

西北太平洋等位势密度面上的东向副热带逆流*

李荣凤** 游小宝

(大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

Peter Chu

(Department of Oceanography, Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943, USA)

摘要 用美国海军高分辨率气候月平均温盐资料和等位势密度面P-矢量方法, 计算了西北太平洋各月等位势密度面环流. 主要讨论西北太平洋副热带流涡内部东向副热带逆流(简称: STCC)的空间分布、垂直结构、体积输送及其附近的涡旋现象. 计算结果很好地再现了STCC的一些观测特征, 并且还揭示了STCC在等位势密度面上呈现的一些新现象: (1) 在 $24.6 \sigma_\theta$ 面上, STCC的空间分布、源地和流动态势都有很强的季节变化, 1~3 月份不存在STCC; (2) 5~10 月, 日本以南黑潮逆流的一个分支汇入了STCC, 使得STCC的流速增强, 流幅显著地加宽; (3) 流速矢量场明显地表现出: STCC和它附近的一些涡旋伴随而生, STCC存在时它附近总伴随着一些涡旋, 当STCC消失时涡旋也就消失了; (4) 通过 137.5°E 断面, STCC的输送量夏季最强, 8 月份最大输送量达 6.9 Sv ($1 \text{ Sv} \equiv 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), 春、秋季较弱, 4 和 11 月份的输送量分别为 1.7 和 1.6 Sv , 输送主要集中在 $24.0 \leq \sigma_\theta \leq 25.0$ 面之间; (5) 纬向流沿 137.5°E 断面的分布表明, STCC的流核位于 $24.3 \sim 24.7 \sigma_\theta$ 之间.

关键词 等位势密度面 P-矢量方法 东向副热带逆流 涡旋现象

经典的Sverdrup理论表明, 北太平洋反气旋式副热带流涡内部为弱的西南或西向流. 上世纪 60 年代后期, 理论上预示出春季在 $20^\circ \sim 25^\circ\text{N}$ 之间存在一支不可思议的窄的东向流. 尽管当时的直接海流观测

证据不足以确定这支东向流是否持久和连续, 但它仍被命名为“副热带逆流”(STCC)^[1]. 对于包括 1965~1966 年黑潮联合调查(CSK)在内的历史水文资料的分析发现, STCC大致沿北回归线向东流, 在地

2003-10-27 收稿, 2004-04-08 收修稿稿

* 中国科学院知识创新工程(批准号: KZCX1-SW-01-16)、国家自然科学基金(批准号: 40076009, 40376039)、中国科学院百人计划(全球环境变化-碳循环研究)、美国海军研究办公室和美国海军水文办公室资助

** E-mail: lirf@mail.iap.ac.cn

转流场上它整年存在. 宽度大约 100 哩, 厚度 300 m. 可自 122°E 追踪到 160°E 或者更靠东. 历史表层流图 (根据 1924 ~ 1934 年收集的日本航海日志资料出版) 也表明 4 个季度在 20° ~ 25°N 之间都存在 STCC^[2].

低纬度副热带东向输送现象也出现在南太平洋、北大西洋和南印度洋^[3]. STCC 可能是一种全球性现象, 因此对于 STCC 的研究有助于更好地理解全球大洋环流系统. 自 STCC 被发现以来, 世界上对于 STCC 的存在性和形成机制的研究一直不断. 最初 20 年中数十篇文献对 STCC 研究的概况表明, STCC 的存在性没有疑义, 但是对其形成机制却众说纷纭^[4]. 因此, 最近 10 多年来, 更多的是通过各种理论模式和数值模式对 STCC 的形成机制进行研究^[5-7]. 在这些研究中, 为了使模式产生 STCC, 往往要给定一些人为的限制, 而且多数模式的分辨率较粗, 因此模式中的 STCC 也未能与观测资料进行比较. 至今, STCC 的空间分布状况仍停留在 STCC 被发现初期时所描述的那样. 另外, 以往对于 STCC 的研究, 大多数都不包括北太平洋西边界海域, 并且缺乏对 STCC 垂直结构的分析, 也没能论述 STCC 的源地. 用简单符号表示的历史表层海流图和海面动力高度图曾经显示出 STCC 在西北太平洋的水平分布, 但是所用的历史资料比较久远^[2]. 最近 30 多年来, 广泛和精确的温盐观测资料应当包含着更多的关于 STCC 的信息. 如果使用包括近 30 多年观测在内的更新的资料对 STCC 的分布状况和垂直结构进行研究, 可能有助于进一步探索 STCC 的形成原因.

使用美国海军高分辨率的气候月平均温盐资料和 P-矢量方法计算了各月等位势密度面上的绝对地转流速. 本文详细地讨论了 STCC 的水平分布、垂直结构和体积输送的季节特征, 着重分析了 STCC 的流动路径以及其附近的涡旋现象, 简要介绍了 STCC 和副热带模态水的空间位置关系.

1 资料和方法

1.1 使用的资料

所用的资料是美国海军的全球气候月平均温盐资料集 (GDEM)^[8]. 水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 取自美国海军海洋观测资料集 (MOODS), 包括了 1930 ~

1998 年期间的 5 百多万条观测廓线. GDEM 对于强的海流切变和季节性变化有很好地描述^[8], 很适用于用来对 STCC 进行研究. 本研究使用的范围是 120 ~ 145°E, 0.5 ~ 50°N. 为了更好地分辨垂直层化结构, 按以下 4 种不同的间隔把观测资料用 3 次样条插值到 246 个层上: 0 ~ 100 m 间隔是 5 m, 100 ~ 1000 m 间隔是 10 m, 1000 ~ 2500 m 间隔是 20 m, 2500 m 以深的间隔是 50 m. 然后把海面 (0 Pa) 作为参照面, 按照各层面上的温度和盐度计算出相应的位势密度 (σ_θ , 单位: kg/m^3). 用 $\Delta\sigma_\theta = 0.025$ 的间隔分层, 在 $22.2 \leq \sigma_\theta \leq 27.725$ 范围内, 每个水柱最多可有 222 个 σ_θ 层.

1.2 等位势密度面 P-矢量方法

等位势密度面上的 P-矢量方法是根据在位势密度面上的守恒性论述^[9]以及 P-矢量概念^[10,11]发展起来, 并首先在南海和大西洋环流研究中得到了应用^[12,13]. 该方法能够计算出各个等位势密度面上的绝对地转流速, 能更直观形象地显示出海洋的流动状况. 较高的水平分辨率和足够密的垂直分层, 不仅能更精细地表示 STCC 的水平分布和垂直结构, 也便于较准确地计算 STCC 的输送量.

2 结果分析

2.1 STCC 的水平分布及其附近的涡旋特征

图 1 给出双月份 $\sigma_\theta = 24.6$ 面上的流速矢量分布 (单月份的图略, 只在文中作简要介绍). 空白区域的南界表示该位势密度面的冬季显露区^[14,15]. 从图 1 可以清楚地看到, 2 月份, 除了部分北赤道流的流动路径出现弯曲以外, 整个区域是一派西向流, 既没有涡旋, 也没有 STCC 的影子. 1 和 3 月份与 2 月份的情况非常类似. 4 月份, 128°E 以东在 21 ~ 25°N 之间连续的东向流对应于理论预测的 STCC; 在 18 ~ 23°N 及 128 ~ 140°E 区域内, 一个以 STCC 为其北翼的尺度较大的涡旋内有 3 个小涡旋, 其中心分别在 22.5°N 和 130°E, 22°N 和 135°E 以及 18.5°N 和 132°E 附近. 6 月份, 在 20 ~ 25°N 范围内 STCC 从 128°E 连续向东流到计算区域的东边界. 在 128 ~ 138°E 之间, STCC 似乎主要由一个反气旋式涡旋的北翼组成. 东海黑潮与其以东的黑潮逆流组成的较大的再循环系统十分

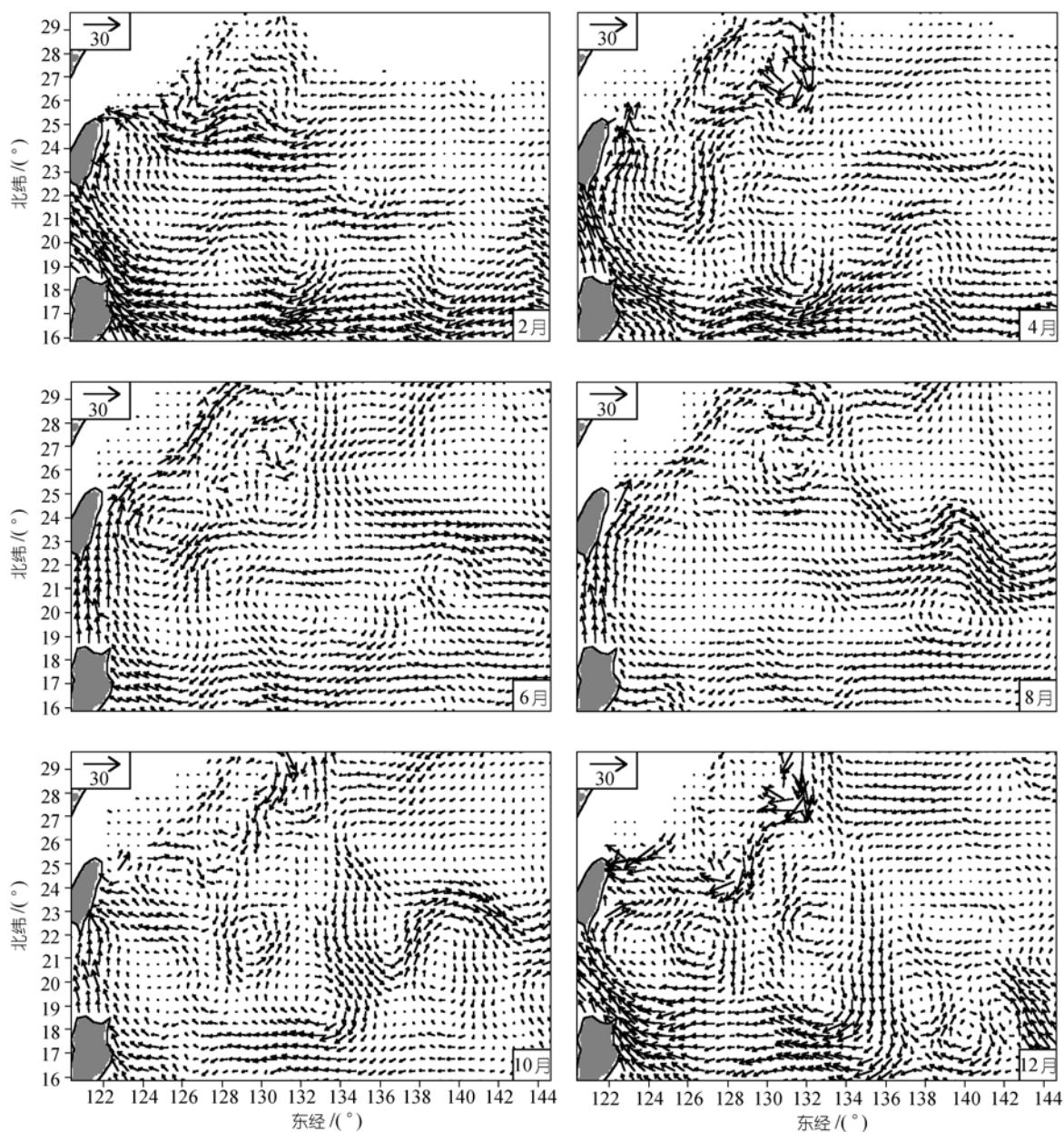


图 1 双月份在 $\sigma_\theta = 24.6$ 面上的绝对流速矢量(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

明显。值得注意的是, 在 26°N 及 133°E 附近, 黑潮逆流分出一个分支向东南流动并逐渐汇入 STCC, 使得 STCC 的流速增强, 流幅明显加宽。STCC 从西到东的流动路径逐渐向东北倾斜, 与早期的观测现象一致。5 月份和 6 月份的情况几乎一样。8 月份, STCC 源自台湾以东的 $23 \sim 25^\circ\text{N}$ 之间, 并且连续地流到 144°E 以

东。STCC 以南有 3 个涡旋, 其中心分别在 22.5°N 和 125°E , 20°N 和 132°E 以及 20°N 和 139°E 附近。这 3 个涡旋不仅影响着 STCC 的流动路径, 似乎也为 STCC 提供水源, 以致于使得 STCC 呈现出明显的顺流增强的态势。日本以南的黑潮逆流, 在向西南流动的过程中不断有分支向南或向东南转向, 最终也汇入 STCC。

使得在 136°E 以东 STCC 的流速强度甚至超过了北赤道流和东海黑潮。7 和 9 月份的流动状况基本上与 8 月份的情况相同。10 月份, STCC 的流动路径出现最为明显的弯曲。在 $133 \sim 141^{\circ}\text{E}$ 之间, STCC 的流轴从南向北跨越 3 个纬度, 这可能是因为受到两个涡旋挤压的结果。这两个涡旋分别以 19°N 和 133°E 以及 20°N 和 139°E 为中心。这个月份, STCC 主要源自黑潮逆流在 26°N 及 134°E 附近向南的分支。日本以南的黑潮逆流向东南流动并逐渐汇入 STCC 的现象与上世纪 80 年代初的发现一致^[16]。12 月份, STCC 似乎被黑潮逆流向南的一个分支截成东西两部分: 137°E 以东的 STCC 较弱, 流轴在 23°N 附近; 西部的 STCC 流速较强, 源自台湾东南 122°E 附近的黑潮, 然后逐渐向东和东北流动, 大概在 25°N 及 133°E 附近向北转, 沿着 133°E 经度线朝着日本流去。西部的 STCC 以南也有两个小涡旋, 其中心在 22°N 和 126.5°E 以及 22.5°N 和 132°E 附近。11 月份, 137°E 以东的 STCC 与 12 月份类似, 但是比 12 月份的流速强, 而西部的 STCC 并不存在。在 135°E 附近黑潮逆流向南的一个分支仍然存在, 只是不像 12 月份的那样在 17°N 附近都向西汇入北赤道流, 而是有一部分水在 18°N 附近转向东流, 在 143°E 附近又转向北流, 然后与北面的 STCC 合并。就是说, 11 月份 STCC 有南北两支, 流轴分别在 18°N 和 23°N 附近。

图 2 为 6 月份 $\sigma_{\theta} = 25.8$ 面上的流速矢量分布。可以看到, STCC 不再存在, 涡旋也都消失了, 只有北赤道流、黑潮和黑潮逆流仍然清晰可见。副热带流涡内部的水几乎不再流动或微弱地向西流动。其他月份几乎和 6 月份的情况类似。所以, 图 2 代表了全年在 $\sigma_{\theta} = 25.8$ 面上的流动情况。这也说明 STCC 只存在于比 $\sigma_{\theta} = 25.8$ 浅的位势密度面上, 是一支较浅的东向流, 与早期的观测结果一致^[2]。

2.2 STCC 的垂直结构

图 3 给出双月份纬向流速沿 137.5°E 断面的分布。图中正值代表东向流, 负值代表西向流。本文用最大流速所在层上的 1 cm/s 等值线来界定 STCC 的流幅宽度, 并用这个等值线来定义存在 STCC 最深的位势密度层。可以看到, 2 月份, 26.5°N 附近 $25.3 \sigma_{\theta}$ 面周

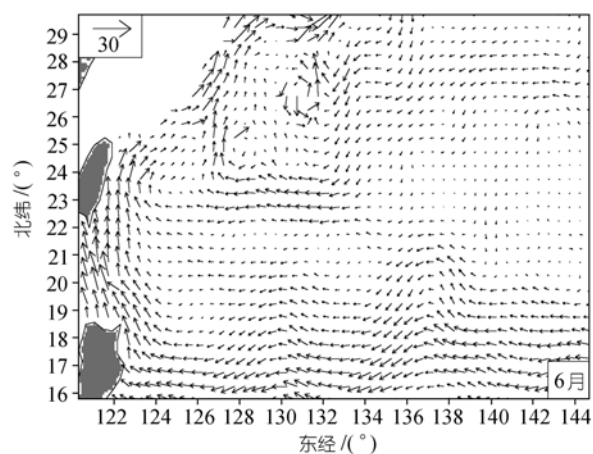


图 2 6 月份在 $\sigma_{\theta} = 25.8$ 面上的绝对流速矢量
(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

围的一小块非常弱的东向流只对应于黑潮逆流向东南的一点弯曲。2 月份这个断面并不存在 STCC。4 月份, STCC 只有一个流核在 $24.5 \sigma_{\theta}$ 及 23.5°N 附近, 流幅较窄位于 $22 \sim 25.5^{\circ}\text{N}$ 之间, 最大流速大于 7 cm/s , 存在 STCC 的位势密度面最深不超过 $25.1 \sigma_{\theta}$ 。6 月份, 有两支东向流, 南支较弱, 流核位于 $23.0 \sigma_{\theta}$ 及 17.5°N 附近; 北支较强, 流核位于 $24.5 \sigma_{\theta}$ 及 23.5°N 附近, 流幅位于 $21.5 \sim 25.5^{\circ}\text{N}$, 最大流速大于 9 cm/s , 存在 STCC 的位势密度面最深不超过 $25.5 \sigma_{\theta}$ 。8 月份, 近表层有 3 支东向流被弱的西向流分隔: 最南的一支较弱位于 19°N 以南, 流核在 $23.0 \sigma_{\theta}$ 和 17.5°N 附近, 另外两支随深度增加很快合并在一起, 并行成 STCC 的主体, 其流核位于 $24.3 \sigma_{\theta}$ 及 22.0°N 附近, 流幅最宽位于 $20 \sim 25^{\circ}\text{N}$, 最大流速大于 12 cm/s , 存在 STCC 的位势密度面最深不超过 $25.6 \sigma_{\theta}$ 。10 月份, 上层被西向流分隔成的带状结构更为明显, STCC 的流核位于 $24.7 \sigma_{\theta}$ 及 23.5°N 附近, 流幅在 $20 \sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间, 最大流速大于 7 cm/s , 存在 STCC 的位势密度面最深不超过 $25.4 \sigma_{\theta}$ 。12 月份, 有两支东向流, 但都不是真正的 STCC。对比图 1 可以看到, 18°N 附近的东向流对应于一个气旋式涡旋的南翼, 23.5°N 附近的东向流只是东部 STCC 的源头部分。就是说这个月份, 137.5°E 断面并没有真正穿过 STCC。

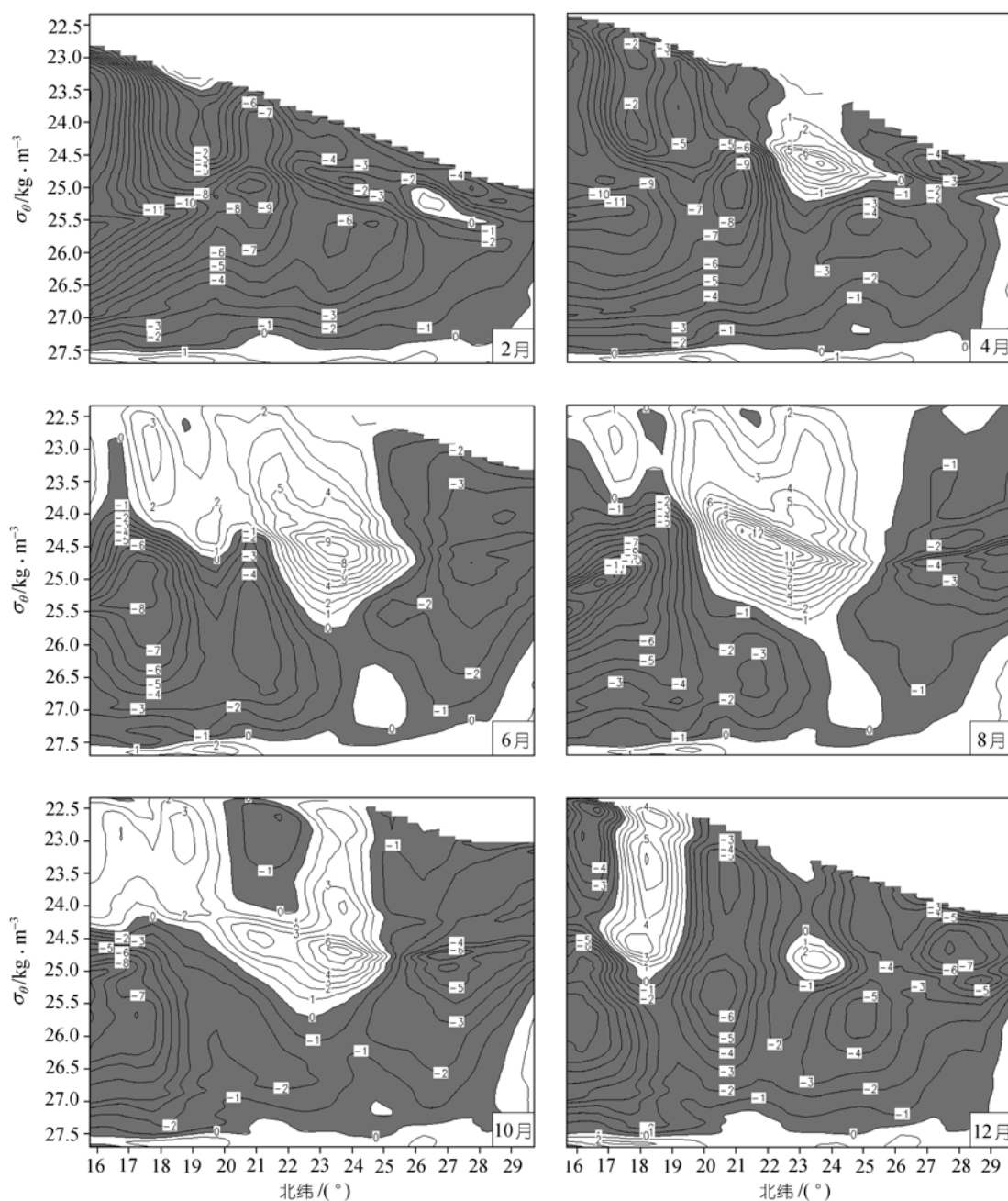


图 3 双月份纬向流沿 137.5°E 断面的分布(单位: $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.3 STCC 向东的输送量

图 4 是 STCC 穿过 137.5°E 断面向东的输送量. 图 4(a) 是 27.0 σ_θ 面以上整个水柱在 18°~26°N 之间东向输送的总和. 可以看到, STCC 的总输送有明显的季节变化: 夏季最强, 8 月份有最大输送为 6.9 Sv;

春、秋季较弱, 4 月份的输送为 1.7 Sv, 11 月份的输送为 1.6 Sv; 冬季(特别是 1 和 2 月份)微弱的东向输送只相应于流动路径的向东弯曲, 并不真正代表 STCC 的东向输送. 图 4(b) 为 4 个密度层上 STCC 向东的输送. 4 个密度层分别是: 第 1 层, $22.3 \leq \sigma_\theta \leq 24.0$;

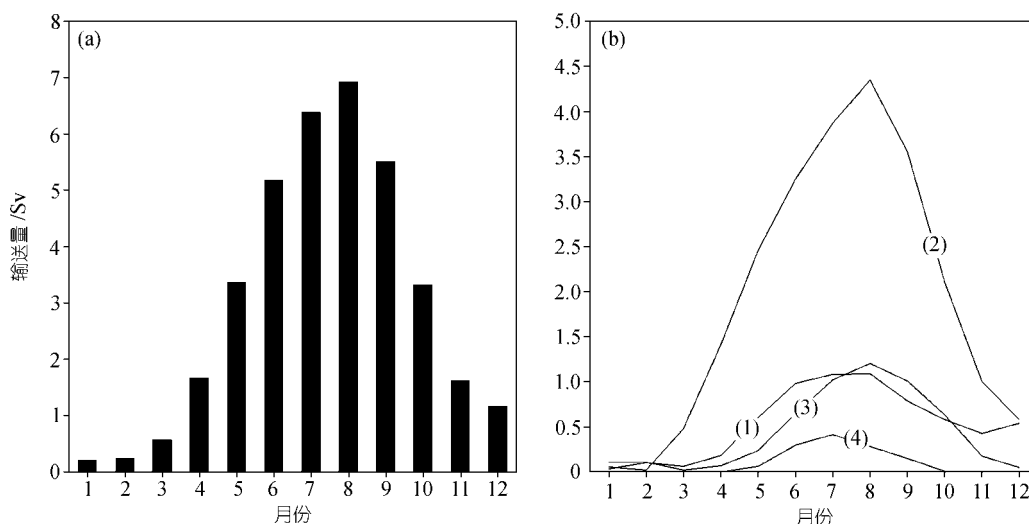


图 4 副热带逆流穿过 137.5°E 断面向东的总输送(a)和分层输送(b)(单位: Sv).

第 2 层, $24.0 \leq \sigma_\theta \leq 25.0$; 第 3 层, $25.0 \leq \sigma_\theta \leq 26.0$; 第 4 层, $26.0 \leq \sigma_\theta \leq 27.0$. 从图 4(b)可以清楚地看到, 除 1 月和 2 月份以外, 其他月份通过这个断面的东向输送主要集中在第 2 层. 以 8 月份为例, STCC 在第 2 层有最大输送 4.4 Sv, 占整个输送的 64%. 输送主要集中在第 2 层并不奇怪, 因为 STCC 的流核位于 24.3 和 $24.7 \sigma_\theta$ 之间, 正好在第 2 层中. 5~10 月份, 无论 STCC 的总输送和分层输送都显著增强, 是因为黑潮逆流分支的汇入.

2.4 STCC 与副热带模态水(STMW)的空间关系

早期的观测发现, STCC 以北主温跃层和季节温跃层之间, 在大约 $100 \sim 400$ m 深度上, 有一个温度和盐度都均匀的水层, 那就是 STMW. 因此, STCC 位于 STMW 的南界附近^[2]. STMW 可以用温盐均匀来表征, 也可以用位势涡度最小来表征. 在西太平洋的 $\sigma_\theta = 25.4$ 位势密度面上, STMW 对应于一块位势涡度在垂向和侧向都是最小的低位涡区域^[14]. 图 5 给出 4 月份位势涡度沿 137.5°E 的分布. 可以看到, 2.5×10^{-12} cm/s 封闭等值线所包围的低位涡区域就是 STMW 所在的位置. 从图 1 和图 3 知道, 4 月份 STCC 的流核在 $24.5 \sigma_\theta$ 及 23.5°N 附近, 对应于图中大黑点所在的位置. 图 5 清楚地表明 STCC 位于 STMW 南界的上面, 可以说与观测结果相当一致. 值得指出的是, 图 5 中低位

涡区域所表明的 STMW 各个月份都存在, 只是范围大小不同. 从前面的叙述中我们知道, 1~3 月份并不存在 STCC. 这个结果似乎意味着, STCC 存在时它就位于 STMW 南界的上面, 但是当 STMW 存在时也可能并不出现 STCC.

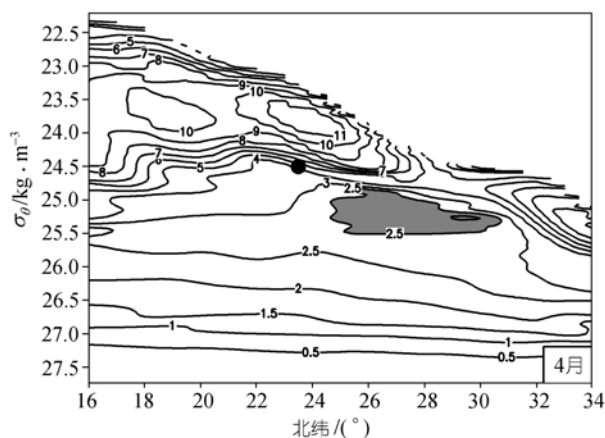


图 5 4 月份在 137.5°E 断面上位势涡度的分布
(单位: $10^{-12} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

3 讨论和结论

(1) 至今, 对于 STCC 的直接海流观测证据仍然很少, 因此很难根据海流观测来给出 STCC 的空间分布状况. 本文由观测水文资料计算的等位势密度面

上的流速矢量分布展示了STCC, 它所在的位置与以前的观测和研究结果十分一致, 但是流动态势呈现出更丰富的变化. 由于受涡旋的影响, STCC呈现弯弯曲曲的流动路径. 最早观测发现的STCC流动路径自西向东稍稍向东北倾斜的现象只在 4 ~ 10 月份出现于 133 ~ 140°E区域. 在 7 ~ 9 月份, STCC源自台湾以东的黑潮, 并在 20 ~ 25°N之间弯弯曲曲、连续地向东流到研究区域的东边界. 除 1 ~ 3 月份以外, 其他月份STCC的源地东移. 有时, 比如 12 月份, STCC分成东西两部分, 11 月份分成南北两支.

(2) 计算的流速矢量显示出, STCC和涡旋伴随而生. 当STCC存在时, 在它附近总出现一些涡旋; 当STCC消失时, 它附近的涡旋也就消失了. STCC附近的涡旋场可能与斜压不稳定过程有关^[17]. 换句话说, STCC附近的位势涡度分布是斜压不稳定形式. 因此, 涡旋活动相当活跃^[6]. 本文中, 与STCC伴随而生的涡旋总是出现在东向的STCC和西向的北赤道流之间, 可见流速的强切变对于涡旋的产生也可能起着重要的作用. 实际上, 涡旋的产生和消亡受多种因素的影响, 是一个复杂的动力学问题. 需要弄清楚的是, STCC的存在与涡旋有什么内在的联系? 涡旋产生和消亡的真正原因又是什么? 对这些问题的研究可能有利于探索STCC的形成机制.

(3) 主要研究了 145°E以西的西北太平洋区域中的STCC. 由于受资料的限制, 这是以往大多数研究未能揭示的部分. 用符号表示的 4 个季度的表层流图包括了本研究的区域, 并显示出STCC整年存在^[2]. 应当说, 在西北太平洋二者所显示的STCC的分布有很多类似的地方, 只是本文给出的STCC的流动状况更为复杂. 值得指出的是, 本研究的结果中只有 1 ~ 3 月份不存在STCC. 1 ~ 3 月份中微弱的东向输送只相应于局地涡旋或流动路径向东的弯曲. 这 3 个月份不存在连续的STCC, 这一现象耐人寻味, 值得深入研究.

(4) 只根据纬向流的断面分布研究 STCC 有很大的局限性, 因为断面上显示的东向流并不能说明有

一支连续的东向流, 更不能说明存在 STCC. 有时断面上的东向流只是局地涡旋的一翼或是一支海流的局地转向的表现形式.

参 考 文 献

- 1 Yoshida K, Kidokoro T. A subtropical counter-current in the North Pacific—An eastward flow near the Subtropical Convergence. *J Oceanogr Soc Japan*, 1967, 23 (2): 88~91
- 2 Uda M, Hasunuma K. The eastward subtropical countercurrent in the Western North Pacific Ocean. *J Oceanogr Soc Japan*, 1969, 25 (4): 201~210
- 3 Yoshida K, Kidokoro T. A Subtropical Countercurrent (II)—A prediction of eastward flows at lower subtropical latitudes. *J Oceanogr Soc Japan*, 1967, 23 (5): 231~246
- 4 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
- 5 Kubokawa A. A two-level model of subtropical gyre and subtropical countercurrent. *J Oceanogr*, 1997, 53: 231~44
- 6 Kubokawa A. Ventilated thermocline strongly affected by a deep mixed-layer: A theory for Subtropical Countercurrent. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 1314~1333[DOI]
- 7 Kubokawa A, Inui T. Subtropical Countercurrent in an idealized ocean GCM. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 1303~1313[DOI]
- 8 Teague W J, Carron M J, Hogan P J. A comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies. *J Geophys Res*, 1990, 95: 7167~7183
- 9 McDougall T J. Neutral-surface potential vorticity. *Prog Oceanogr*, 1988, 20: 185~221[DOI]
- 10 Chu P C. P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data. *Mar Tech Soc J*, 1995, 29 (3): 3~14
- 11 McDougall T J. The influence of ocean mixing on the absolute velocity vector. *J Phys Oceanogr*, 1995, 25: 705~725[DOI]
- 12 Chu P C, Li R F. South China Sea isopycnal-surface circulation. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 2419~2438[DOI]
- 13 Chu P C. P-vector spirals and determination of absolute velocities. *J Oceanogr*, 2000, 56: 591~599[DOI]
- 14 Talley L D. Potential vorticity distribution in the North Pacific. *J Phys Oceanogr*, 1988, 18: 89~106[DOI]
- 15 杜 岩, 王东晓, 施 平. 大洋环流的通风温跃层研究进展. *地球科学进展*, 2000, 15 (3): 266~270
- 16 Tsuchia M. On the Pacific upper-water circulation. *J Mar Res*, 1982, 40 (suppl): 777~799
- 17 Bo Qiu. Seasonal Eddy Field Modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29: 2471~2486[DOI]