第24卷 第3期
2000 年 5 月

大 气 科 学
Chinese Journal of Atmospheric Sciences

Vol. 24, No. 3
May 2000

北太平洋副热带逆流的气候特征*

刘秦玉　　杨海军　　鲍洪彤

（青岛海洋大学物理海洋研究所，青岛　266003）

李　薇

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

摘　要　分析了从 1992 年 10 月到 1996 年 10 月的 TOPEX／POSEIDON 卫星高度计和 POCM 模式输出的海平面高度（SSH）资料、Levitus 气候平均温盐资料、NCEP／NCAR 再分析纬向流资料以及沿 137°E 剖面的海流资料。分析结果表明，在年平均和月平均意义下，向东的副热带逆流（STCC）位于 18°N～25°N、130°E～157°W 间 150 m 以内的海洋上层，其强度大约为 0.02～0.04 m／s，在西太平洋夏季（7 月）最强，冬季（1 月）最弱。在 STCC 以下 650 m 以上，还存在一支向西的流，流速也约为 0.02～0.04 m／s。在 STCC 区域内，SSH 有明显的准 90 天振荡。在天气时间尺度上，一些气旋和反气旋涡出现在 STCC 海域，使该海域的流在方向和强度上变化很大。

关键词：副热带逆流；气候特征；准90天振荡；北太平洋

1　引言

Yoshida 和 Kidokoro[1]发现在北太平洋副热带环流系统的内区（特别是西部 20°N～30°N 之间）存在着一支东向流，并定义其为副热带逆流（STCC）。他们通过分析认为这支东向流与反气旋风应力涡度在 25°N 附近与一个槽有关。Uda[2]发现副热带逆流位于北太平洋副热带区域（20°N～25°N），并与次表层热锋密切相关。自此以后，人们改变了对副热带环流单涡结构的传统认识，根据各自的观测资料，提出了副热带环流双涡、多涡性的各种观点。由于观测资料在时间和空间上的局限性，数值模式分辨率不高、模式过于简化等原因，使得对副热带逆流的时空特征并没有统一的认识[3,4]。

90 年代以来，特别是近 5 年，TOPEX／POSEIDON 卫星高度计资料给人们提供了重新认识副热带环流的观测依据，而与之同时发展的高质量、高分辨率的全球海洋环流模式（OGCM）又给人们研究副热带环流提供了一种有用的工具。

Qiu[5]针对 T／P 资料进行分析发现向东的 STCC 是一个变化非常大的纬向流，该流平均涡动动能达到黑潮延伸体处的平均涡动动能的一半，并指出 STCC 的这种变化是由于斜压不稳定造成。

他们的研究结果指出了 STCC 的可变性，但从气候平均意义上 STCC 是否为一支永久性的东向流，其流速，位置是否有变化以及怎样变化，目前尚无定论。针对以上问

1999-01-20 收到，1999-09-06 收到再改稿

* 本研究得到国家自然科学基金资助项目 49976004 和中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室开放课题"北太平洋副热带逆流及其形成机制的数值模拟研究"共同资助

题，利用 TOPEX／POSEIDON 高度计资料、Levitus 温盐资料[6]、高分辨率的海洋环流模式（POCM）输出的 SSH 结果和 NCEP／NCAR 再分析纬向流 1980～1995 年月平均资料及日本气象厅发布的 137°E 断面部分海流观测资料，给出 STCC 的时空分布的气候特征及与之有关的季节内振荡。

2 资料及计算方法

2.1 TOPEX／POSEIDON 卫星高度计

卫星高度计能够提供全球海平面高度的数据，TOPEX 卫星每 9.9156 天扫描全球一次，不断地重复，每重复一次为一个循环。将其观测值与 Geosat 卫星的观测值对比、订正，并扣除大地水准面、潮汐和其他因素的影响，通过分析可以获得每 10 d 一次（1992 年 10 月 7 日到 1996 年 1 月 10 日）空间格距为 2 个纬度×2 个经度全球海平面高度（SSH）的网格点资料。扣除 SSH（T／P）的年循环并对其进行功率谱和最大熵谱分析。

2.2 POCM 模式输出的 SSH 资料

POCM 模式也称 Semtner & Chervin 模式，由美国海军研究生院研制，是 WOCE 国际合作计划的一部分。POCM 模式的水平分辨率为 0.25°×0.25°，垂直分为 20 层，海表为自由面，SSH 是预报变量。该模式现已推出 POCM−4A 和 POCM−4B 两个版本。其中 POCM−4A 是以 Levitus 气候月平均温盐资料以及由此求得的海表面热盐通量、ECMWF 逐月风场等实测资料做为强迫场进行积分。POCM−4A 运行 1986～1989 年共 3 年，在它的运行结果基础上 POCM−4B 继续积分至 1996 年。POCM−4B 的主要改进在于以 ECMWF 的逐日风场代替逐月风场，海面温盐场利用经过改进的 Levitus 资料，通过分析得到月平均的海面热盐通量[7]。

本文分析的 SSH 资料是 POCM−4B 的输出结果，1992 年 10 月 3 日至 1996 年 10 月 9 日，10 天平均共 148 个时次，该资料同 T／P 海面高度资料相比二者空间结构大致相同[8]。因此本文利用 SSH 资料根据地转关系计算了地转流。

2.3 137°E 断面海流资料

根据 1992、1993 年日本气象厅发布的 Ryofu Maru 调查船观测的海流资料，对 1990 年和 1991 年冬季（1 月）和夏季（7 月）沿 137°E 断面表层 50、100、150 和 200 m 的海流分布进行整理。

2.4 Levitus 资料

本文利用 Levitus 气候月平均温盐资料，计算了各个层次上的密度流。Levitus 资料水平分辨率为 1°×1°，垂直方向有 31 个等深层，分别为 0、10、20、30、50、75、100、125、150、200、250、300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200、1 300、1 400、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500、4 000、4 500 和 5 000 m。根据 Chu[9]发展的 P−Vector 方法，直接从温盐资料计算出各个层次的绝对速度。这种方法的物理基础是位势密度和位势涡度守恒，因此对于气候平均的水文资料，P−Vector 方法给出的绝对速度精度较高[10]。

2.5 NCEP/ NCAR 再分析资料

美国国家环境预报中心（NCEP）和美国国家大气科学研究中心（NCAR），合作收集的 1980～1995 年热带太平洋海洋次表层资料，已由中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室进行加工整理。该资料水平网格距离为 1.5°（纬向）和 1°（经向），从海面向下 5～3 126 m 垂直 27 层。本文计算了 1000 m 以上各标准层纬向流的月气候平均值。

3 副热带逆流年平均及季节变化特征

POCM 海面高度资料同 T／P 海面高度资料相比二者空间结构大致相同[7]，从 POCM 模式得到的 4 年平均的 SSH 场的水平分布可见（图略），沿 23°NSSH 场有一个低值"槽"，沿 18°N 的 SSH 场有一个高值"脊"。因此，在 18°N～23°N、130°E～150°W 区域应存在一支东向的流，其中心位置在 20°N。这就是 Kidokoro 定义的副热带逆流（STCC）。从逐月 SSH 水平分布（4 年平均值）（图 1）及相应的地转流（图 2）来看，SSH 的位置几乎不随季节变化，在西太平洋（130°E～150°E）其强度有一定变化，STCC 夏季最强冬季最弱。

根据 Levitus 温度、盐度资料进行的 P 矢量逆转海流计算也可得到类似的副热带环流的年平均和季节变化特征。图 3 是 P 矢量逆转计算得到的纬向流在 6 个不同经向剖面的值及其季节变化。从图 3 可见，在 20～25°N 之间的确常年存在着一支气候平均意义下的东向流。该流在 137°N 断面上独立存在，一直向东到达 167°W 以东，而从 149°W 剖面上则不可能观测到较明显的 STCC。STCC 在 145°E 附近最明显，流速一般在 0.02 m／s，最大时达到 0.04 m／s。在西太平洋 137°E 和 145°E 断面上表现为夏季强，冬季弱的特点。该流出现在 150 m 以上的海洋上层。在其以下至 650 m 以上深度出现与之流速相当（0.02～0.04 m／s）、方向相反的西向流，该流是北赤道流（NEC）的一部分。

根据 NCEP／NCAR 再分析纬向流（1980～1995 年）月平均资料，也可得到类似的结论（图 4）。NCEP／NCAR 再分析资料在 145°E、180° 和 167°W 断面上都有向东的纬向流（副热带逆流），其出现的位置、季节变化趋势都与 P 矢量逆转海流计算的结果相同，但流速比根据 Levitus[6]温度、盐度资料进行的 P 矢量逆转海流计算的流速略弱，为 0.01～0.02 m／s，有时也能达到 0.04 m／s（例如 7 月 167°W 处）。

以上 3 种不同资料都表明年平均和月平均意义下，STCC 位于 18～25°N，130°E～157°W 间 150 m 以内的海洋上层，其强度大约为 0.02～0.04 m／s。在西太平洋夏季（7 月）最强冬季（1 月）最弱。

4 副热带逆流区的季节内变化特征

从 SSH 的月平均值可确定 STCC 的存在和估算其强度。事实上，在季节内时间尺度上，SSH 的变化在该区域内十分明显。

SSH (T／P)资料的功率谱表明，80～109 天周期所对应的谱方差（variance）占

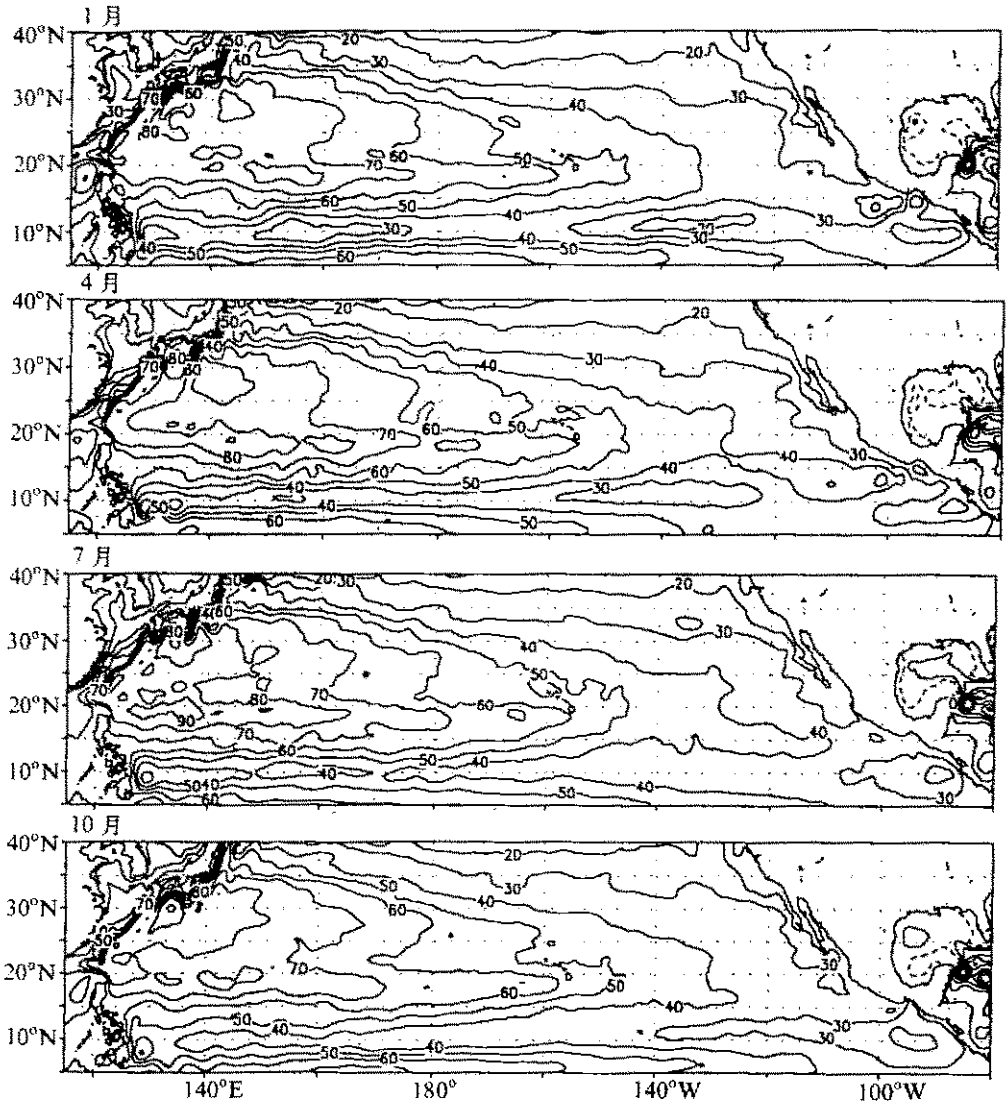

图1 POCM模式计算的北太平洋月平均海平面高度（SSH）场
（1992年10月～1996年10月的平均值 单位：cm）

总方差（total variance）的比值超过0.3出现在热带太平洋近赤道（off-equator）海域，其中心位置分别是20°N和20°S，而在10°S～10°N的赤道太平洋上比值小于0.3，比值超过0.4出现在北太平洋西部（130°E～170°W）近赤道海域，该海域正是副热带逆流区，在此其余季节内振荡对应的谱方差占总方差的比值都小于0.2（图略）。

为了进一步证实功率谱分析结果的可靠性，对TOPEX资料进行了最大熵谱分析。分析结果表明：沿着24°N，TOPEX资料的84～119 d周期所对应的谱方差值（谱值）最大（120°E～140°W），西太平洋谱值远大于东太平洋；沿着19°N，TOPEX资料的84～119 d周期振荡有较大的方差（117°E～150°W），而45～65天周期的振荡在西边界

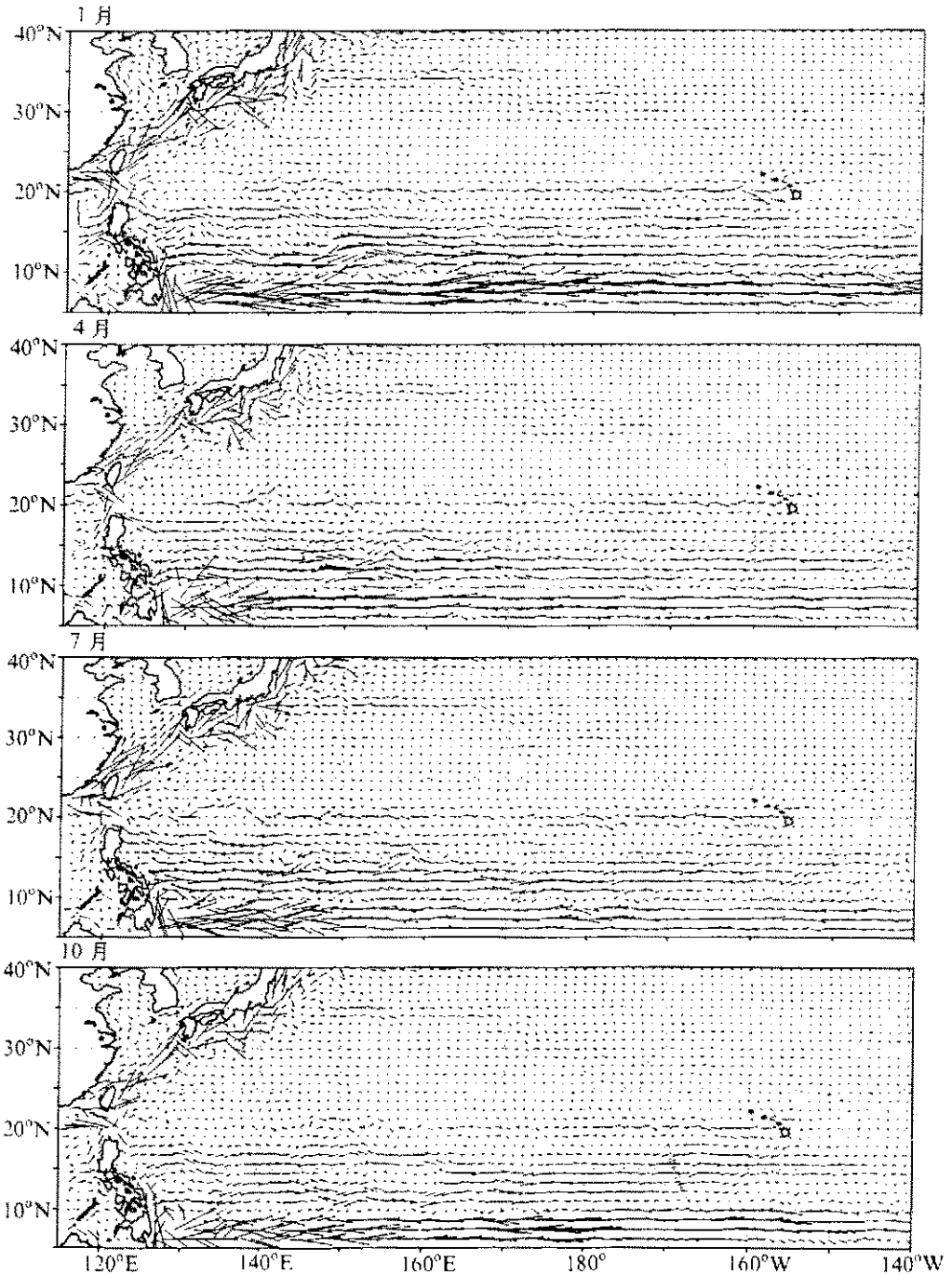

图 2　POCM 模式计算的北太平洋月平均地转流场（1992 年 10 月～1996 年 10 月的月平均值）

处（117～130°E）也有非常明显谱值，甚至大于 84～119 d 周期振荡所对应的谱值；沿着 14°N，TOPEX 资料基本上没季节内振荡的反映；沿着 5°N，TOPEX 资料的季节内振荡分布在准 90 d、准 60 d 和准 30 d 周期这 3 个频段上，前 2 个频段只在西太平洋西

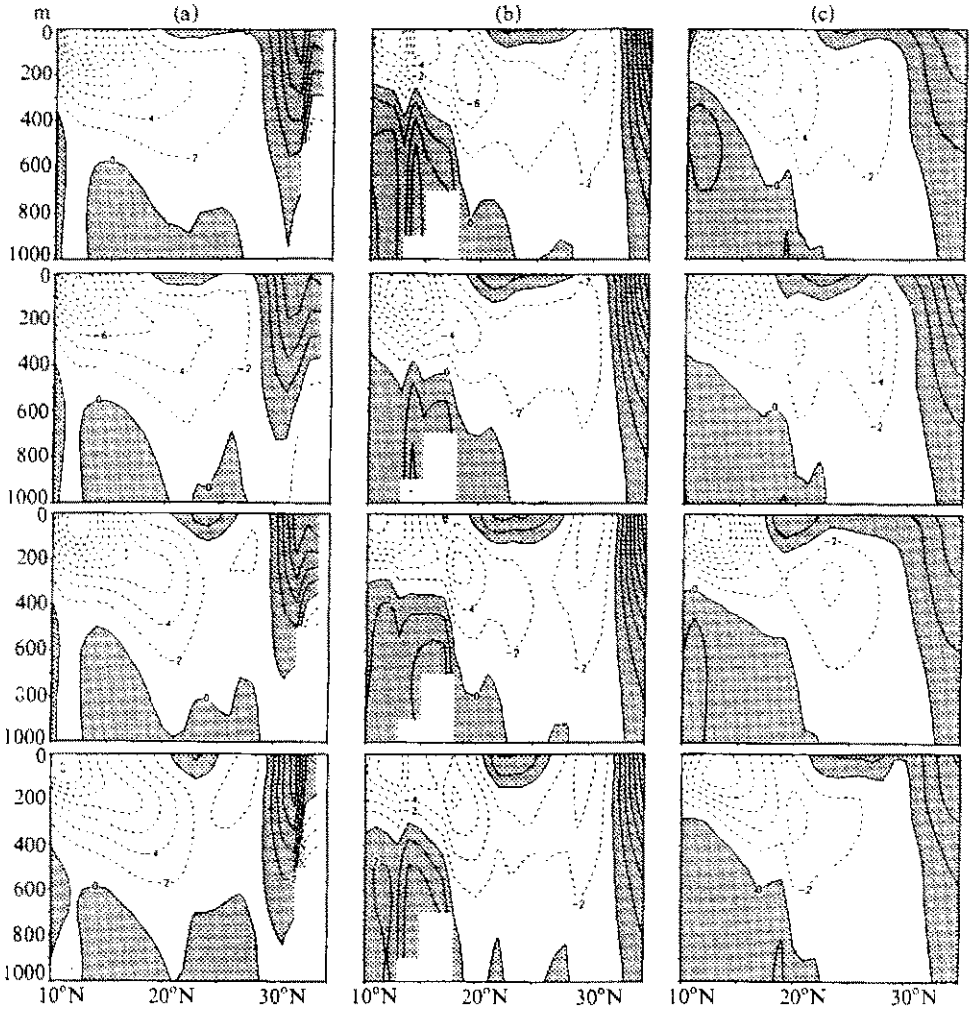

图3 根据 Levitus 温盐资料计算的纬向地转流
(a) 137°E; (b) 145°E; (c) 165°E;
自上而下分别为1月、4月、7月和10月，阴影区表示东向流

端出现，30～35 d 周期振荡除在西太平洋西端有所反映以外，主要出现在东太平洋(155～110°W)(图略)。

功率谱分析和最大熵谱分析结果表明：在 STCC 区域内，SSH 有明显的准 90 d 振荡，该区也是热带太平洋季节内变化最大的区域之一。

5 副热带逆流区天气尺度的涡旋

按照日本气象厅计算的日平均海流图和海平面高度图（可参考 Monthly Ocean Report)，在整个西北太平洋海域，除日本以南的黑潮延伸体附近涡旋较多也最强外，确实还有一系列的涡旋出现在以 20°N 为中心的纬带上，直径大约为 300～1000 km，常

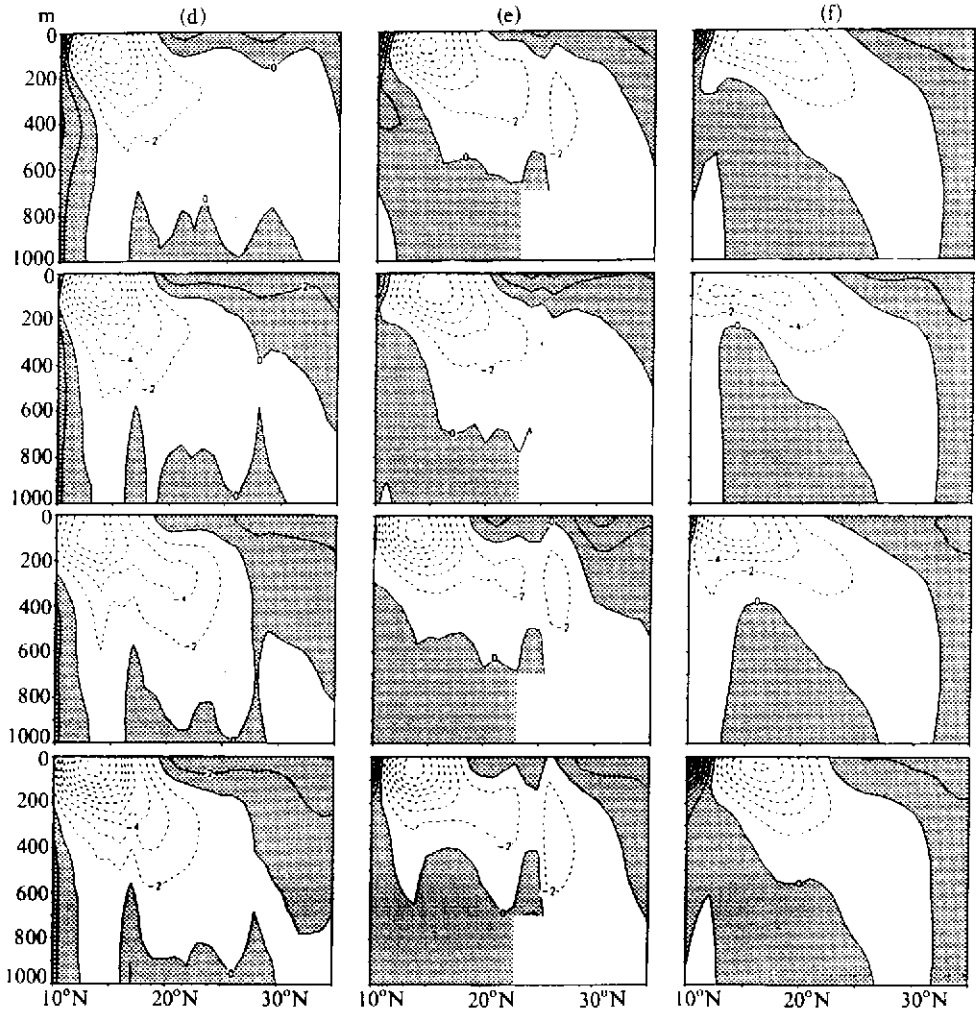

图 3　根据 Levitus 温盐资料计算的纬向地转流（续）

(d) 180°；(e) 167°W；(f) 149°W

自上而下分别为 1 月、4 月、7 月和 10 月，阴影区表示东向流

以气旋式或反气旋式涡旋成对出现。其余海域涡旋的数目少强度也较弱。另外，从 137°E 断面海流的观测资料看（1990、1991 年）（图略），在 15～30°N 的海区，东西向海流呈带状交替分布，并没有一个位置稳定的东向流。这说明从天气尺度来看，在 20°N 附近，并不存在一支稳定的东向流，而是体现多变的多涡结构。有时（例如 1990 年 1 月）观测到的 20°N 附近东向流几乎为零。而另一个时段（1990 年 7 月）东向流会达到 0.8 m／s（24°N）和 0.6 m／s（20°N）。根据 POCM 输出的 SSH 10 d 平均的空间分布，也可以说明，在 10 d 平均的意义上，20°N 附近并不存在一个稳定的东向流，地转流以气旋式与反气旋式涡的形式出现在 20°N 附近海域。正是该海域的多涡特征，才导致该海域某一固定断面海洋观测得到的海流的方向和强度都有很大变化。

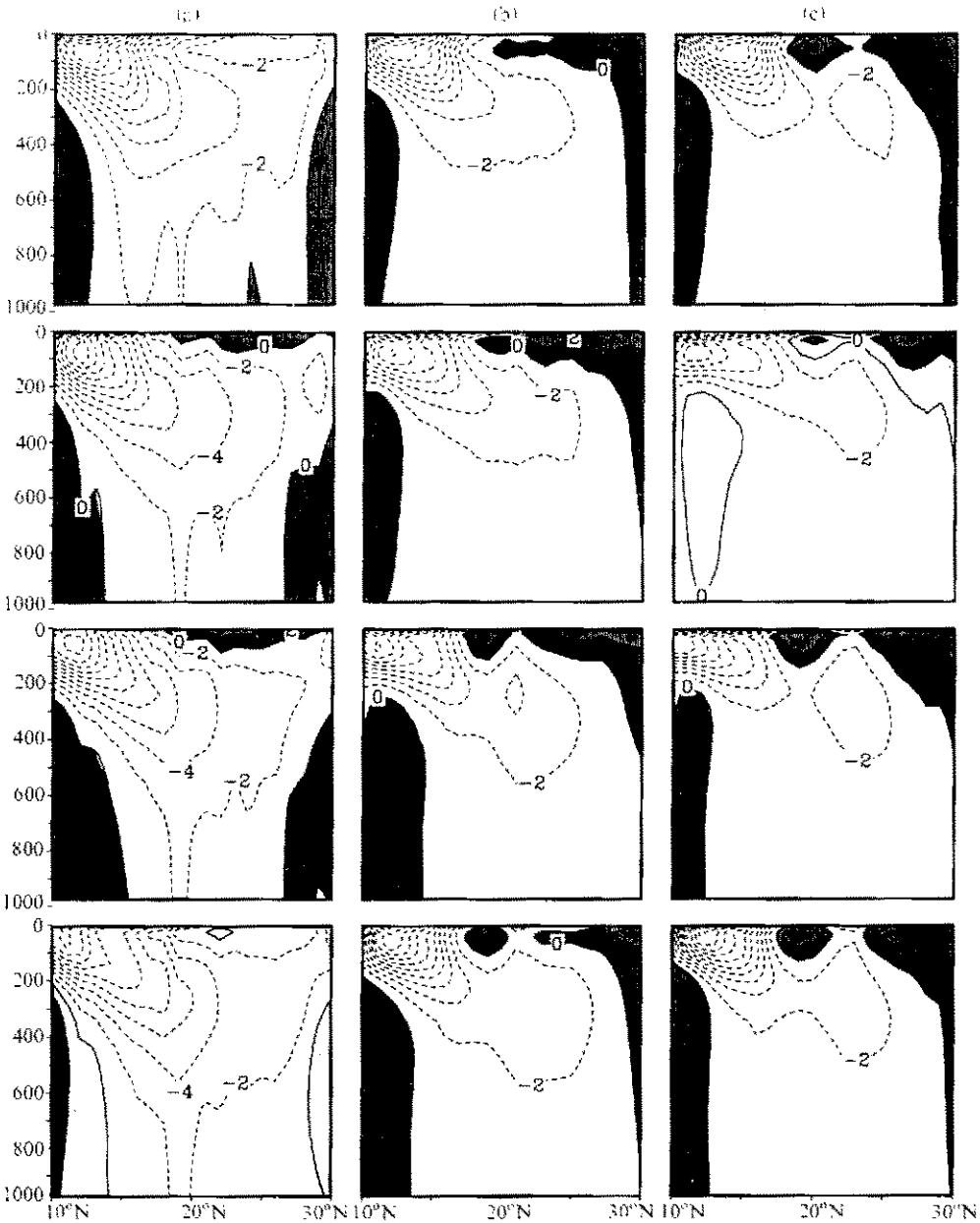

图4 NCEP/NCAR 海洋资料沿（a）145°E、（b）180°、（c）167°W 纬向流的纬度（横轴）-深度（纵轴）剖面

自上而下分别为1月、4月、7月和10月的气候平均值，阴影区表示东向流

6 结论

根据 TOPEX/POSEIDON 高度计及 POCM 模式输出的海平面高度（SSH）资料，气候平均意义下的 Levitus 温盐资料以及沿 137°E 剖面的海流资料，应用功率谱方

法、最大熵谱方法和地转流计算方法及位势涡度矢量反演法，计算和分析了北太平洋副热带逆流的气候特征。

分析结果表明，在不同的时间尺度内，北太平洋副热带逆流表现的形式不同。在年平均和月平均意义下，向东的北太平洋副热带逆流位于 18～25°N、130°E～157°W 150 m 以上的海洋上层，其强度大约为 0.02～0.04 m／s，在西太平洋夏季（7 月）最强冬季（1 月）最弱。在 STCC 以下 650 m 以上有一支向西的流，该流是 NEC 的一部分，其流速也是约为 0.02～0.04 m／s。在 STCC 区域 SSH 有明显的准 90 d 振荡，该区也是热带太平洋季节内变化最大的区域。在以 20°N 为中心，120°E～150°W 的纬带内，80～109 d 的变化与总的变化之比达到 0.3 以上。在天气时间尺度上，一些气旋和反气旋涡出现在 STCC 海域，这使该海域的流在方向和强度上变化很大。

本文仅给出 STCC 的时空分布特征，有关 STCC 及其变化的机制还需进一步研究。

致谢：感谢美国海军研究生院海洋系 Pete Braccio 博士提供 POCM 的 SSH 资料。

参 考 文 献

1 Yoshida, K. and T. Kidikoro, A subtropical countercurrent in the North Pacific? An eastward flow near the subtropical convergence, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 1967, **23**(2), 88～91.

2 Uda, M. and K. Hasunuma, The eastward subtropical countercurrent in the western North Pacific Ocean, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 1969, **25**(4), 201～210.

3 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.

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 Qiu, B., Variability of the North Pacific Subtropical Countercurrent from the TOPEX／POSEIDON Altimetric observations, *J. Phys. Oceanogr.*, 1999, **29**(10), 2471～2486.

6 Levitus, S., Climatological Atlas of the World Ocean, NOAA Professional Paper, 13, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1982, 173pp.

7 Semtner, A. J. Jr. and R. M. Chervin, Ocean general circulation from a global eddy-resolving model, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 5493～5550.

8 Stammer, D. C. Ru Tokmakian, A. J. Semtner, and C. Wunsch, How well does a 1／4° global circulation model simulate large-scale oceanic observations? , *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(C10), 25779～25811.

9 Chu, P. C., P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data, *Marine Technology Society Journal*, 1995, **29**(3), 3～14.

10 Chu, P. C., C. Fan and W. Cai, P-Vector Inverse Method Evaluated Using the Modular Ocean Model(MOM), *Journal of Oceanography*, 1998, **54**, 185～198.

Climatic Features of Subtropical Countercurrent in the North Pacific

Liu Qinyu, Yang Haijun and Bao Hongtong
(*Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao* 266003)

Li Wei
(*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

Abstract Sea Surface Height (SSH) data from TOPEX / POSEIDON mission and POCM output (October 1992–October 1996), temperature and salinity data from Levitus, reanalysis oceanic data from the National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research and current data along 137°E are analyzed in the present study. The results show that there is an eastward Subtropical Countercurrent (STCC) in the upper layer above 150 m in the scope of 18°N~ 25°N and 130°E~ 157°W in the North Pacific on the temporal scale of both annual mean and monthly mean, with the velocity of 0.02~ 0.04 m / s. STCC is the strongest in summer (July) and weakest in winter (January) in the western Pacific. Beneath STCC and above 650 m, there is a westward current at a speed of about 0.02~ 0.04 m / s. Remarkable quasi 90–day oscillation of the SSH appears in the STCC area. In zonal band centered at 20°N from 120°E to 150°W, the ratio of the variance in the 80~ 109 day band and the total variance is larger than 0.3. On the synoptic scale, some anticyclonic and cyclonic eddies are present in the STCC area, which leads to a high variation of the direction and intensity of the zonal current in this area.

Key words: subtropical countercurrent; climatic feature; quasi 90–day oscillation; Northern Pacific