

# 南太平洋热带-副热带区斜压不稳定的多年代际趋势及其机制分析\*

刘丹丹<sup>1,2</sup> 朱善良<sup>1</sup> 刘传玉<sup>2,3</sup> 冯岭<sup>2,3</sup>

(1. 青岛科技大学数理学院 山东青岛 266061; 2. 中国科学院海洋研究所海洋动力过程观测和预报重点实验室 山东青岛 266071; 3. 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室 山东青岛 266071)

**摘要** 为了探究全球变暖对斜压不稳定的影响,本研究采用  $1^\circ \times 1^\circ$  的温度、盐度和流场格点数据,对 1993~2022 年南太平洋热带-副热带海区(south Pacific tropical-subtropical, SPTS)表层强化的 Charney 型斜压不稳定的长期变化趋势及其机制进行了分析。发现南太平洋热带区(south Pacific tropical, SPT)斜压不稳定的增长率表现出显著的减少趋势,每 10 a 减少 0.12%,而南太平洋副热带区(South Pacific Subtropical, SPS)斜压不稳定的增长率则表现出显著的增加趋势,每 10 a 增加 0.10%。上述增长率的变化趋势与卫星观测的涡旋动能(eddy kinetic energy, EKE)的变化趋势一致,且 SPT 的斜压不稳定的变化受剪切和层结的共同调控,而 SPS 的斜压不稳定的变化主要受剪切的影响,说明斜压不稳定性变化的变化体现了温盐和流场变化的综合效应。进一步分析发现,上述增长率及 EKE 的变化趋势与局地有效位能(available potential energy, APE)的趋势一致,突显了斜压不稳定性在能量转移转化中的关键作用。

**关键词** 斜压不稳定; 中尺度涡旋; 涡动能; 有效位能

**中图分类号** P731 **doi**: 10.11693/hyhz20241000215

全球变暖使海洋上层海水温度升高,进一步改变了驱动海洋环流的风应力、净热通量和淡水通量。这些变化进一步影响了大洋翻转环流(Toggweiler *et al.*, 2008; Marshall *et al.*, 2017)、大尺度海洋环流(Sutton *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2020)以及西边界流(Kwon *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2012)等重要海洋环流。自 20 世纪 90 年代以来,全球海洋动能存在显著的增长趋势,其增长速率达到每 10 a 增长(15±12)%,表明全球平均海洋环流存在显著的加速趋势(Hu *et al.*, 2020)。

与此同时,气候变化也对中尺度过程产生了影响,比如,中尺度涡旋表现出显著的变化。根据卫星测高记录显示,在过去 30 a 里,全球范围内海洋涡旋活动显著增强,主要表现为涡旋动能(eddy kinetic energy,

EKE)的增加(Martínez-Moreno *et al.*, 2021)。这种增强趋势在西边界流及其延伸和南极绕急流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)等涡流丰富的区域尤为显著,中尺度涡旋活动每 10 a 增加约 2%~5%。然而,副热带环流区呈现出与边界流区域相反的变化趋势,中尺度涡旋活动则有所减少。Wang 等(2024)基于高分辨率地球系统模式(Community Earth System Model-High Resolution, CESM-H)数据,模拟了 2001~2100 年 EKE 的变化趋势,发现涡流丰富区域的涡旋动能将持续增强,而副热带环流区则可能进一步减少。这些研究表明,气候变化不仅对大尺度海洋环流产生了影响,还深刻影响了中尺度涡旋的活动模式。

目前,关于中尺度涡旋以及中尺度涡动能的研究,一部分基于卫星高度计数据(Martínez-Moreno *et al.*,

\*国家自然科学基金委重点项目, 42430403 号。刘丹丹, 硕士研究生, E-mail: liudandan@qdio.ac.cn

① 通信作者: 刘传玉, 博士生导师, 研究员, E-mail: chuanyu.liu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2024-10-10, 收修改稿日期: 2024-12-03

2021), 另一部分是基于模式数据(Beech *et al*, 2022), 主要从中尺度涡本身的规律展开, 而对于气候变化对其影响机制的研究则较少。当前气候变暖背景下, 为什么在西边界流等区域呈现涡动能的增长趋势, 而在副热带的一些区域则呈现涡动能减小的趋势? 都是尚未解答的重要科学问题。

斜压不稳定性与中尺度涡旋生成之间有着密切的联系, 是理解涡旋生成、演化和结构变异特征的关键因素。斜压不稳定通过将有效位能(available potential energy, APE)转化为涡位能(eddy potential energy, EPE)并最终转化为 EKE, 驱动了中尺度涡旋的形成和发展。斜压不稳定的增长率与中尺度涡旋的发生频率高度正相关。在增长率较高的区域, 如黑潮、墨西哥湾流及其延伸区域和南极绕极流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)等, 中尺度涡旋更容易生成, 且涡旋数量也相对较多(Tulloch *et al*, 2011; Feng *et al*, 2021)。此外, 斜压不稳定的扰动波波长与观测到的涡旋特征尺度也较为一致(Feng *et al*, 2021), 都验证了斜压不稳定性在涡旋生成过程中的关键作用。

Feng 等(2021)的研究根据垂直结构将斜压不稳定分成 4 种主要类型, 不同类型的斜压不稳定可以预测不同种类的涡旋, 比如表层强化(表层扰动振幅最大)的 Charney\_s(Charney surface)型斜压不稳定可以预测表层涡旋, 而海洋内部强化(在次表层甚至更深的层次扰动振幅最大)的 Phillips 型斜压不稳定可以预测次表层涡旋等内部强化型涡旋。其中, Charney\_s 型斜压不稳定广泛分布在全球的各个区域, 尤其集中在南北半球的副热带区域。本文选择了南太平洋热带-副热带区作为研究区域, 来探究 Charney\_s 型斜压不稳定的长期变化趋势, 并进一步理解该区域中尺度涡旋的变化情况。

近年来, 南太平洋热带-副热带区域的年代际变化与厄尔尼诺(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的年代际变率密切相关。研究表明, 南太平洋通过温盐特征和海洋动力过程(如温跃层深度调节)影响 ENSO 的变化, 同时 ENSO 反过来调控南太平洋的温盐结构和流场, 加剧区域变化(Zhang *et al*, 1998; Luo *et al*, 2003, 2005)。例如, 副热带区域的盐度异常可能通过改变温盐梯度影响赤道环流的强度, 而温跃层深度的波动则在热带与副热带区域的能量交换中起关键作用(Yang *et al*, 2009; Zhang *et al*, 2013)。此外, Zhang 等(2022)研究表明, ENSO 期间的局部冷却效应与远程变暖效应相互作用, 进一步加剧了南太平洋区域的温盐结构调整和流场变化。这些研究表明, 南太平洋的

海洋基本状态并非固定不变, 而是受大尺度环流和 ENSO 反馈机制驱动, 呈现出显著的动态演化特征。这些大尺度变化通过调控海洋的温盐结构和流场分布, 可能会影响区域内斜压不稳定的增长率及其长期变化趋势。

本文利用 1993~2022 年间的 IAP (Institute of Atmospheric Physics)温盐格点数据, 研究了南太平洋热带-副热带区 Charney\_s 型斜压不稳定的长期变化趋势。同时, 结合卫星高度计数据, 计算了表层 EKE 的变化趋势, 对比分析了斜压不稳定性、APE 及 EKE 的变化, 以进一步理解其不同时间尺度上的演变特征。此外, 通过诊断计算, 深入探讨了斜压不稳定性变化的原因。

## 1 数据资料

### 1.1 IAP 数据

IAP 温盐数据由中国科学院大气物理研究所提供(Cheng *et al*, 2017), 采用自主研发的格点化技术构建了长期的全球温度和盐度数据集。该数据集提供了高质量的三维温盐客观分析数据, 覆盖包括极地在内的全球所有海域, 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 垂直范围为 1~2 000 m, 垂直方向分为 41 层, 层距不等。本数据集相较于同类数据集体现出更好的质量(Cheng *et al*, 2016)。我们选择的时间范围为 1993~2022 年。

基于温盐数据并根据 P-vector 方法(Chu, 1995)通过位势密度计算了地转流, 其格点位于温盐格点的中间, 为确保斜压不稳定计算的准确性, 将温盐数据统一插值到了地转流的格点上。

### 1.2 卫星高度计数据

AVISO 卫星高度计数据由哥白尼海洋环境监测服务(Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)提供。该网格数据包含 1993 年 1 月至 2022 年 12 月日均的海表高度异常数据(sea level anomaly, SLA)和海表面地转流速数据, 该数据的水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

## 2 方法

### 2.1 线性稳定性分析(linear stability analysis, LSA)

斜压不稳定问题, 就是考察在基本状态(斜压的)上叠加一个中尺度小扰动的稳定性问题。现实海洋中总会存在各种小扰动, 其中一些扰动的影响是暂时的, 然而也有些扰动会与基本背景状态发生相互作用, 吸收能量并导致扰动振幅的增长。其增长的时间尺度和

空间尺度受初始扰动与背景状态之间的动力学相互作用的影响。

斜压不稳定一般通过线性稳定性分析方法进行研究。从数学角度来看,可以为初始状态下的准地转位涡方程设定一个垂向结构未知的平面波解,来求解该方程。若解为复数,则其虚部代表增长率,表明该扰动是非稳定的。对于海洋中的斜压不稳定性,LSA方法主要基于无黏性的准地转位涡方程(quasi-geostrophic potential vorticity, QGPV),将平均流  $U=U(z)\vec{i}+V(z)\vec{j}$  和平均位涡  $Q=\beta y+\nabla\cdot U+g/\rho_0\partial z(fg/N^2)$  线性化,可以得到如下的方程

$$q_t+U\cdot\nabla q+u\cdot\nabla Q=0, -H<z<0, \quad (1)$$

$$\Phi_{zt}+U\cdot\nabla\Phi_z+u\cdot\nabla(\Phi_z+f^{-1}N^2\eta)=0, z=(0,-H), \quad (2)$$

其中,  $q=\nabla^2\Phi+\Gamma\Phi$  是涡旋准地转位涡,  $q_t$  是  $q$  随时间变化分量,  $\nabla q$  是  $q$  的水平梯度,  $\Gamma=\partial_z(f^2/N^2\partial_z)$  是涡旋垂向拉伸算子,  $u=-\Phi_x\vec{i}+\Phi_y\vec{j}$  是用水平涡流函数  $\Phi=\Phi(x,y,z,t)$  计算得到的涡旋流速,  $\Phi_z=V_z\vec{i}-U_z\vec{j}$  与通过热风关系的平均水平浮力梯度成正比,  $\Phi_{zt}$  是流函数关于时间和深度的联合变化率。  $N^2=-g[\rho_0(d\bar{\rho}/dz)]$  是根据平均密度计算的浮力频率平方,  $\rho_0=1\ 030\text{ kg/m}^3$  是参考密度,  $f=2\Omega\sin\theta$  是科氏参数。当  $z=-H$  时,  $\eta$  是底部地形高度,而  $z=0$  时,  $\eta=0$ 。准地转位涡的水平梯度  $\nabla Q$  可表示为

$$\nabla Q=Q_x\vec{i}+Q_y\vec{j}=(\Gamma V+\nabla^2 V)\vec{i}+(\beta-\Gamma U-\nabla^2 U)\vec{j}, \quad (3)$$

其中,  $\beta=2\Omega R_e^{-1}\cos\theta$  是具体的行星位涡梯度,  $\Omega$  是地球旋转速率,  $R_e$  是地球半径,  $\theta$  是纬度。

在确定好初始的海洋状态后,将垂向结构未知、具有周期波动的平面解  $\Phi=\Psi(z)e^{i(K\cdot x-\omega t)}$  带入到初始方程(1)和(2),其中  $\Psi(z)$  是水平速度的流函数的复振幅,可以得到

$$(\mathbf{K}\cdot\mathbf{U}-\omega)(\Gamma-|\mathbf{K}|^2)\Psi=\Pi\Psi, -H<z<0, \quad (4)$$

$$(\mathbf{K}\cdot\mathbf{U}-\omega)\Psi_z=A\Psi, z=0, -H, \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{K}=(K_x, K_y)$  是波矢,  $|\mathbf{K}|=\sqrt{K_x^2+K_y^2}$ ,  $K_x$  是纬向波数,  $K_y$  是经向波数。

$$\Pi=K_xQ_y-K_yQ_x, \quad (6)$$

$$A=K_x(U_z-N^2\alpha_y/f)+K_y(V_z-N^2\alpha_x/f), \quad (7)$$

其中,  $\alpha_x$  是纬向地形坡度,  $\alpha_y$  是经向地形坡度。

斜压不稳定的各项特征,比如增长率、相速度、垂向结构等,可以通过求解上述特征值得到。

使用垂向中心差分的方法(Smith, 2007; Tulloch et al, 2009),可以将方程(4)和(5)转化成特征值  $\omega$  的求解问题,并通过扫描不同波数而计算不同波数下的不稳定。当发生不稳定时,特征值  $\omega=\omega_r+i\omega_i$  是复数,且虚部  $\omega_i$  是正值,从而保证初始扰动增长,如图 1a 所示,而实部  $\omega_r$  则描述了斜压不稳定的频率。增长率  $\omega_i$  是指初始扰动 e 指数增长到 1 所用的时间的倒数,在  $K_x-K_y$  空间中呈现关于原点中心对称的分布特征。特征函数  $\Psi$  是复数,表示不稳定的垂向结构,通常只考虑特征函数的绝对值  $\varphi$ ,即  $\varphi=|\Psi|$ ,并将其归一化,使其最大值等于 1 (Beckmann, 1988; Smith, 2007; Tulloch et al, 2011)。Charney\_s 型斜压不稳定的结构如图 1b 所示,表层振幅最大,向底层快速单调递减,至

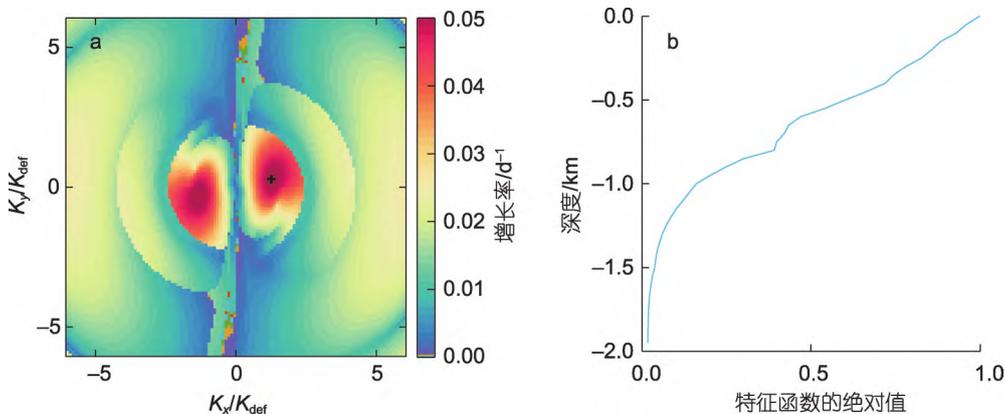


图 1 2019 年(150°E, 38°N)位置 Charney\_s 型斜压不稳定的增长率(a)和最快发展的不稳定的垂向结构(b)

Fig.1 The growth rate and vertical structure of the fastest-growing instability of the Charney\_s type baroclinic instability at the location (150°E, 38°N) in 2019

注: 最快发展的不稳定的波数以+号标记,  $K_{def}$  是第一斜压变形半径波数,  $K_x$  是纬向波数,  $K_y$  是经向波数, 图 b 是最快发展的不稳定的垂向结构(标准化使得最大值等于 1)

某一深度接近于 0。本文中计算的波数范围是  $0 \sim 5 K_{\text{def}}$ , 波数扫描间隔为  $0.1 K_{\text{def}}$ , 其中  $K_{\text{def}}$  为局地 Rossby 变形半径对应的波数。 $K < 5 K_{\text{def}}$  的标准是为了剔除亚中尺度不稳定, 而只保留中尺度不稳定性 (Tulloch *et al.*, 2011; Feng *et al.*, 2021)。

## 2.2 涡旋动能(EKE)

每单位质量的 EKE 定义为

$$\text{EKE} = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2), \quad (8)$$

其中,  $u'$  表示海表纬向地转速度异常,  $v'$  表示海表经向地转速度异常。地转速度异常数据通过 1993~2022 年的海表地转速度数据减去过去 30 年地转速度的长期平均值得到。

## 2.3 有效位能(APE)

斜压不稳定通过将 APE 转化为 EKE 来驱动涡旋的生成和发展, 因此斜压不稳定的增长率与 APE 的大小密切相关 (Gill *et al.*, 1974)。Charney\_s 型不稳定影响深度主要集中于上层, 因此, 本研究专注于计算上 1 000 m 的有效位能, APE 计算公式如下 (Smith, 2007)

$$\begin{aligned} \text{APE} &= \frac{\rho_0}{2} \int_{-H}^0 \frac{f^2}{N^2} \Psi_z^2 dx dy dz \\ &= \frac{\rho_0 L^4}{2} \int_{-H}^0 \frac{f^2}{N^2} \left( \frac{U_z^2 + V_z^2}{3} - \frac{U_z V_z}{4} \right) dz, \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\Psi = -Ux + Vy$  是平均流的流函数, 假设符合准地转近似条件, 忽略交叉项后, APE 可以表示为

$$\text{APE} = \frac{\rho_0 L^4}{6} \int_{-H}^0 \frac{f^2}{\text{Ri}(z)} dz, \quad (10)$$

$$\text{Ri}(z) = \frac{N^2}{U_z^2 + V_z^2}, \quad (11)$$

其中, Ri 是理查森数。根据 Smith (2007) 的研究, 斜压不稳定的增长率与有效位能的关系, 可以近似用式 (12) 来估计

$$\sigma = f \sqrt{\frac{1}{H} \int_{-H}^0 \frac{dz}{\text{Ri}(z)}} \propto \sqrt{\text{APE}}. \quad (12)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 南太平洋热带-副热带区域的斜压不稳定的增长率的年代际变化

过去几十年间, 南太平洋热带-副热带区的大尺度海洋过程经历了显著的年代际变化, 这些变化直接影响了区域的温盐结构和流场 (Zhang *et al.*, 2022)。南太平洋热带-副热带区域的不稳定类型以 Charney\_s 型为主, 该区域的斜压不稳定是由表层 (0~100 m) 向东流

的副热带逆流和次表层 (100~800 m) 向西流的南赤道流的剪切形成的 (Qiu *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2021)。图 2 是 1993 年和 2022 年南太平洋热带-副热带区域的增长率分布图。在本文中, 我们将南太平洋热带-副热带区域分为南太平洋热带区域 (south Pacific tropical, SPT, 165°E~165°W, 10°~25°S) 和南太平洋副热带区域 (south Pacific subtropical, SPS, 165°E~165°W, 25°~40°S)。这是因为, 这两个区域的斜压不稳定的增长率呈现相反的变化趋势。SPT 区域的增长率在 1993 年最高可达  $0.077 \text{ d}^{-1}$ , 但在 2022 年最高仅为  $0.034 \text{ d}^{-1}$ ; 平均增长率在 2022 年显著低于 1993 年, 前者为  $0.020 \text{ d}^{-1}$ , 后者为  $0.013 \text{ d}^{-1}$ 。与之相反, SPS 区域的最大增长率在 1993 年为  $0.062 \text{ d}^{-1}$ , 而在 2022 年为  $0.097 \text{ d}^{-1}$ ; 与此同时, 平均增长率在 2022 年 ( $0.022 \text{ d}^{-1}$ ) 略高于 1993 年 ( $0.021 \text{ d}^{-1}$ )。由此可见, 南太平洋热带区域斜压不稳定的增长率确实随气候变化而产生了变化。

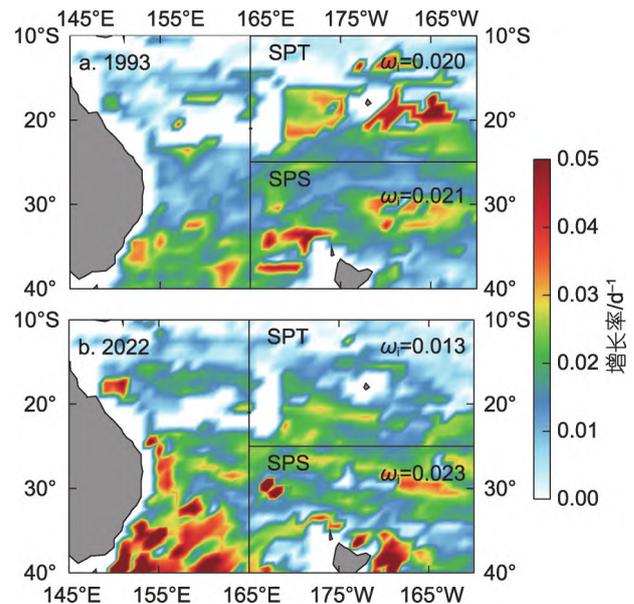


图 2 1993 年(a)和 2022 年(b)南太平洋热带-副热带区域的增长率分布图

Fig.2 The distribution of growth rates in the tropical-subtropical region of the South Pacific in 1993 and 2022  
注: SPT: 南太平洋热带区域; SPS: 南太平洋副热带区域;  $\omega_i$ : 该区域的平均增长率

为了进一步判断 SPT 和 SPS 两个区域的增长率是否存在显著的长期变化趋势, 我们对 1993~2022 年共 30 a 的斜压不稳定的增长率进行了长期趋势分析。线性回归分析结果表明, 增长率在 SPT 和 SPS 两个区域长期内确实存在显著变化趋势。图 3 是 1993~2022

年南太平洋热带-副热带区域的增长率趋势图,该区域大部分趋势已经通过了 95% 的置信度检验。在 SPT 区域,增长率总体呈现负趋势,表明在过去 30 a 中,该区域的斜压不稳定性有所减弱。然而,趋势强度在 SPT 区域内存在空间差异,部分区域的负趋势更加显著。相比之下,SPS 区域的增长率总体呈现正趋势,表明在同一时间段内,该区域的斜压不稳定性有所增强。与 SPT 区域相比,SPS 区域的趋势强度也存在空间差异性。

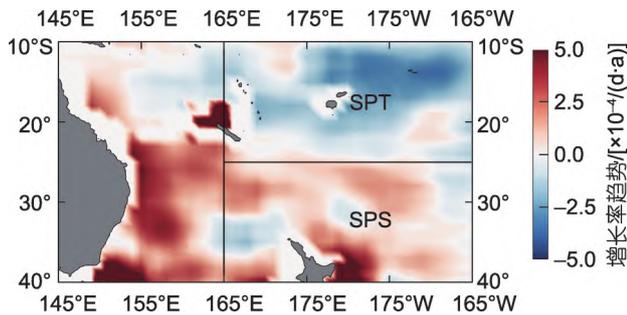


图3 1993~2022年南太平洋变化趋势的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the growth rate trend changes in the tropical-subtropical region of the South Pacific from 1993 to 2022

斜压不稳定的增长率与 EKE 有很强的正相关性,通常增长率高的区域,EKE 强,反之亦然(Travis *et al*, 2017)。因此,为了进一步验证斜压不稳定增长率的长期趋势,我们计算 1993~2022 年期间的海表 EKE 趋势,我们的计算结果与 Martínez-Moreno 等(2021)的类似。通过对 EKE 的长期趋势进行计算并与斜压不稳定增长率的趋势图进行对比分析,我们发现两者在趋势上高度一致。如图 4 所示,在 SPT 区域,斜压不稳定的增长率呈现负趋势,EKE 也表现出下降的趋势;而在 SPS 区域,斜压不稳定的增长率呈现正趋势,EKE 则显示出上升的趋势。这种一致性表明,EKE 的长期变化趋势与斜压不稳定性有密切关系,两者在不同区域的变化可能受相似的动力过程驱动。

为了进一步分析 SPT 和 SPS 区域增长率及涡动能 EKE 的年际变化,我们对每一年的数据进行了区域平均处理。由此获得了这两个区域在过去 30 a 中的增长率和涡动能时间序列,结果如图 5 所示。在 SPT 区域,增长率和 EKE 总体都呈下降趋势,二者的变化趋势相对一致,斜压不稳定增长率每 10 a 减少 0.12%,EKE 每 10 a 减少 0.09%。在 SPS 区域,增长率和 EKE 总体都呈增长趋势,有些年份的变化略有差异,斜压不稳定增长率每 10 a 增加 0.10%,EKE 每 10 a 增加 0.05%。

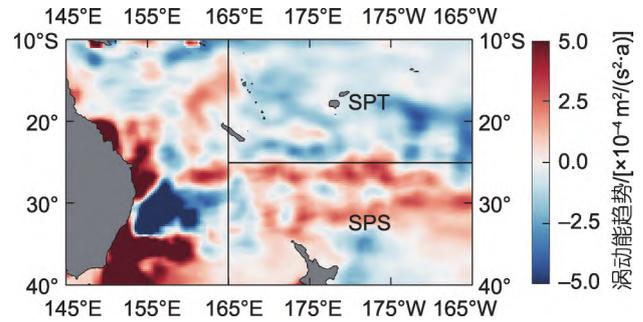


图4 1993~2022年南太平洋热带-副热带区域涡动能变化趋势的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the EKE trend changes in the tropical-subtropical region of the South Pacific from 1993 to 2022

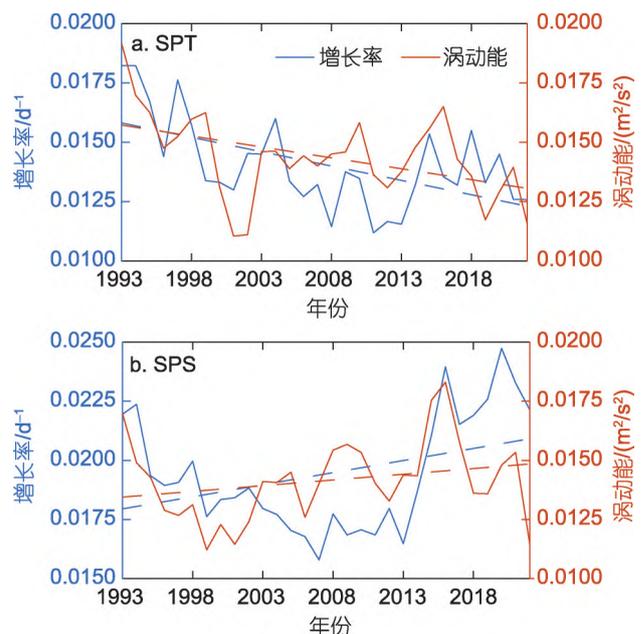


图5 SPT 区(a)和 SPS 区(b)平均增长率和涡动能的时间序列

Fig.5 Time series of the average growth rate and eddy kinetic energy for the SPT (a) and SPS (b) regions

值得注意的是,在 2016 年,2 个区域的增长率和 EKE 均显著增加,这主要归因于 2015~2016 年期间发生的厄尔尼诺现象。厄尔尼诺事件会导致北赤道逆流和南赤道流北支的增强,这种变化对 EKE 趋势产生了显著影响(McPhaden, 1999; Johnson *et al*, 2000)。厄尔尼诺事件在赤道流中的异常环流会延伸到赤道外区域(9°N~9°S),并产生强烈的年际波动,这些波动会掩盖长期的 EKE 趋势,在极端的东太平洋厄尔尼诺事件中,这种影响尤为显著(Wang *et al*, 2013)。

在西边界流、ACC 等涡旋强烈的区域,EKE 变化通常表现出较大的正趋势,中低纬南太平洋 EKE 的变

化趋势较弱,表现为较小的变化或负趋势(Martínez-Moreno *et al.*, 2021)。尽管如此,南太平洋中低纬区域内涡旋活动的变化趋势在空间上表现出相反的变化趋势,这反映了该区域能量转移和转化过程的复杂性。EKE 的变化趋势与斜压不稳定的增长率变化趋势的一致性说明了斜压不稳定过程在驱动南太平洋涡旋动能变化中的关键作用,有助于厘清气候变化背景下该区域能量的转移转化过程。

### 3.3 南太平洋热带-副热带区域上层 APE 的年代际变化

斜压不稳定通过将平均流的 APE 转化为中尺度涡旋的 EKE,为涡旋的生成提供能量(Gill *et al.*, 1974)。前人研究表明,在南太平洋热带-副热带区域斜压能量转化主要集中于 1 000 m 以上(Feng *et al.*, 2022)。为了确定 APE 的深度范围,我们分析了区域平均的 Charney\_s 型斜压不稳定的垂向结构  $\psi$ 。如图 6 所示,Charney\_s 型斜压不稳定的垂向结构为表层振幅最大,并随着深度增加逐渐衰减。以振幅 0.2 为标准(当振幅小于 0.2 时,认为不稳定的扰动振幅过小,可以忽略不计),发现 SPT 区域有效深度在 900 m 附近,而 SPS 区域有效深度在 1 200 m 附近。因此,我们选择 1 000 m 为标准来计算上层的有效位能。

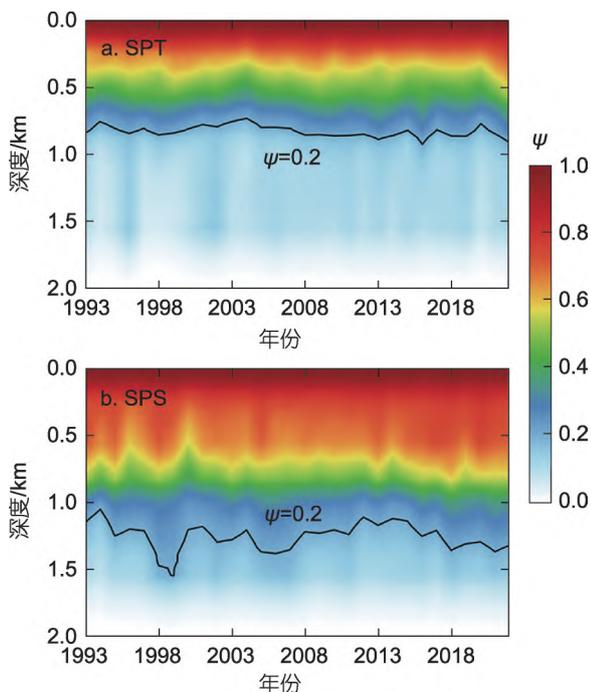


图 6 SPT 区(a)和 SPS 区(b)区域平均的不稳定的垂向结构  
Fig.6 Regional mean vertical structure in the SPT (a) and SPS (b) regions

注: 黑色实线表示振幅  $\psi$  为 0.2 时所在的深度

图 7 是 1993~2022 年南太平洋热带-副热带区域的 APE 趋势图。在 SPT 区域,APE 总体呈现负趋势,与增长率和 EKE 的变化趋势一致;而在 SPS 区域,APE 总体呈现正趋势,也与增长率和 EKE 的变化趋势一致。这种趋势的一致性表明,APE 的变化直接影响了斜压不稳定的增长率,从而影响了涡旋动能的变化。当 APE 增加时,提供了更多的能量来源驱动斜压不稳定性的增长,促进了 APE 向中尺度涡 EKE 的有效转化,从而导致 EKE 的增加。当 APE 减少时,提供的能量减少,导致斜压不稳定性减弱,使得 APE 向 EKE 的转化减少,从而导致 EKE 的减少。

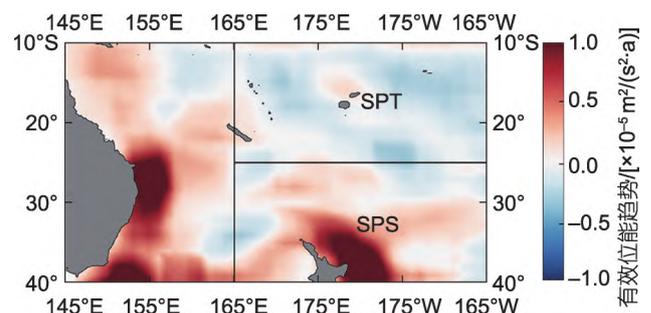


图 7 1993~2022 年南太平洋热带-副热带区域有效位能变化趋势的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the APE trend changes in the tropical-subtropical region of the South Pacific from 1993 to 2022

另外,还将 SPT 区和 SPS 区 APE 估算的增长率与实际增长率的时间序列进行了对比,如图 8 所示。在 SPT 区域,APE 估算增长率和实际增长率总体都呈下降趋势,有些年份的变化略有差异。在 SPS 区域,APE 估算增长率和实际增长率总体都呈增长趋势,且变化较为一致。SPT 和 SPS 区域斜压不稳定增长率,EKE 和 APE 一致且相反的变化趋势,反映了气候变化背景下斜压不稳定性及其引起的能量转移转化的区域性差异。

### 3.4 南太平洋热带-副热带区域斜压不稳定长期变化的控制机制

Charney\_s 型斜压不稳定的生成主要是由于表层和内区准地转位涡梯度反号(Charney, 1947; Feng *et al.*, 2021),而准地转位涡梯度受平均流垂向剪切( $U_z$ )和层结( $N^2$ )的共同控制[式(3)]。前人研究表明,不同区域, $U_z$  和  $N^2$  对斜压不稳定的影响不同,比如在黑潮延伸体和湾流延伸体区域,斜压不稳定的季节变化基本由层结主导,而在热带-副热带区域,斜压不稳定的季节变化由  $U_z$  和  $N^2$  的共同控制(Feng *et al.*, 2022)。

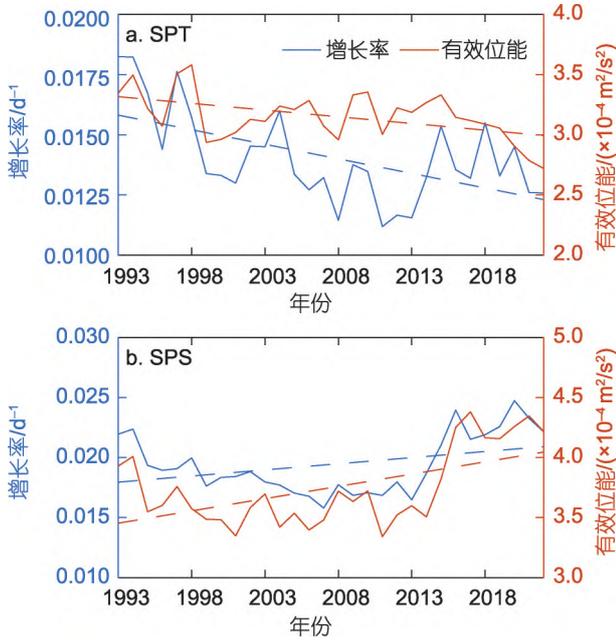


图8 SPT区(a)和SPS区(b)平均增长率和APE估算增长率的时间序列

Fig.8 The time series of the mean growth rate and APE-estimated growth rate in the SPT (a) and SPS (a) regions

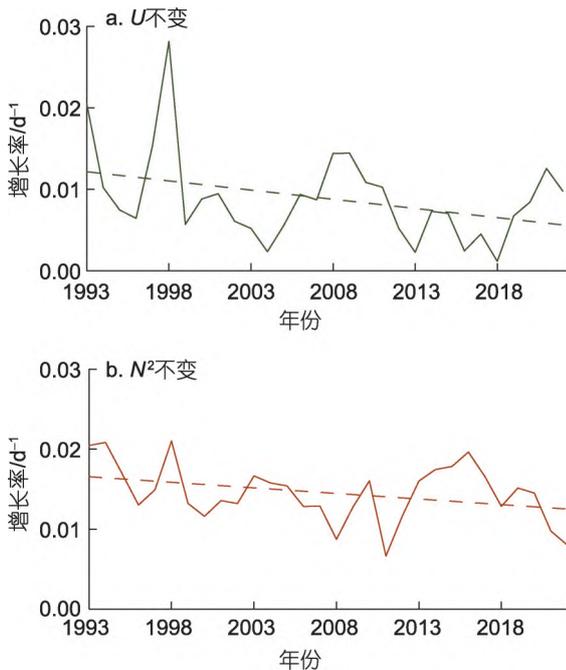


图9 基于SPT区域不同年份的层结和平均流计算所得到的增长率的时间序列

Fig.9 The time series of growth rates calculated based on stratification and mean flow in different years in the SPT region

因此,为了深入分析这两者对不稳定性长期变化的具体贡献,我们分别针对SPT和SPS区域进行了诊断计算。以SPT区域为例,第一组保持1993年的平

均流不变,而层结条件则使用1993~2022年的数据进行计算,得到30a的增长率变化趋势。结果如图9a所示,增长率呈现负趋势,表明层结在一定程度上抑制了SPT区域的斜压不稳定性。第二组中,我们保持1993年的层结条件不变,采用1993~2022年的平均流进行计算,结果显示增长率同样呈现负趋势(图9b)。这一结果说明,平均流也对SPT区域的斜压不稳定性产生了抑制作用。通过诊断计算,我们可以得出结论: SPT区域的斜压不稳定性的长期减弱变化是由平均流和层结共同决定的,两者都对不稳定性减弱趋势有显著影响。

在SPS区域,我们同样进行了诊断计算,以探讨平均流和层结对斜压不稳定性的影响。在第一组中,保持平均流不变,结果如图10a所示,增长率总体上呈现负趋势,但每年的波动较大。这表明,层结在一定程度上抑制了SPS区域的斜压不稳定性。在第二组中,保持层结条件不变,结果显示增长率呈现正趋势(图10b)。这一结果表明,平均流对SPS区域的斜压不稳定性具有增强作用。结合这两组诊断计算的结果,我们可以得出结论:SPS区域的斜压不稳定性的长期变化趋势主要受平均流的长期变化趋势控制。因为,实际SPS区域的增长率呈现上升趋势,这支持了

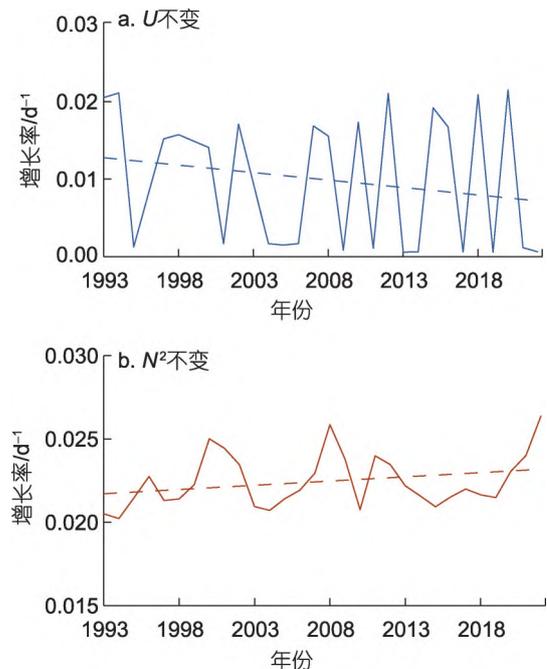


图10 基于SPS区域不同年份的层结和平均流计算所得到的增长率的时间序列

Fig.10 The time series of growth rates calculated based on stratification and mean flow in different years in the SPS region

平均流在该区域斜压不稳定性变化中的主导作用。

Hu 等(2020)的研究发现,自 20 世纪 90 年代早期以来的近 30 a 中,全球大尺度海洋动能显著增加,主要集中在热带区域,并且延伸至深海层,这表明全球平均海洋环流存在显著的加速趋势。其结果显示,在南太平洋热带区域的海洋动能呈现减少趋势,说明该区域流场减弱,而南太平洋副热带区域则表现出增加趋势,说明流场在增强。这种流场变化与我们的发现一致,进一步强调了海洋流场对斜压不稳定性影响。Li 等(2020)的研究则揭示了过去半个世纪全球海洋层结的持续增加。这种层结的变化影响了斜压不稳定性,特别是在 SPT 和 SPS 区域的不同表现。总之,斜压不稳定性是海洋状态(层结)和海洋动力(流场)共同变化的结果,二者的相互作用决定了不稳定性的变化趋势。

#### 4 结论

本研究对 1993~2022 年间 SPT 和 SPS 区域的斜压不稳定性进行了分析,揭示了其年代际变化特征及驱动机制。研究发现,这 2 个区域的斜压不稳定性表现出明显不同的趋势。在热带区域,斜压不稳定的增长率显著呈负趋势,表明该区域的斜压不稳定性在减弱,进而导致 APE 向 EKE 的转化减少。而在副热带区域,斜压不稳定的增长率则表现为正趋势,说明该区域的斜压不稳定性有所增强,从而导致有效位势能向中尺度涡旋动能的转化增强。这些变化与区域内的海洋动力学过程密切相关,特别是与 EKE 和 APE 的变化紧密相连。

为了深入探讨斜压不稳定变化的驱动机制,本研究还进行了诊断计算,以考察平均流和层结对斜压不稳定性影响。研究发现,在南太平洋热带区域,平均流和层结都对斜压不稳定的减弱发挥了作用,而在副热带区域,平均流对斜压不稳定的增强发挥了主导作用。

斜压不稳定性在海洋动力学中扮演着关键角色,是连接背景场(流场和层结)与 EKE 的关键环节。背景场中层结和流场的变化对斜压不稳定性生成具有直接影响,而斜压不稳定性又影响到中尺度涡旋的形成和强度。尽管背景层结和流场的变化以及中尺度涡旋的存在已得到广泛关注,但斜压不稳定性作为这两者之间的重要中间环节常常被忽视。

本研究深入探讨了斜压不稳定性如何从背景场的变化(流场和层结)通过动态过程转化为中尺度涡

EKE,这不仅填补了现有研究中的不足,也为理解海洋动力学的整体过程提供了新视角。未来的研究可以基于这些发现,进一步探讨其他海域的斜压不稳定性及其对区域气候系统的影响,从而更全面地理解全球气候变化对海洋系统的整体影响,特别是在不同海域和气候背景下的斜压不稳定性变化及其对气候模式的反馈机制。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

#### 参 考 文 献

- BECKMANN A, 1988. Vertical structure of midlatitude mesoscale instabilities [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 18(10): 1354-1371.
- BEECH N, RACKOW T, SEMMLER T, *et al*, 2022. Long-term evolution of ocean eddy activity in a warming world [J]. *Nature Climate Change*, 12(10): 910-917.
- CHARNEY J G, 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 4(5): 136-162.
- CHENG L J, TRENBERTH K E, FASULLO J, *et al*, 2017. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015 [J]. *Science Advances*, 3(3): e1601545.
- CHENG L J, ZHU J, 2016. Benefits of CMIP5 multimodel ensemble in reconstructing historical ocean subsurface temperature variations [J]. *Journal of Climate*, 29(15): 5393-5416.
- CHU P C, 1995. P-vector method for determining absolute velocity from hydrographic data [J]. *Marine Technology Society Journal*, 29(2): 3-14.
- FENG L, LIU C Y, KÖHL A, *et al*, 2021. Four types of baroclinic instability waves in the global oceans and the implications for the vertical structure of mesoscale eddies [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(3): e2020JC016966.
- FENG L, LIU C Y, KÖHL A, *et al*, 2022. Seasonality of four types of baroclinic instability in the global oceans [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(5): e2022JC018572.
- GILL A E, GREEN J S A, SIMMONS A J, 1974. Energy partition in the large-scale ocean circulation and the production of mid-ocean eddies [J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 21(7): 499-528.
- HU S J, SPRINTALL J, GUAN C, *et al*, 2020. Deep-reaching acceleration of global mean ocean circulation over the past two decades [J]. *Science Advances*, 6(6): eaax7727.
- JOHNSON G C, MCPHADEN M J, DAIL ROWE G, *et al*, 2000. Upper equatorial Pacific Ocean current and salinity variability during the 1996-1998 El Niño-La Niña cycle [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C1): 1037-1053.
- KWON Y O, ALEXANDER M A, BOND N A, *et al*, 2010. Role

- of the Gulf Stream and Kuroshio–Oyashio systems in large-scale atmosphere–ocean interaction: A review [J]. *Journal of Climate*, 23(12): 3249-3281.
- LI G C, CHENG L J, ZHU J, *et al*, 2020. Increasing ocean stratification over the past half-century [J]. *Nature Climate Change*, 10(12): 1116-1123.
- LUO J J, MASSON S, BEHERA S, *et al*, 2003. South Pacific origin of the decadal ENSO-like variation as simulated by a coupled GCM [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 2250.
- LUO Y Y, ROTHSTEIN L M, ZHANG R H, *et al*, 2005. On the connection between South Pacific subtropical spiciness anomalies and decadal equatorial variability in an ocean general circulation model [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C10): C10002.
- MARSHALL J, SCOTT J R, ROMANOU A, *et al*, 2017. The dependence of the ocean's MOC on mesoscale eddy diffusivities: A model study [J]. *Ocean Modelling*, 111: 1-8.
- MARTÍNEZ-MORENO J, HOGG A M, ENGLAND M H, *et al*, 2021. Global changes in oceanic mesoscale currents over the satellite altimetry record [J]. *Nature Climate Change*, 11(5): 397-403.
- MCPHADEN M J, 1999. The child prodigy of 1997-98 [J]. *Nature*, 398(6728): 559-561.
- QIU B, CHEN S M, KLEIN P, *et al*, 2014. Seasonal mesoscale and submesoscale eddy variability along the North Pacific Subtropical Countercurrent [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 44(12): 3079-3098.
- SMITH K S, 2007. The geography of linear baroclinic instability in Earth's oceans [J]. *Journal of Marine Research*, 65(5): 655-683.
- SUTTON R T, HODSON D L R, 2007. Climate response to basin-scale warming and cooling of the North Atlantic Ocean [J]. *Journal of Climate*, 20(5): 891-907.
- TOGGWEILER J R, RUSSELL J, 2008. Ocean circulation in a warming climate [J]. *Nature*, 451(7176): 286-288.
- TRAVIS S, QIU B, 2017. Decadal variability in the South Pacific Subtropical Countercurrent and regional mesoscale eddy activity [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 47(3): 499-512.
- TULLOCH R, MARSHALL J, HILL C, *et al*, 2011. Scales, growth rates, and spectral fluxes of baroclinic instability in the ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 41(6): 1057-1076.
- TULLOCH R, MARSHALL J, SMITH K S, 2009. Interpretation of the propagation of surface altimetric observations in terms of planetary waves and geostrophic turbulence [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C2): C02005.
- WANG S P, JING Z, WU L X, *et al*, 2024. A more quiescent deep ocean under global warming [J]. *Nature Climate Change*, 14(9): 961-967.
- WANG L C, WU C R, 2013. Contrasting the flow patterns in the equatorial Pacific between two types of El Niño [J]. *Atmosphere-Ocean*, 51(1): 60-74.
- WU L X, CAI W J, ZHANG L P, *et al*, 2012. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents [J]. *Nature Climate Change*, 2(3): 161-166.
- YANG H, LOHMANN G, KREBS-KANZOW U, *et al*, 2020. Poleward shift of the major ocean gyres detected in a warming climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 47(5): e2019GL085868.
- YANG H J, WANG F Y, 2009. Revisiting the thermocline depth in the equatorial Pacific [J]. *Journal of Climate*, 22(13): 3856-3863.
- ZHANG R H, GAO C, FENG L C, 2022. Recent ENSO evolution and its real-time prediction challenges [J]. *National Science Review*, 9(4): nwac052.
- ZHANG R H, ROTHSTEIN L M, BUSALACCHI A J, 1998. Origin of upper-ocean warming and El Niño change on decadal scales in the tropical Pacific Ocean [J]. *Nature*, 391(6670): 879-883.
- ZHANG R H, WANG Z G, 2013. Model evidence for interdecadal pathway changes in the subtropics and tropics of the South Pacific Ocean [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(1): 1-9.

## MECHANISM OF BAROCLINIC INSTABILITY AND MULTIDECADAL TREND IN SOUTH PACIFIC TROPICAL-SUBTROPICAL REGION

LIU Dan-Dan<sup>1,2</sup>, ZHU Shan-Liang<sup>1</sup>, LIU Chuan-Yu<sup>2,3</sup>, FENG Ling<sup>2,3</sup>

(1. School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Ocean Dynamic Processes Observation and Forecasting, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract** Using  $1^\circ \times 1^\circ$  gridded data of temperature, salinity, and current fields, the long-term trend and mechanisms of surface-enhanced Charney-type baroclinic instability in the tropical-subtropical region of the South Pacific from 1993 to 2022 were analyzed. Results show that the growth rate in the tropical South Pacific (SPT) exhibited a significant decreasing trend, with a reduction of 0.12% per decade, while that in the subtropical South Pacific (SPS) showed a significant increasing trend, with an increase of 0.10% per decade. These trends are consistent with those observed in eddy kinetic energy (EKE) from satellite observations. The variation in baroclinic instability in the SPT was jointly regulated by shear and stratification, while that in the SPS was primarily influenced by shear, indicating that the variation in baroclinic instability is resulted from the combined effects of temperature, salinity, and current field. Further analysis revealed that the trends in growth rate and EKE were consistent with the trends in local available potential energy (APE), highlighting the critical role of baroclinic instability in energy transfer and conversion.

**Key words** baroclinic instability; mesoscale eddies; eddy kinetic energy; available potential energy