20.2	9	3	31.0	→ C
19°	24.0	5	7	17.2	

N	流速/cm·s ⁻¹	出现次数	排列顺序	百分比/%	
29°	17.5	5	5	22.7	
28°	16.4	5	5	22.7	
27°	20.4	9	2	40.9	→ B'
26°	18.8	9	2	40.9	→ B'
25°	26.2	10	1	45.5	→ A'
24°	22.0	4	6	18.2	
23°	25.2	5	5	22.7	
22°	27.6	10	1	45.5	→ A'
21°	26.8	8	3	36.4	→ C'
20°	30.2	6	4	27.3	
19°	21.7	6	4	27.3	
18°					

图 3 137°E 断面上副热带逆流的纬向分布

莲沼启一和吉田耕造^[6]指出, 在 130~160°E 区域内, 副热带逆流由 3 个东向流组成, 其中心分别位于 19°N、23°N 和 27°N 附近. White 和 Walker^[7]的结果是, 副热带逆流至少由 3 个半永久性的东向地转流组成, 中心分别位于 20°N、24°N 及 26°N 附近. 管秉贤^[1,5]的研究表明: 通过 137°E 断面的副热带逆流, 由 3 支东向流组成, 中心分别位于 19°N、23°N 及 27°N 附近. 本文结果与前人的比较, 似乎有两点差异: (1) 他们未分冬、夏季讨论; (2) 在细节上有所出人.

为了说明 137°E 断面上副热带逆流的多支性, 并探讨与左右两侧的副热带逆流, 在时间、地点上是否同步与连续, 又对 130°E 断面和 155°E 断面作同样的地转流计算, 并与 137°E 断面作比较, 结果表明: 夏季, 在 130°E 断面上, 1980~1986 年的 7 年间, 副热带逆流也存在着 1 支、2 支、3 支; 155°E 断面于 1972~1977 年(缺 1974 年)的夏季, 同样出现 1 支、2 支和 3 支的

副热带逆流。但它们所在的纬度,并不与 137°E 断面上的相同,而是各个断面各个样,时间、地点均不同步。由此可见,副热带逆流为多支性的海流是客观事实。流路的多支性和不稳定性,是副热带逆流的显著特点之一。

3 流速与流量

现以“流路”中提到的 1 支、2 支、3 支、4 支为例,来记述副热带逆流流速结构(图 4)的特点:(1) 该断面上的副热带逆流,流幅较窄,多数为 1~2 个纬度的间距,少数为 3 个纬距。(2) 等流速线的分布形式,多为 U 字型或 V 字型的纬向带状,表层流速大,流幅也较宽,随着深度的增加,流速、流幅逐渐减小、变窄。(3) 断面上的流速结构,多数是与西向流交错分布的,即每两支东向流之间隔有一支西向流;绝大部分的副热带逆流,为单束单核结构,只有个别年份,如 1970 年 1 月和 1972 年 7 月,出现单束双核带状结构。流核出现在表层或近表层。(4) 流速为 10 cm/s 的等流速线,一般位于 0~100 m 或 200 m 深处,少数可达 400~500 m。说明副热带逆流的流层较浅,主要出现在表层和次表层。(5) 单束单核带状结构和多支状态下的副热带逆流,流幅较窄;而单束双核结构和单支、双支状态下的副热带逆流的流幅较宽。

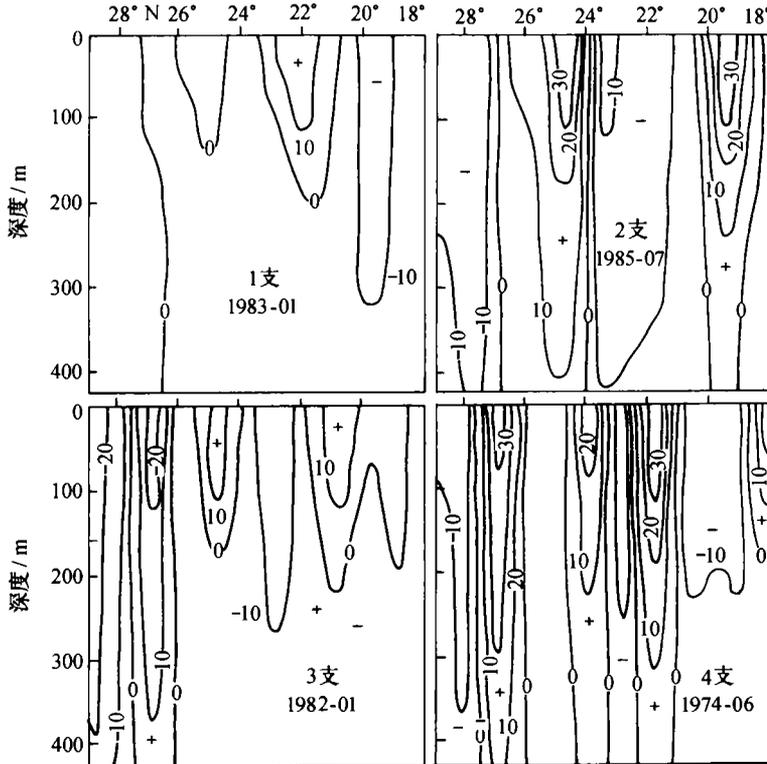


图 4 副热带逆流 1 支、2 支、3 支、4 支的流速(cm/s)结构
(东向流为正,西向流为负)

图 5a 表明,绝大多数年份,夏季的副热带逆流流速大于冬季的流速,只有少数年份,才出现相反的情况。就多年平均而言,该断面上的副热带逆流具有夏强、冬弱的特点,夏季多年平

均流速为 23.8 cm/s, 冬季多年平均流速为 17.1 cm/s, 夏季流速比冬季的要大 1/3 左右. 无论冬季或夏季, 各年的流速差异很大, 峰值年(如 1971 年冬季, 1974 年夏季)的流速与低谷年的(如 1968 年冬季和 1989 年夏季)的流速可相差 1~4 倍. 说明副热带逆流流速的年际差异较大. 夏季的流速多年变化曲线, 其峰值年相间出现为 4 a 左右 1 次, 但冬季的不明显.

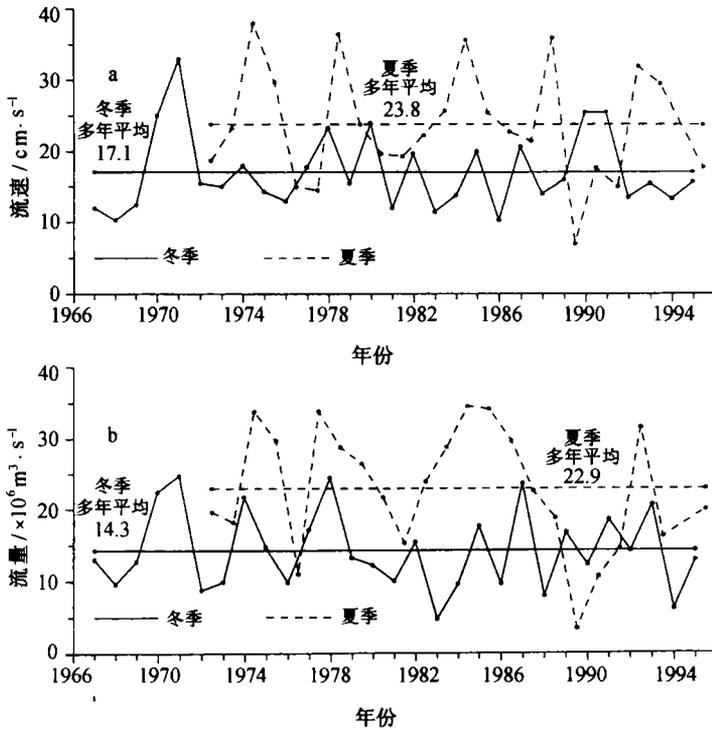


图 5 137°E 断面上副热带逆流流速(平均值)(cm/s)(a) 及流量($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)(b) 的逐年变化(b)

同样, 副热带逆流流速随纬度的分布也是不均匀的, 而是存在着强流速带和弱流速带(见图 3). 该图表明, 冬季, 18°~20°N 之间为强流速带, 尤以 18°~19°N 之间流速最强, 平均为 24.0 cm/s; 相反, 在 22°~23°N、24°~25°N 区间, 为弱流速带. 夏季, 强流速带出现在 19°~21°N 之间; 弱流速带出现在 27°~28°N 区间. 不难看出, 无论冬季或夏季, 副热带逆流的 A 支、B 支、C 支以及 A' 支、B' 支、C' 支其对应的流速虽有强、中、弱 3 种情形, 但最强流速并不出现在这些主要的“多支海流”上.

就多年平均而言, 137°E 断面上 18°~29°N 之间副热带逆流的流量(图 5b), 冬季为 $14.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 夏季为 $22.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. 与流速的变化特点一样, 流量也是夏强、冬弱, 夏季的流量比冬季的要大 40% 左右. 本文第一作者^[9]曾指出, 在 20°~28°N 之间的副热带逆流, 冬季多年平均流量为 $8.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 夏季的为 $17.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 夏季的为冬季的 2 倍. 尽管两种统计的区间有些不同, 但副热带逆流的流量夏强、冬弱的特点是明显的.

再看流量的年际差异(图 5b), 无论是冬季还是夏季, 流量的年际变化较大, 峰值与低谷的流量可相差 1~5 倍. 冬季, 副热带逆流流量的变动范围在 $4.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ~ $24.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间, 最大值出现在 1971 年, 其值为 $24.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$; 最小值为 $4.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 出现在 1983 年. 夏

季,副热带逆流流量的变幅为 $3.4 \times 10^6 \sim 34.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间,最大值发生在 1984 年,为 $34.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$;最小值为 $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,发生在 1989 年. 有趣的是,在 1981 年以前,冬季流量变化的峰值年与低谷年,相隔 4 a 出现一次,但 1981 年以后,这种 4 a 间隔的现象不明显. 夏季的流量逐年变化,无明显规律. 此外,从流量逐年变化的趋势看,除少数年份外,夏季的流量几乎都大于冬季,表明该断面上副热带逆流流量夏强、冬弱的现象,不仅是长期的多年平均的气候式特征^[8],可能也是经常出现的一个特征. 流速的带状结构,是副热带逆流的另一个显著特点.

4 个例分析

迄今为止,CSK 是西北太平洋海域,观测区域最大、测站最密、重复观测次数最多的调查,尤其 1965、1966 年两个夏季和 1965 年 12 月至 1966 年 3 月和 1967 年 1~3 月的冬季调查,资料最为完整. 但与 137°E 断面相匹配的资料,要数 1967 年 1~3 月的调查,此处对该冬的流况作一浅析.

先看海面重力势分布(图 6a),该冬在 $17^\circ \sim 29^\circ\text{N}$ 之间,东西方向上与副热带逆流有关的为三脊一槽的形势:(1) 位于吕宋岛东北约 $17^\circ \sim 19^\circ\text{N}$ 、 $126^\circ \sim 134^\circ\text{E}$ 之间,由 $2.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 线构成一个闭合椭圆状的高脊(记为 a_1 脊). (2) 在台湾省以东,出现一个以 $2.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 线构成的弱脊(b_1 脊). (3) 22°N 以北、 140°E 以东,由 $2.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 线构成一个舌状西伸的高脊(c_1 脊),该脊中心值大于 $2.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$. (4) 在 c_1 脊的北面,由 $2.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 线构成一个椭圆舌状的低槽(d_1 槽),该槽中心值小于 $1.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$. 在 a_1 脊的南面,为一系列平行于纬线的流线,即 $1.8 \sim 2.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 线,

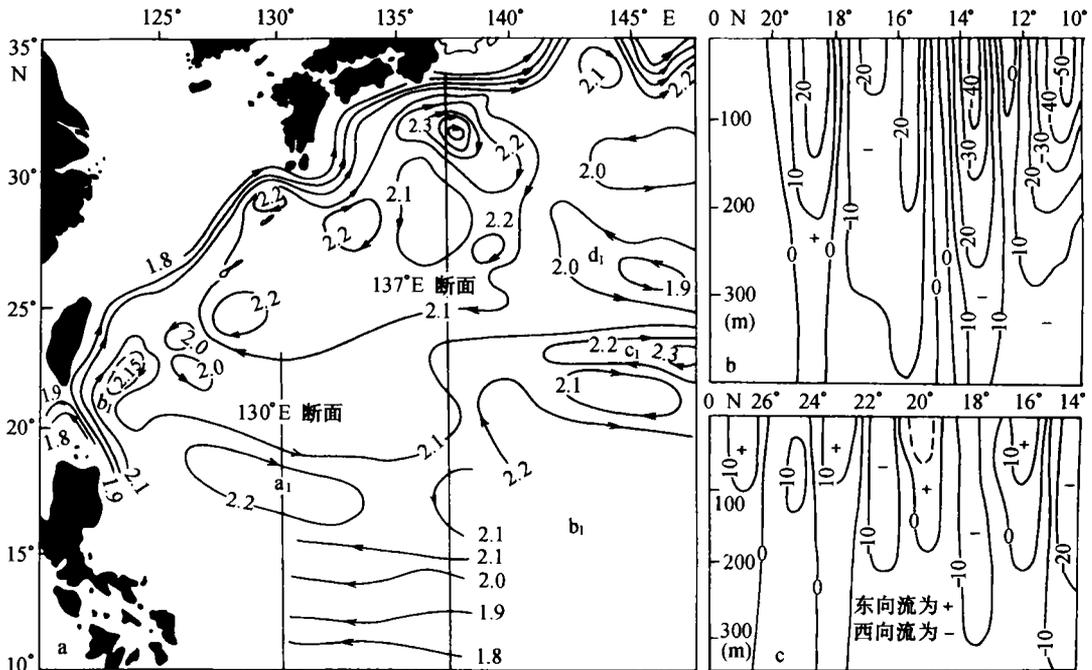


图 6 1967 年冬季西北太平洋海面重力势场^[10](a)及 130°E 断面(b)和 137°E 断面(c)的流速结构
重力势单位为 m^2/s^2 , 以 $1\,000 \times 10^2 \text{ hPa}$ 为重力势零面;流速单位为 cm/s

它们均自东向西,并在吕宋岛东北转而向北,成为黑潮的“源”。其中,2.1 m^2/s^2 线为西向流的北界;而巴士海峡及台湾省东岸附近密集的 1.8~2.1 m^2/s^2 线,可视为黑潮;黑潮东侧的 2.1 m^2/s^2 线,在向西北运行的过程中,在台湾省以东作一反气旋式运转后,于 124°E 附近沿 20°N 纬线东延,并在 137°E 断面附近再次转北,至 23°30'N 附近再折东,然后沿着 c_1 脊的北缘和 d_1 槽的南缘之间继续向东延伸。这条东向的 2.1 m^2/s^2 线,便是副热带逆流。它来自 a_1 脊南缘的 2.1 m^2/s^2 线,并且是该重力势线的延续,与黑潮毗邻,是台湾省以东黑潮东侧海流的一个分支。现把图 6a 与同期 200 m 层的温度场^[10](图略)重叠一在起,则可看出,图 6a 中高脊(如 a_1 脊、 c_1 脊)位置,正好是 200 m 层温度场的暖涡所在地,而上述东向的 2.1 m^2/s^2 线的流动,大体上沿着两个暖涡(a_1 脊、 c_1 脊)的北缘流动,基本上与 200 m 层温度场 19℃ 等温线的走向相当,或者说,沿 200 m 层 19℃ 等温线流动。

再看海面重力势场中有关流线与断面上流速结构的联系。为了比较和叙述方便,把 1967 年 1 月 130°E 断面的流速分布也一并绘入图 6 中,对比图 6a 和图 6b 看出,130°E 断面(见图 6b)上,在 10°~20°N 之间的海流为西向流占优势;只有 18°~20°N 区间才出现东向流,流核大于 20 cm/s。这支东向流,正是图 6a 中 a_1 脊北缘的 2.1 m^2/s^2 线通过之处。到了 137°E 断面(图 6c),有 4 支东向流出现:15°~17°N 区间一支;20°N 附近一支,该支流速很弱($v < 10$ cm/s);22°~24°N 区间一支;26°~27°N 区间一支。其中, a_1 脊北缘的东向 2.1 m^2/s^2 线(见图 6a),两次穿过 137°E 断面,穿越位置大体在 20°N 附近和 23°N 附近,与上面提到的两支东向流位置基本吻合;而 15°~17°N 之间的一支东向流,可能是 a_1 脊东面 2.1 m^2/s^2 线的回流所致;至于 26°~27°N 之间的一支东向流,或许是黑潮脊南侧 2.1 m^2/s^2 线穿越 137°E 断面的缘故。总的来讲,平面图上的流线与断面图上的流速结构,在趋势上还是对应的。

这个例子说明,1967 年 1~3 月副热带逆流的起源部分与台湾以东的黑潮相邻,它是从台湾以东的黑潮东边界分离出来的^[5],绕台湾省以东的弱脊作顺时针旋转,再沿暖脊的北缘东流。由于 1967 年冬在 137°E 断面以西无低槽出现,故该冬 137°E 断面上的副热带逆流很弱,平均流速只有 12~15 cm/s。相反,本例中的低槽(d_1 槽)和高脊(c_1 脊)同时出现在 140°E 以东和 22°N 以北,重力势的梯度在槽、脊之间最大,流速最强,因此,本例中较强的副热带逆流出现在 142°E 以东和 24°N 以北海域^[5]。应当讲,对于 137°E 断面而言,1967 年 1~3 月的副热带流涡结构并不十分典型,而冬季最典型的例子可能要算 1965 年 12 月至 1966 年 3 月。关于 1965 年 12 月至 1996 年 3 月冬季副热带流涡的结构与流况,管秉贤^[5]已作了精辟的分析和深入的研究。冬季,副热带逆流沿着暖脊、冷槽边缘而流动,是它的又一个显著特点。

参考文献

- 1 管秉贤. 副热带逆流二十年研究概况. 黄渤海海洋, 1987, 5(4): 65~72
- 2 管秉贤. 副热带逆流二十年研究概况(续). 黄渤海海洋, 1988, 6(1): 71~86
- 3 Yoshida K, Kidokoro T. A subtropical Countercurrent (II). A prediction of eastward flow at lower subtropical latitudes. J. Oceanogr. Soc. Japan, 1967, 23(5): 231~246
- 4 Uda M, Hasunuma K. The eastward subtropical countercurrent in the western North Pacific Ocean. J. Oceanogr. Soc. Japan, 1969, 25(4): 201~210
- 5 管秉贤. 台湾与菲律宾以东海域冬季的环流结构及其变异. 海洋与湖沼, 1989, 20(5): 393~400
- 6 Hasunuma K, Yoshida K. Splitting of subtropical gyre in the western North Pacific. J. Oceanogr. Soc. Japan, 1978, 34(4):

160~172

- 7 White W B, Walker A E. The influence of the Hawaiian Archipelago upon the wind-driven subtropical gyre in the western North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**(C4): 7 061~7 074
- 8 Japan Meteorological Agency. The Results of Marine Meteorological and Oceanographical Observation, 1968~1995, No. 41~86
- 9 顾玉荷. 西北太平洋 137°E 断面海流的纬向体积输送. *海洋与湖沼*, 1996, **27**(1): 79~85
- 10 Japan Oceanographic Data Center. CSK. Atlas. Vol. 4, 1970

Subtropical countercurrent at the 137°E longitudinal section

Gu Yuhe,¹ Sun Xiangping,² Xu Lanying¹

1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*

2. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266003*

Abstract—On the basis of the observations of temperature and salinity in the winter and summer of 1967~1995 at 137°E section, geostrophic flow is calculated and the Subtropical Countercurrent(SCC) analysed at this section. Main results are as follows: (1) The SCC appears in both winter and summer and exists in the forms of one, two, three or four subbranches in winter and in the forms of two, three subbranches in summer. However, the form of two subbranches dominates in both seasons. (2) The SCC mainly appears between 22°~23°N and 26°~27°N in winter and between 21°~22°N and 24°~25°N in summer. (3) The velocity of the SCC takes in a band structure, mostly in the form of a single bunch and single core and a very few in the form of a single bunch and double cores. The velocity is strong in summer and weak in winter. (4) The interannual variation of the volume transport of the SCC is much large. In regard to multi-year mean value, the volume transport is $14.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ in winter and $22.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ in summer. (5) In winter, the original area of the SCC is same as that of the Kuroshio and is a branch of the Kuroshio east of Taiwan Province, the flowing eastward along the margin of the warm ridge and the cold trough.

Key words 137°E section, Subtropic Countercurrent, multi-subbranches, band structure