

孙磊超, 管玉平, 张宇, 等. 北太平洋海洋带状流的正压特性[J]. 海洋学报, 2023, 45(11): 1–9, doi:10.12284/hyxb2023148

Sun Leichao, Guan Yuping, Zhang Yu, et al. Barotropic feature of ocean striations in the North Pacific[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(11): 1–9, doi:10.12284/hyxb2023148

北太平洋海洋带状流的正压特性

孙磊超^{1,2}, 管玉平^{1,2*}, 张宇^{3,4,5}, 黄瑞新⁶

(1. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 4. 自然资源部南海预报减灾中心, 广东 广州 510300; 5. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510300; 6. 伍兹霍尔海洋研究所, 伍兹霍尔 马萨诸塞州 02543)

摘要: 海洋中包含着多种时空尺度的运动过程, 海洋带状流是近年来发现的一种新的流动形式。这种流动现象介于地转湍流和准定常流之间。上层海洋中大尺度运动的强度远大于海洋带状流而将其遮盖, 因而带状流需要借助滤波方法提取出来。本研究基于纬向速度数据, 通过切比雪夫高通滤波提取了北太平洋海洋带状流的三维结构, 定义了“流向稳定度”指数, 量化分析了北太平洋海域带状流的正压特性, 从而进一步加深了对北太平洋海洋带状流结构特征的认识。

关键词: 带状流; 北太平洋; 正压性

中图分类号: P731.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)11-0001-09

1 引言

带状流动广泛存在于自然界的流体中, 从微观尺度的等离子体到宏观的行星大气都能发现该运动形式。实验中也可以模拟出带状流动, 例如 Read 等^[1]利用圆柱形储罐锥形的倾斜底部, 使整个储罐获得一定的角速度, 数小时后水槽中出现了一种方向交替的带状流型。过去木星大气层的条带流动结构常受到科学家的关注^[2-3]。最近 10 多年来, 物理海洋学家发现海洋中也存在带状流结构。

海洋中的带状流是指经向上流向交替组成的准纬向流, 该结构在经向上为中尺度, 纬向上具有海盆尺度, 垂向上可以连续地延伸到深海^[4], 且遍布整个海洋^[5]。纬向带状流动的产生机制, 过去已经提出了一些相关理论, 例如, Rhines^[6]提出在 β 效应下, 二维湍流场在能量逆级串的过程中会产生一种交替的纬向急流结构; Baldwin 等^[7]称纬向流与位势涡度的分布

密切相关, 位势涡度的经向梯度较大处与狭窄、流速更快的东向流的位置相对应; Qiu 等^[8]提出斜压罗斯贝波的三波共振可以产生带状流动; Chen 等^[9]认为带状结构是涡旋传播的结果。

海洋带状流有不同的提取方法, 例如, Maximenko 等^[10]通过二维汉宁高通滤波提取了太平洋东部的带状流; Ivanov 等^[11]通过小波变换提取了加利福尼亚外海的带状流动系统; Van Sebille 等^[12]通过高通滤波提取了东北太平洋海域内的带状流动; 张宇等^[13]通过一维的切比雪夫高通滤波器提取到了全球海洋条带结构。

在已发表的文献中, 带状结构的描述常常采用不同的名称, 例如“纬向流 (zonal currents)”^[14]、“准纬向急流 (quasi-zonal jets)”^[12]、“纬向急流 (zonal jets)”^[15]等。值得注意的是, 海洋中的带状流在结构上与急流非常接近, 都呈现出带状结构。实际上, 提取到的海洋带状流比背景流场弱, 而急流要比背景流场的强度

收稿日期: 2023-01-03; 修订日期: 2023-07-10。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42076025, 41676021)。

作者简介: 孙磊超 (1998—), 男, 河北省曲周县人, 主要从事海洋带状流的研究。E-mail: sunleichao@scsio.ac.cn

* 通信作者: 管玉平, 研究员, 主要研究大洋环流与气候变化等。E-mail: guan@scsio.ac.cn

强,前者的量级约为 cm/s,而后者往往为 m/s,两者不应混为一谈。本文将使用带状流(striations)的概念,以示其与急流(jets)的区别。

海洋带状流在垂向上呈正压结构。前人对带状流的研究也注意到了其正压结构。Richards 等^[16]对太平洋的研究发现,热带区域和中高纬度区域(30°~50°N)的带状结构有着明显的不同,在中高纬度带状流几乎都能从表层贯穿到底部。带状结构的垂向结构主要由正压模和前两个斜压模主导^[17]。带状结构在整个深度截面上不存在明显的倾斜^[18]。Van Sebille 等^[12]通过对多个流轴上带状流的流向的识别和统计,证明带状流具有正压性。通过对不同区域的研究,Zhang 和 Guan^[9]认为开阔海域带状流的正压性强于边缘海等孤立海盆。前人对海洋带状流正压性的分析以描述为主,缺乏定量的研究。因此本文以北太平洋海洋带状流为研究对象,通过定义多种指数,对其正压结构进行了定量的研究。我们采用了一种新的角度“不同深度带宽的对比”并定义了一个“流向稳定度”指数来定量研究北太平洋海洋带状流的正压性。

2 资料和方法

2.1 资料

2.1.1 SODA 资料

本研究中使用由美国马里兰大学和得克萨斯农工大学合作完成的资料集 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)数据。SODA 数据的版本为 SODA 3.4.2(<https://www2.atmos.umd.edu/~ocean/>),纬度范围为 74.5°S~90°N,不包含南极区域,其时间分辨率为月平均,水平分辨率为 0.5°×0.5°,垂向上分为 50 层,时间范围为 1980–2020 年。研究中使用的数据为纬向流场,因为海洋中的低频大尺度流动以纬向流为主。

2.1.2 ECCO 资料

ECCO(Estimating the Circulation and Climate of the Ocean)资料属于同化数据,该资料的相关项目创立于 1998 年,是世界大气环流实验(World Ocean Circulation Experiment)的一部分。ECCO2(Phase II)的推出是为了改进 ECCO 数据的水平网格粗糙和缺少部分海区等问题。ECCO2 通过使用格林函数结合多种观测数据对环流模型进行同化,拥有精细的分辨率,能再现全球范围的海洋。本研究中使用数据的时间尺度为 2001–2010 年,水平分辨率为 0.25°×0.25°,垂向上共有 50 层。

2.2 方法

2.2.1 带状流的提取——切比雪夫高通滤波方法

本研究使用切比雪夫高通滤波方法提取海洋带状流。张宇等^[19]对比了高斯平滑、汉宁方法和切比雪夫 3 种滤波方法在海洋中得到的带状结构特征,研究结果如下:高斯平滑只能在局部区域获得带状结构,不适用于全球范围内带状流的提取;汉宁方法和切比雪夫方法的结果大致相同,可以在全部范围内提取带状结构,但汉宁方法得到的结果在纬向上相比真实位置会发生一定程度的偏移,而切比雪夫方法不存在位置偏移问题。所以本研究采用切比雪夫方法。

2.2.2 带状流的带宽算法

海洋带状流呈现为南北方向上相邻且交替反向的流动。基于这种结构特征,可以采用“几何带宽算法”计算带状流单条流带的宽度。该算法在经向上进行:第一步,找到东向或是西向流的极值点位置(流轴);第二步,找到两个相邻且符号相反的极值点之间,流速为 0 的位置(东向流和西向流的边界);最后,计算相邻两个边界之间的距离便可以得到带状流宽度。此方法存在一定的局限性,因为从带状流的空间分布上来看,宽度值较小的带状流占空间范围较小,但在统计带宽总体的分布时,宽度值不同的带状流所占权重却相同。这将导致在区域内计算带宽的平均分布状况时,获得的结果往往偏小。

针对这个不足,我们进行订正:计算出单条带状流的带宽后,将值赋值给该带状流所占空间范围内的所有格点,如图 1 小红圈所示。完成目标区域内所有经度上的带宽计算后,该区域内每个空间格点也都具备了带宽属性,进而能得到二维平面上的带宽分布,即与资料相同分辨率的带宽分布。订正后的带宽算法降低了带宽值较小的流动对总体带宽分布的影响,从而有效提高了整体带宽计算的准确性。

2.2.3 流向稳定度

为进一步探究各区域带状流在垂向上的分布情况,下面定义“流向稳定度”指数来描述带状流的垂向延拓特征在空间上的变化。

以 SODA 数据中 997 m 深度上的流场为例,第一步进行时间平均和滤波处理,提取海洋带状流,见图 2a。第二步,将图 2a 中的流速分布转化为东西流向分布,流速为正值和负值的东向流和西向流分别进行赋值,得到如图 2b 所示的“流向图”。流向图只标记流动的方向不包含流速的大小。图 2b 可清晰地观察到每个格点上的流向情况,同时在流向图中能更有效地得到一定经度范围内带状流的条数信息。

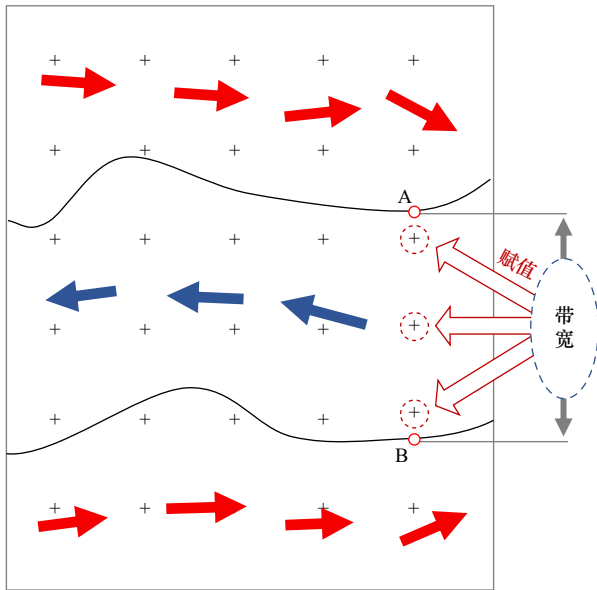


图1 带宽算法

Fig. 1 Algorithm of bandwidth

第三步,将上述在单层进行的“流向图”转换扩展到1500 m内的不同深度层,继而在每一个经纬度格点上对多个深度上的流向值做比较。若在同一地理格点上,多个深度上的流速方向相同,说明流向未曾发生改变,则将该处设置为当前的流向;若有不同的流向值出现,表示该位置的流向发生了改变,便将该位置的格点设置为空值。如图2c所示,该区域东南区

域的空值点比较多,这在一定程度上说明该部分区域内的带状流从浅到深的一致性较差。图2c展示的是流向在深度上的变化情况,为进一步用数值来描述流向变化的分布特征,需要在此基础上进行量化。

第四步,将流向不变的格点赋值为数值“1”,流向发生改变的格点赋值为数值“0”,设定 2×2 的4个格点为一个局部网格,在网格内进行平均,将平均值赋值给网格内的4个格点,以此,每个格点便都具有了代表流向变化的“流向稳定度”。如图2d所示,不同的颜色代表“流向稳定度”的高低,偏黄色的区域为该部分缺失数据较少,表示该区域流向在深度上的稳定度较高,相应地,偏蓝色区域则表示流向稳定度低。

2.2.4 斜压分量算法

Zhang等^[4]用一个无量纲常数——斜压分量指数对带状流的正压性进行了考察,并给出了北太平洋2000 m以内的斜压分量指数变化情况。斜压分量指数可以计算流场斜压分量的比重,斜压分量指数越小表明流场的正压性越强,反之,则正压性较弱。我们进一步研究了北太平洋断面上斜压分量指数的变化情况。纬向流(u_0)的斜压分量指数(BCF_0)可以通过下式进行定义:

$$u_{0,bt}(x,y) = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 u_0(x,y,z) dz, \quad (1)$$

$$u_{0,bc}(x,y,z) = u_0(x,y,z) - u_{0,bt}(x,y), \quad (2)$$

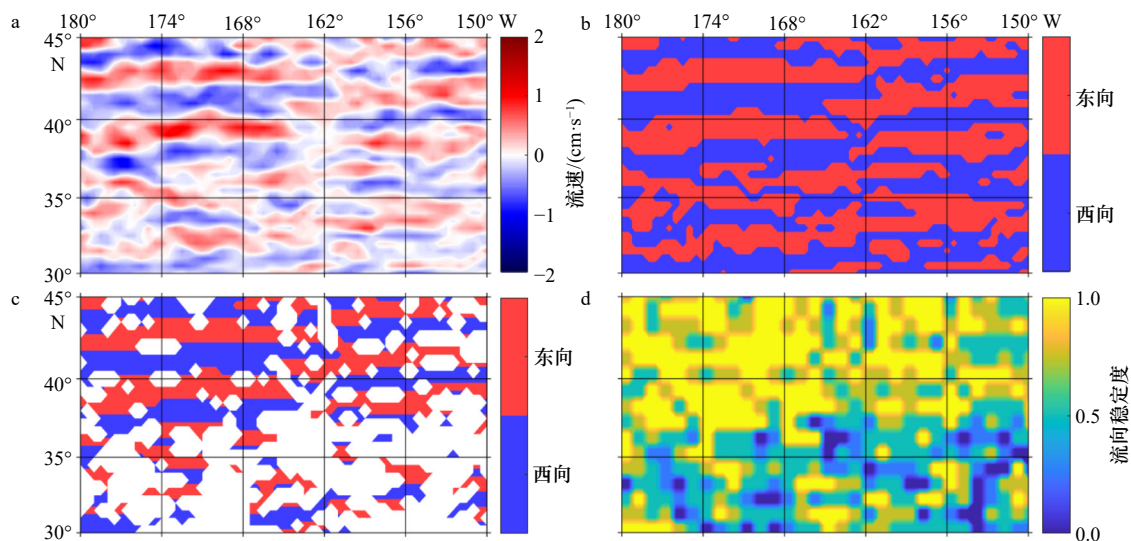


图2 基于SODA数据的北太平洋997 m深度上带状流流速(a)、流向(b)、在不同深度上流向不变和发生变化的区域(c)和流向稳定度(d)

Fig. 2 Based on SODA data, the striations current velocity at 997 m in the North Pacific (a), flow direction (b), regions of flow direction vertically in alignment and regions where flow direction changes at different depths (c), and the stability of flow direction (d)

偏黄色区域表示流向在深度上稳定度较高的区域,偏蓝色区域则表示流向在深度上稳定度较低的区域

The yellow region indicates the area where the flow direction is stable over the depth, while the blue region indicates the area where the flow direction varies over the depth

$$\text{BCF}_0 = \frac{z \max(u_{0, bc})}{u_{0, bt} + z \max(u_{0, bc})}, \quad (3)$$

带状流流速 (u_{str}) 的斜压分量指数 (BCF_{str}) 计算公式为

$$u_{\text{str}, bt}(x, y) = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 u_{\text{str}}(x, y, z) dz, \quad (4)$$

$$u_{\text{str}, bc}(x, y, z) = u_{\text{str}}(x, y, z) - u_{\text{str}, bt}(x, y), \quad (5)$$

$$\text{BCF}_{\text{str}} = \frac{z \max(u_{\text{str}, bc})}{u_{\text{str}, bt} + z \max(u_{\text{str}, bc})}, \quad (6)$$

式中, $u_{0, bt}$ 和 $u_{\text{str}, bt}$ 表示正压分量; $u_{0, bc}$ 和 $u_{\text{str}, bc}$ 表示斜压分量; $z \max(u_{0, bc})$ 与 $z \max(u_{\text{str}, bc})$ 分别表示垂向上流场斜压分量的最大振幅。斜压分量值可验证流动中正压和斜压的占比, 该值越靠近 0.5, 正压和斜压分量占比越趋近, 而当该值小于 0.5 并越接近 0 时, 说明正压分量越占优。

3 北太平洋带状流的正压性特征

3.1 不同深度带宽的对比

提取海洋带状流首先需要 2001–2010 年纬向流数据进行时间平均, 然后为了去掉背景流场中 EN-SO 和太平洋年代际震荡等大尺度过程的信号, 便须对原始平均流场使用高通滤波进行处理。结果表明, 北太平洋海洋带状流在等深面上纬向具有海盆尺度, 经向为中尺度, 与前人的结果一致^[4, 10, 18]。基于 SODA 数据, 北太平洋整体的带宽分布集中于 100~200 km, 其中 100~200 km 的带宽占比为 55%。图 3 中自上到下分别是 3 种不同的经度范围内带状流宽度随纬度

和深度的变化情况。图中不同颜色曲线分别代表 6 m、525 m、997 m 和 1 498 m 深度上的宽度变化, 以及以上 4 种深度整体平均的情况。图中浅灰色阴影区域为 4 种深度整体平均在纬度上的变化范围, 虚线为该范围的边界。

从纬向进行分析, 图 3a 和图 3b 变化相似: 15°~25°N 之间, 两个区域内的带宽整体呈变窄趋势, 局部有所波动; 25°~35°N 之间, 宽度值在波动中有缓慢的变窄; 35°~40°N 之间, 可能受强烈的背景流场影响, 条带有一定程度的加宽; 40°~45°N, 宽度继续变窄。图 3c 中, 15°~30°N 之间, 带宽在波动中逐步变窄, 30°~35°N 之间的带宽较为平稳地维持在 150 km 附近, 随后在 35°~45°N 之间, 带宽先加宽, 随后逐步变窄。由此可以看出随纬度的增加, 带状流有不断变窄的趋势。

带状流的宽度不仅能用来说明带状流的尺度特征, 还可以通过对不同深度上的带宽值, 获取相应位置上带状流流向随深度的变化情况。若从表层至深层的带宽相近, 说明该区域带状流在垂向上流向变化小, 表明流动具有一定的正压结构。从深度上进行分析, 图 3 中所示的 4 种深度, 在 3 个纬度范围内表现相近: 15°~20°N 处低纬度热带地区流系复杂, 不同深度间带宽有所差别; 超过 20°N, 随着纬度升高, 4 个深度上的带宽波动趋势相似度很高, 同时也有更多区域的带宽值趋于一致。例如图 4a 中 38°~45°N 范围内的带宽在 4 种深度上较为接近, 证明该区域范

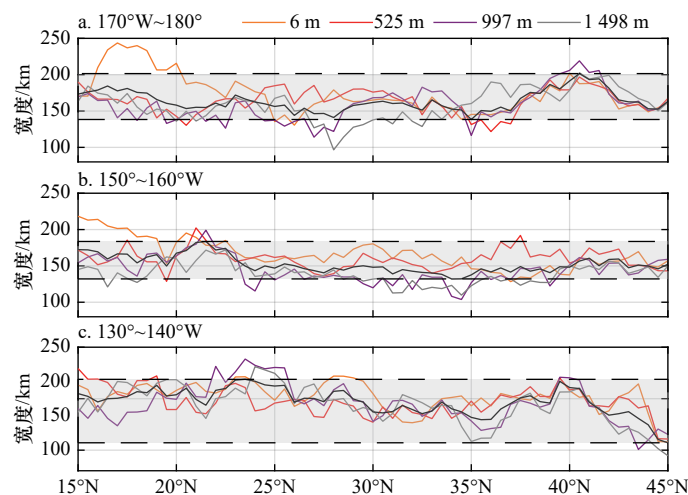


图 3 基于 SODA 数据, 带状流宽度在 3 个经度范围内随纬度的变化

Fig. 3 Based on SODA data, the meridional variability of bandwidth of the striations over three longitudinal bands

棕色, 红色, 紫色和银色 4 条细线代表 4 种深度上的带宽变化情况, 黑色粗实线表示以上 4 种深度上的平均, 其中 3 个经度范围在图 4 中用黑框表明

The four thin lines (orange, red, purple and silver) depict the meridional distribution of bandwidth at four depths, while the heavy black lines represent the average over these four depths. The three longitude ranges are indicated by black boxes in Fig. 4

围内的带状流具有明显的正压结构。

3.2 不同深度流向的对比

图 4 和图 5 展示了基于两种数据, 北太平洋的带

状流和流向稳定度的分布情况。图 4 基于 SODA 数据, 流向稳定度的分布显示, 北太平洋海区整体流向稳定区域较多, 热带区域存在着复杂的垂向流系, 如

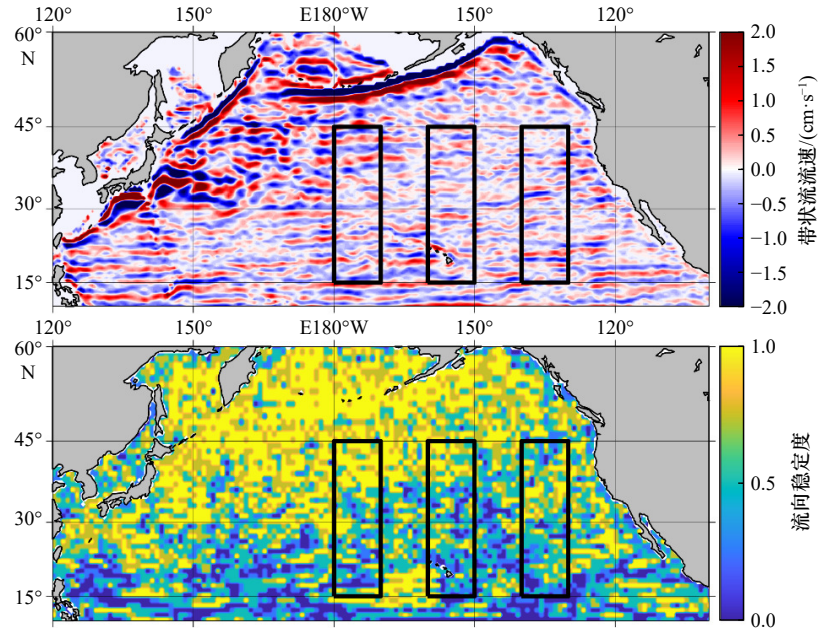


图 4 基于 SODA 数据的北太平洋 997 m 深度上的带状流流速和流向稳定度

Fig. 4 Based on SODA data, the striations at current velocity at 997 m and the stability of flow direction in the North Pacific

偏黄色区域表示流向在深度上稳定的区域, 偏蓝色区域则表示流向在深度上稳定度较差的区域

The yellow region indicates the area where the flow direction is stable over the depth, while the blue region indicates the area where the flow direction varies over the depth

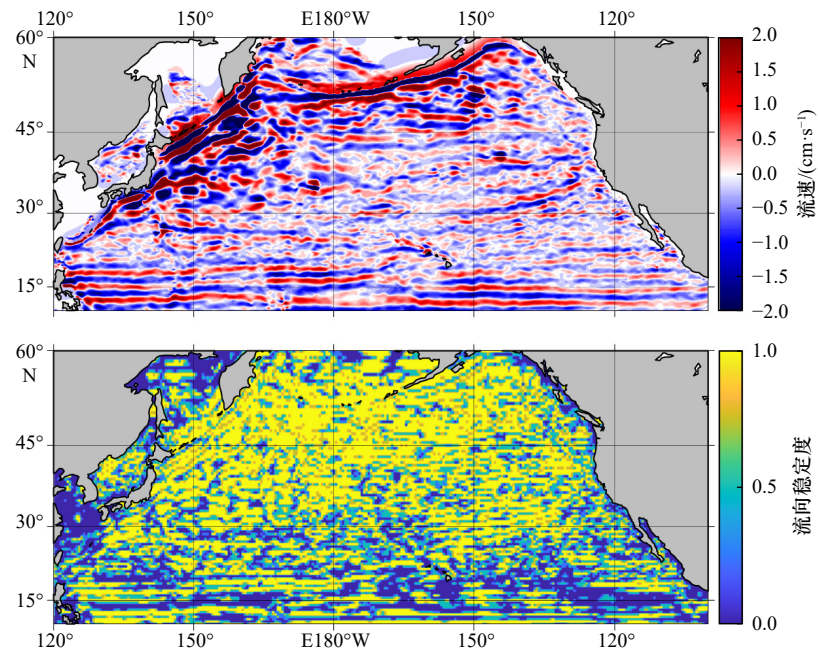


图 5 基于 ECCO2 数据的北太平洋 1007 m 深度上的带状流流速和流向稳定度

Fig. 5 Based on ECCO2 data, the striations at current velocity at 1007 m and the stability of flow direction in the North Pacific

偏黄色区域表示流向在深度上稳定的区域, 偏蓝色区域则表示流向在深度上稳定度较差的区域

The yellow region indicates the area where the flow direction is stable over the depth, while the blue region indicates the area where the flow direction varies over the depth

赤道潜流^[19],流场的垂向一致性较小;中纬度区域带状流流向在深度上变化较弱,垂向一致性较强,因而具有更强的正压性。

如图 5 所示,基于 ECCO2 数据,流向稳定度的分布情况与 SODA 数据大致相似,北太平洋整体稳定性较强,热带区域垂向一致性较差。而两种数据也存在一处较为明显的差别,由于 ECCO2 数据分辨率较高,能表现出较为精细的流向稳定度的分布情况,因而在图 5 中,从带状流与流向稳定度分布两图中对比可以发现,尤其在热带区域,带状流的流轴位置一般流向稳定度较高。

3.3 北太平洋海洋带状流的正压性指数

图 6a 与图 6b 和图 7a 与图 7b 展示了 SODA 和 ECCO2 两种数据在北太平洋 180°原始纬向平均流与带状流。图 6a 与图 7a 为原始的纬向流场,图中可见部分热带地区和中纬度区域上层的大尺度环流。纬向流场的热带地区潜层流系复杂,上层的西向流延伸至 700 m 深;中纬度地区的上层流场部分区域可贯穿至 2 000 m。纬向流的上层涵盖了大尺度风生环流场,深层的流场开始呈现东西向交替的带状特征。图 6b 与图 7b 是经滤波得到的带状流。对比纬向流和带状流可以发现,带状流流轴处往往与纬向流的深层流的流向一致,这在一定程度上表明带状流在上层

被强度更大的背景流场所掩盖,直到深层才逐渐显露出来。

利用斜压分量指数可以计算出正压性,其中深度 d 取 2 000 m。纬向流和带状流的斜压分量值变化情况如图 6c 与图 7c 所示。黑色虚线标注了斜压分量极小值的位置与纬向流和带状流在纬向上的对应关系。整体来看,图 6 与图 7 中纬向流的斜压分量均值为 0.639 与 0.705,斜压分量占优;而带状流中斜压分量平均值为 0.536 与 0.565。可见,相比纬向流场,带状流流场具有更强的正压性。从单个带状流来看,带状流流轴位置常常是斜压分量极小值位置,而流动的边界位置处斜压分量指数较高,证明带状流流轴位置附近的正压性较强。带状流由纬向交替的流动组成,流轴位置处具有的较强的正压性使得流场的平均斜压分量值较低,进而证明了带状流所具有的正压性。

利用 SODA 1980–2020 年的数据,可以计算出平均斜压分量指数的年份变化。图 8 为北太平洋原始流场和带状流流场 180°断面整体平均后的斜压分量指数的变化情况,数据处理过程中同样采用了 10 年平均,因而横坐标为起始年份。图中可以看出原始流场的斜压分量指数在 0.62~0.66 之间波动,而带状流的斜压分量指数在 0.51~0.57 之间波动,表明了带状流在多个年份上都表现出了较强的正压特性。

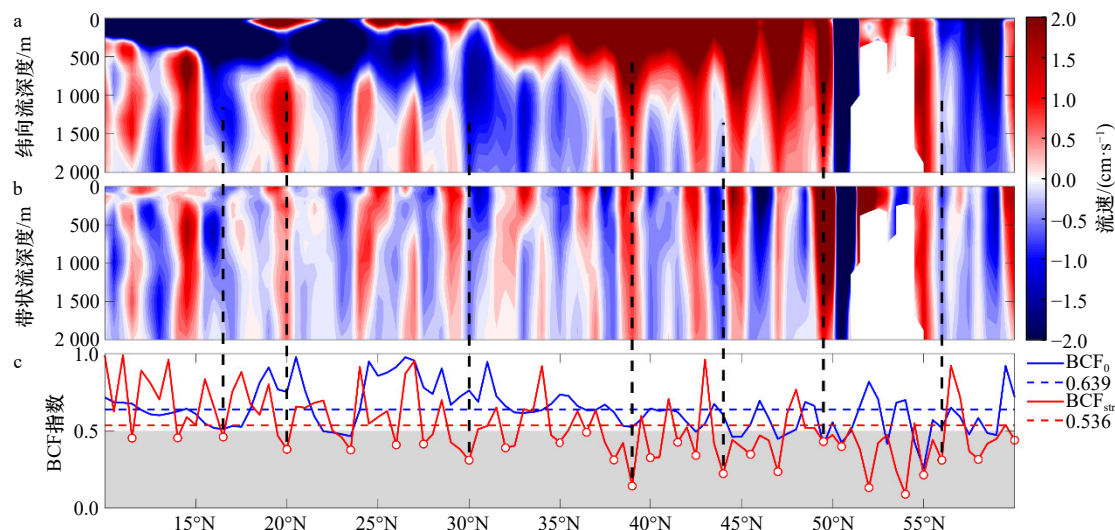


图 6 SODA 数据中的 180°剖面的不同深度纬向流流速(a)、不同深度滤波后分离出的带状流流速(b)以及纬向流和带状流流场的斜压分量指数随纬度的变化(c)

Fig. 6 Based on SODA data, zonal flow current velocity along 180° in different depths (a), striations current velocity obtained after filtering in different depths (b), and BCF index for the zonal flow and striation (c)

蓝色和红色的实线分别为纬向流和带状流斜压分量指数的变化,蓝色和红色的虚线则分别为两者的均值;灰色阴影部分为斜压分量指数小于 0.5 的区域

Where the blue (red) solid line for the zonal flow (striation) BCF index, and the blue (red) dashed line for the mean values; the shaded area indicates BCF index less than 0.5

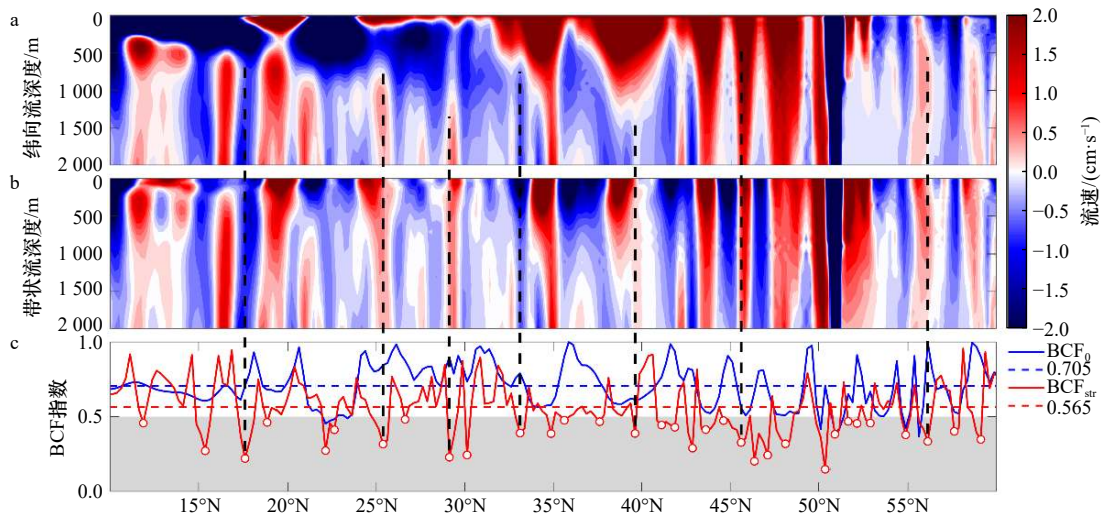


图7 ECCO2数据中180°剖面的不同深度纬向流流速(a)、不同深度滤波后分离出的带状流流速(b)以及纬向流和带状流流场的斜压分量指数随纬度的变化(c)

Fig. 7 Based on ECCO2 data, zonal flow current velocity along 180° in different depths (a), striations current velocity obtained after filtering in different depths (b), and BCF index for the zonal flow and striation (c)

蓝色和红色的实线分别为纬向流和带状流斜压分量指数的变化,蓝色和红色的虚线则分别为两者的均值;灰色阴影部分为斜压分量指数小于0.5的区域

Where the blue (red) solid line for the zonal flow (striation) BCF index, and the blue (red) dashed line for the mean values; the shaded area indicates BCF index less than 0.5

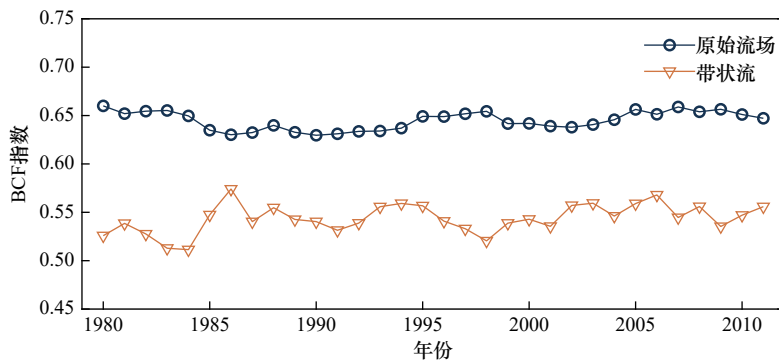


图8 SODA数据中180°断面上的多年平均斜压分量指数的变化

Fig. 8 Based on SODA, the change of mean BCF index over many years along 180°

4 结果与讨论

本文基于水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的SODA和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ECCO2两种数据,利用切比雪夫高通滤波提取了北太平洋带状流。通过定义带宽、流向稳定度以及斜压分量指数系统地对带状流的正压性特征进行了量化分析。结果表明:

(1)通过带宽算法定量分析了不同纬度和深度上带宽的分布特征,结果表明北太平洋海区的带宽随纬度的增加有下降趋势,且具有明显的正压结构。

(2)基于流向在深度上的变化特征,定义了“流向稳定度”指数,从不同深度上流向变化的角度研究了

其正压性。该指数表明了北太平洋东部和西部的部分低纬地区,流向的稳定性较差;而北太平洋中高纬度区域、沿岸区域的稳定性较强,正压性较强,而且该区域的带宽也随深度变化较小。

(3)基于斜压分量指数分析了纬向流和带状流在垂向断面上的对应关系,结果表明带状流垂向流轴处的正压性总是强于原始的纬向流场。

强正压性反映了带状流仍是 β 效应下二维湍流运动的一种典型过程,是湍流各向异性的产物,它在地球海洋中呈现出了潜藏性(表层需要滤波来提取带状流)、偏移性(水平走向与纬线不平行)等非典型的特征。带状流的斜压分量指数显著小于平均流,意

味着带状流具有比海盆尺度环流场更强的正压性。而其他非典型的特征则是由于风生流动在陆地侧边界的影响下形成的海盆尺度环流场,掩盖了地转湍流成带化的结果。而且,两者之间的相互作用过程(海盆尺度与中尺度之间的相互作用)也诱导了海洋带状流的走向偏移等异化现象。海洋是显著层化的流体,带状流的正压性则体现了不同密度层流体运动的共

性。这种共性必然也在整个环流场的物质和能量平衡中扮演着重要的角色,也是我们未来需要弄清的问题。此外,本文所采用的 SODA 数据与 ECCO2 数据都是同化资料,对于研究海洋带状流而言,1 000 m 以深实测资料仍相对较少。所以从中诊断出的带状流在深海的特征是否源于模式产生的则有待于观测资料的充分积累才能进一步地验证。

参考文献:

- [1] Read P L, Yamazaki Y H, Lewis S R, et al. Dynamics of convectively driven banded jets in the laboratory[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(11): 4031–4052.
- [2] Galperin B, Young R M B, Sukoriansky S, et al. Cassini observations reveal a regime of zonostrophic macroturbulence on Jupiter[J]. *Icarus*, 2014, 229: 295–320.
- [3] Vasavada A R, Showman A P. Jovian atmospheric dynamics: an update after *Galileo* and *Cassini*[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 68(8): 1935–1996.
- [4] Zhang Yu, Guan Yuping, Huang Ruixin. 3D structure of striations in the North Pacific[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(12): 3651–3662.
- [5] Zhang Yu, Guan Yuping. Striations in marginal seas and the mediterranean sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(5): 2726–2733.
- [6] Rhines P B. Waves and turbulence on a beta-plane[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 69(3): 417–443.
- [7] Baldwin M P, Rhines P B, Huang H P, et al. The jet-stream conundrum[J]. *Science*, 2007, 315(5811): 467–468.
- [8] Qiu Bo, Chen Shuiming, Sasaki H. Generation of the North equatorial undercurrent jets by triad baroclinic rossby wave interactions[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(12): 2682–2698.
- [9] Chen Changheng, Kamenkovich I, Berloff P. Eddy trains and striations in quasigeostrophic simulations and the ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(9): 2807–2825.
- [10] Maximenko N A, Melnichenko O V, Niiler P P, et al. Stationary mesoscale jet-like features in the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8): L08603.
- [11] Ivanov L M, Collins C A, Margolina T M. System of quasi-zonal jets off California revealed from satellite altimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(3): L03609.
- [12] Van Sebille E, Kamenkovich I, Willis J K. Quasi-zonal jets in 3-D Argo data of the Northeast Atlantic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(2): L02606.
- [13] 张宇, 管玉平, 陈朝晖, 等. 不同滤波方法对揭示全球海洋条带结构的比较 [J]. *物理学报*, 2015, 64(14): 149201.
Zhang Yu, Guan Yuping, Chen Zhaohui, et al. Intercomparison of one-dimensional detecting methods of unveiling the global ocean striations[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(14): 149201.
- [14] Maximenko N A, Bang B, Sasaki H. Observational evidence of alternating zonal jets in the world ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(12): L12607.
- [15] Furue R, Nonaka M, Sasaki H. On the statistics of the zonal jets in the eastern equatorial Pacific and eastern North Pacific in an ensemble of eddy-resolving ocean general circulation model runs[J]. *Ocean Modelling*, 2021, 159: 101761.
- [16] Richards K J, Maximenko N A, Bryan F O, et al. Zonal jets in the Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(3): L03605.
- [17] Kamenkovich I, Berloff P, Pedlosky J. Role of eddy forcing in the dynamics of multiple zonal jets in a model of the North Atlantic[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39(6): 1361–1379.
- [18] Melnichenko O V, Maximenko N A, Schneider N, et al. Quasi-stationary striations in basin-scale oceanic circulation: vorticity balance from observations and eddy-resolving model[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(3): 653–666.
- [19] Cravatte S, Kestenare E, Marin F, et al. Subthermocline and intermediate zonal currents in the tropical Pacific Ocean: paths and vertical structure[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(9): 2305–2324.

Barotropic feature of ocean striations in the North Pacific

Sun Leichao^{1,2}, Guan Yuping^{1,2}, Zhang Yu^{3,4,5}, Huang Ruixin⁶

(1. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China*; 4. *South China Sea Marine Forecast and Hazard Mitigation Center, Ministry of Natural Resource, Guangzhou 510300, China*; 5. *Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China*; 6. *Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole 02543, USA*)

Abstract: The ocean contains various spatiotemporal scales of motion processes, and ocean striations are a newly discovered form of flow in recent years. This flow phenomenon lies between geostrophic turbulence and quasi-steady flow. Due to the dominance of large-scale motion in the upper ocean, ocean striations are masked and need to be extracted using filtering methods. In this study, the three-dimensional structure of ocean striations in the North Pacific was extracted based on zonal velocity data using Chebyshev high-pass filtering. The “flow stability” index was defined to quantitatively analyze the barotropic feature of ocean striations in the North Pacific, thereby deepening the understanding of the structural characteristics of ocean striations in the North Pacific.

Key words: striations; the North Pacific; barotropy