

# 南太平洋 Stokes 漂流在厄尔尼诺衰退过程中的降温作用

董祥晖<sup>1</sup>, 吴克俭<sup>1\*</sup>, 李 瑞<sup>1</sup>, 夏浩峰<sup>2</sup>, 曹同钢<sup>3</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100;

2. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266199;

3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 赤道东太平洋海表面温度的变化在全球气候变化中扮演着重要的角色, 波浪是影响海表面温度的重要因素。为了进一步研究波浪对全球气候的影响, 利用 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 发布的波浪参数、海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 等再分析数据, 采用 EOF (Empirical Orthogonal Function) 分析和超前滞后相关分析等方法, 分析了南太平洋涌浪区 Stokes 漂流与厄尔尼诺事件的关系。首先选用一种涌浪指标和多个涌浪特征值总结了全球的涌浪特征, 得到涌浪在低纬、南半球和大洋东边界更占优的结论, 并由此划定南太平洋涌浪区, 发现了其连接南大洋和赤道东太平洋的通道作用。进而研究了南太平洋涌浪区 Stokes 漂流对赤道东太平洋 SST 的影响, 结果显示: 在厄尔尼诺事件发生后, 该区域的经向 Stokes 漂流会产生强化, 波浪诱导的 Stokes 漂流会将高纬冷水输送到低纬海域, 使得低纬海域降温, 加速厄尔尼诺事件的衰退, 进而影响到全球气候。本文为解释厄尔尼诺的衰退提供了新的思路, 也为波浪的大尺度效应研究开辟了新的方向。

**关键词:** 南太平洋; 涌浪指标; Stokes 漂流; 厄尔尼诺

**中图分类号:** P731

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2022)02-0175-12

**doi:** 10.12362/j.issn.1671-6647.2022.02.002

**引用格式:** 董祥晖, 吴克俭, 李瑞, 等. 南太平洋 Stokes 漂流在厄尔尼诺衰退过程中的降温作用[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(2): 175-186. DONG X H, WU K J, LI R, et al. Cooling effect of the stokes drift in the South Pacific during El Niño's decline[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(2): 175-186.

厄尔尼诺事件一直是海洋研究的热点课题, 一般将 Niño 3 区 (150°~90°W, 5°S~5°N) 海温距平指数连续 6 个月达到 0.5 °C 以上定义为一次厄尔尼诺事件, 即指赤道中、东太平洋海表大范围持续异常增暖的现象。有研究表明, 高纬度地区海洋与大气的异常信号可以通过经向过程影响热带海洋<sup>[1]</sup>。

波浪是上层海洋中非常重要的动力过程, 也是影响海表面温度的重要动力因素之一。由于波浪的持续性, 即使只考虑很小的黏性作用, 小尺度的波浪现象也会产生大尺度效应, 包括波浪对 Ekman 层、大洋环流和大洋热含量的影响<sup>[2-11]</sup>。因此, 研究高纬度地区的波浪是否存在对厄尔尼诺事件的大尺度效应是一个有意义的课题。

南大洋因其特殊的地理位置和气候条件而存在着全球最大的波浪诱导的质量输运, 前人也已经在南大洋的海表面温度、海浪波高等要素中发现了周期为 4 a 左右的绕极波信号<sup>[12-14]</sup>, 此低频信号的周期与厄尔尼诺事件的平均周期十分接近, 所以南大洋的波浪很可能与赤道东太平洋的海温异常之间存在重要的因果关系。Chen 等<sup>[15]</sup>发现了大洋东边界“涌浪池”的存在, Deng 等<sup>[16]</sup>进一步证明南大洋风浪遇陆地阻碍而形成的涌浪汇聚成了大洋东边界的“涌浪池”, 可见“涌浪池”是连接赤道太平洋和南大洋的重要通道。涌浪在大洋

**收稿日期:** 2021-05-21

**资助项目:** 国家自然科学基金面上项目——大洋东边界涌浪传播机制及其大尺度效应研究 (42176018)

**作者简介:** 董祥晖 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事波浪大尺度效应及机器学习应用方面研究. E-mail: dongxianghui@stu.ouc.edu.cn

\* **通信作者:** 吴克俭 (1966—), 男, 教授, 博士, 主要从事波浪大尺度效应及数值模式方面研究. E-mail: kejianwu@ouc.edu.cn

(李 燕 编辑)

中的传播本身又具有速度更快、距离更远、影响范围更大的特点。因此,南大洋的波浪能够通过“涌浪池”对厄尔尼诺事件产生大尺度效应是一个自然而又合理的观点。

毕凡<sup>[17]</sup>将波浪在运动时受地球自转影响产生的科氏-Stokes 力(Coriolis-Stokes Force, CSF)加入到波动方程中,结果表明由此产生的波浪输运是上层水体总输运的重要部分。肖林等<sup>[18]</sup>从体积输运的角度研究得出:Stokes 漂流对全球海表面温度具有降温的作用,且纬度越高作用越明显;同时,他们认为 Stokes 漂流通过其产生的体积输运导致上混合层的海水结构改变,使下层的海水上翻,从而对 SST 产生影响。吴克俭等<sup>[12]</sup>则分别从理论分析和定性计算的角度研究了波浪对海表面温度的影响,结果表明海表面波浪的存在对于上层海洋具有不可忽视的影响,水体输运的变化是影响赤道太平洋 SST 异常的原因之一。在海洋数值模式方面的研究表明,POM(Princeton Ocean Model)中的 Mellor-Yamada (MY)参数化方案(未考虑波浪对上层海洋的作用)存在海洋上混合层模拟深度过浅以及海表面温度模拟过高的问题<sup>[19-20]</sup>。将波浪作用加入到 MY 参数化方案中,模式明显改善了对上层海洋的模拟能力<sup>[21-24]</sup>。Shi 等<sup>[13]</sup>已经研究了波浪输运与拉尼娜事件之间的关系,认为波浪输运异常是拉尼娜事件发生前的信号。但目前国际上对于波浪水平运动对 SST 的影响研究尚不完善,更是缺乏其对厄尔尼诺事件影响的研究。以上工作表明浪致输运和 Stokes 漂流是波浪影响海表面温度的重要原因,而 Stokes 漂流本身就是波浪输运的重要源项,因此研究 Stokes 漂流的影响是十分有必要的。

综上所述,南大洋波浪经南太平洋“涌浪池”诱导产生的 Stokes 漂流势必是影响低纬海表面温度的重要因素。本文首先总结全球涌浪的分布特征,然后重点研究南太平洋的涌浪特征以及南太平洋涌浪区 Stokes 漂流与赤道东太平洋 SST 异常和厄尔尼诺事件之间的关系。

## 1 数据与方法

在本文分析过程中,所用的波浪特征参量(包括有效波高、周期等)、表面 Stokes 漂流(以下简称为 Stokes 漂流)、海温等数据<sup>[25]</sup>均来自于欧洲中尺度天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF),时间跨度为 1970—2009 年,时间分辨率为月,空间分辨率为  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 。该时空分辨率能够满足本文对波浪大尺度效应的研究要求,也与有关厄尔尼诺事件的研究数据的分辨率相适应。ECMWF 发布的数据利用海洋模式、卫星资料等通过同化-再分析的方法获得。该中心目前提供的数据集包括:ERA5、ERA-Interim、ERA-20C、ERA-20CM、CERA-20C 等。本文选择的 CERA-20C 数据集是 ERA-20CM 和 ERA-20C 数据集的最新同化版本,同化了大量的卫星、测站和模式资料,修正了之前版本的误差。另外,文中使用的 Nino3 指数数据<sup>[26]</sup>来自中国气象局下属的国家气候中心,多元 ENSO 指数(Multi-variate ENSO Index, MED)数据<sup>[27]</sup>来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)。前者是研究厄尔尼诺事件时最直接和最常用的指数数据;后者则是统筹考虑了海平面气压(Sea Level Pressure, SLP)、海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)、纬向风分量、经向风分量和向外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)等海-气变量,能够更全面反映厄尔尼诺事件状态的指数数据,也是为数不多能够体现厄尔尼诺事件季节内变化的数据<sup>[28-29]</sup>。本文采取的资料分析方法主要包括 EOF 分析、相关分析和超前滞后分析。

本文的相关计算中,采用的是郑崇伟等<sup>[30]</sup>改进的邓增安等<sup>[31]</sup>、Chen 等<sup>[15]</sup>对涌浪指标(swell index)的算法,从能量的角度计算涌浪指标( $S_1$ ),公式如下:

$$S_1 = \frac{E_s}{E_T} = \frac{H_s^2 T_s}{H_T^2 T_T}, \quad (1)$$

式中: $E$  为能量,  $E \propto H^2 T$ , 其中  $E_s$  为涌浪能,  $E_T$  为混合浪能(即总的波浪能);  $H$  为波高,其中  $H_s$  为涌浪波高,  $H_T$  为混合浪波高;  $T$  为波周期,其中  $T_s$  为涌浪波周期,  $T_T$  为混合浪波周期。

波浪诱导的 Stokes 漂流的公式为:

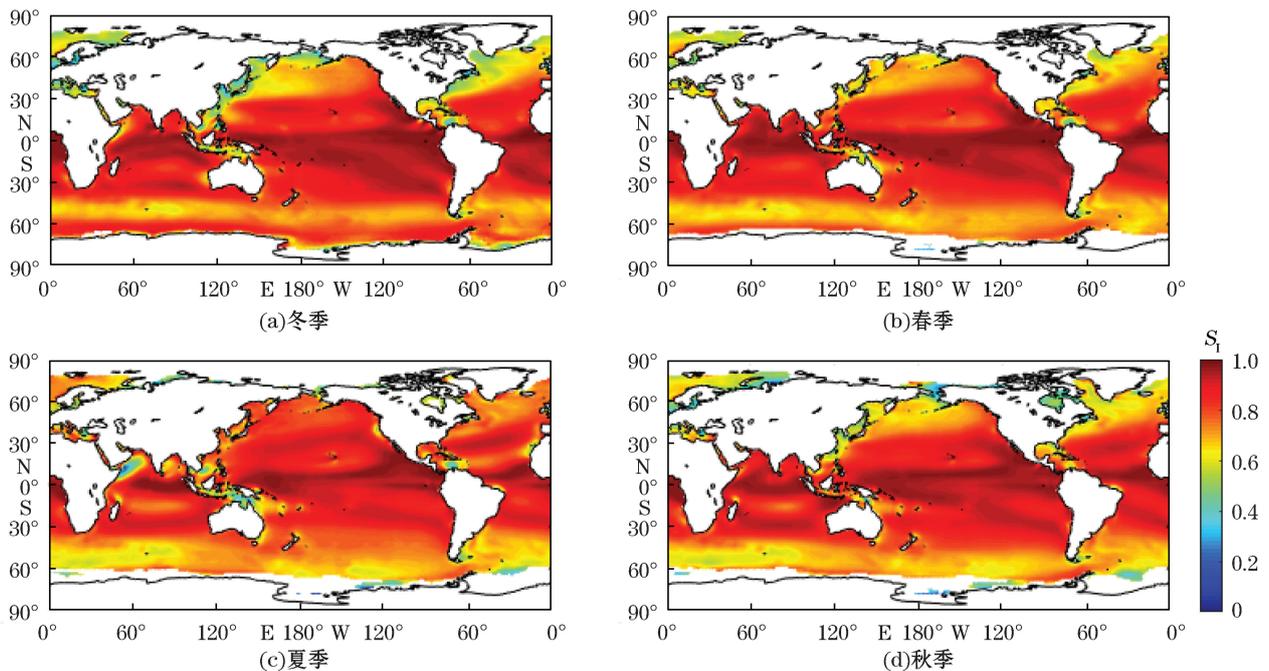
$$\vec{V}_s = |\vec{V}_{ss}| e^{2Kz} \vec{k}, \quad (2)$$

$$\vec{V}_{ss} = a^2 \omega \vec{k}, \quad (3)$$

式中:  $\vec{V}_s$  为波浪诱导的 Stokes 漂流,  $\vec{V}_{ss}$  为中间变量,  $K$  为单频深水重力波的波数,  $\vec{k}$  为单位矢量,  $z$  为深度,  $a$  为波振幅,  $\omega$  为波频。Stokes 漂流以及水体输运方向与波向一致。

## 2 全球涌浪分布特征

涌浪指标式(1)本身反映的是涌浪与混合浪能量之间的比值关系,涌浪指标越高,说明此区域波浪的能量组成中涌浪越占优,反之为风浪占优。图 1 是根据式(1)得到的 40 a 平均全球涌浪指标分布图,当涌浪指标大于 0.9 时,可以认为该区域涌浪占优。波浪的能量与波高平方、平均周期成正比。南大洋特殊的地理位置和气候条件决定了南大洋拥有巨大的波浪能量,但涌浪能量在其中并不占优。从图 1 中可以看出,由于北半球冬季以风浪为主,导致冬季涌浪指标大于 0.9 的区域主要集中在南半球的热带海域;涌浪指标高值区从春季开始逐渐向北扩散到北半球热带区域,并在秋季迅速回撤。同时可以发现,除了在赤道附近涌浪指标明显偏大外,南半球的大洋东边界也始终存在着涌浪指标的高值区。究其原因,是南大洋及其邻近海域东传的风浪受到大陆的阻挡,转而向北形成涌浪汇聚成了“涌浪池”,反映出波浪在传播过程中受地形影响较大的特点<sup>[16]</sup>。结合图 2 可知,在南大洋,尽管是风浪占优,但涌浪波高和平均周期均较大。



注:当涌浪指标大于 0.9 时,表明在该区域的波浪组成中涌浪占优。

图 1 40 a 平均的全球涌浪指标分布

Fig.1 Distribution of global swell index averaged over 40 years

总体上,全球的涌浪指标分布表现为明显的经向变化:从赤道向两极涌浪指标逐渐减小,低纬度附近涌浪指标基本保持在 0.9 以上,涌浪全年占优,中高纬度风浪所占比例逐渐增大,并最终发展为风浪占优。Carrasco 等<sup>[32]</sup> 计算得到了涌浪诱导 Stokes 漂流与总波浪诱导 Stokes 漂流的比值,结果显示低纬度 Stokes 漂流以涌浪诱导为主,中高纬 Stokes 漂流则是风浪诱导的 Stokes 漂流占优。此结果与本文所得到的涌浪

指标空间分布具有高度的相似性,证明了此涌浪指标的可用性。

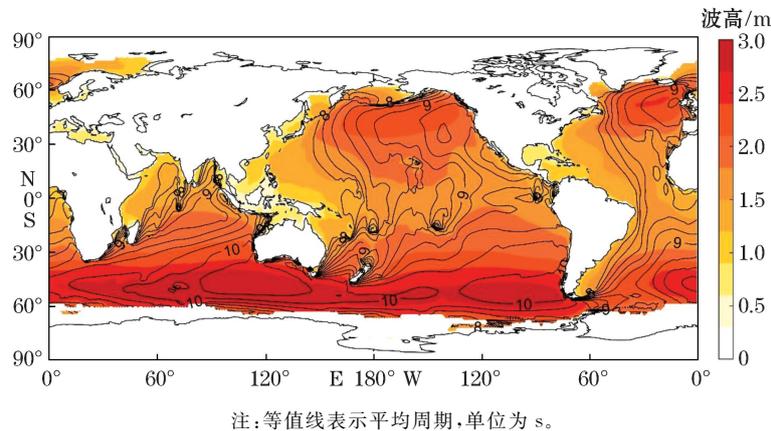


图2 40 a 平均的全球涌浪波高和平均周期分布

Fig.2 Distribution of global swell height and period distribution averaged over 40 years

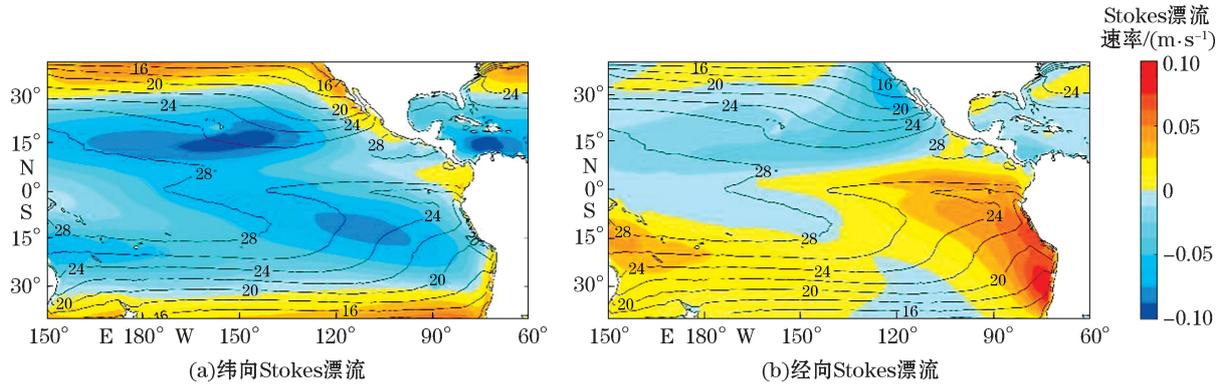
图2给出了40 a平均的全球涌浪波高值,西风带涌浪波高数值相对较大。无陆地阻拦的南大洋在西风带高风速的驱动下更有利于风浪的成长,当这些风浪离开风区后,最终发展为充分成长的涌浪,南大洋区域的涌浪波高多年平均值普遍大于2 m。并且,涌浪波高也呈现出了明显的经向梯度,从赤道向两极,波高逐渐增大。图2同时给出了40 a平均的全球涌浪平均周期值,其较大值依然出现在南大洋,北半球的涌浪平均周期普遍小于10 s,而南大洋的涌浪平均周期普遍大于10 s。总而言之,南大洋拥有巨大的涌浪能量。与涌浪波高的经向分布特征不同的是,南半球的涌浪平均周期总体上要大于北半球,大洋东边界的涌浪平均周期要高于大洋西边界。由于波浪的东传和大陆的阻挡,在南半球的大洋东边界出现了涌浪平均周期强化的现象,即局地的涌浪平均周期较同纬度偏大,这与吴克俭等<sup>[12]</sup>发现的涌浪周期东向强化现象一致。因此,涌浪平均周期的东向强化现象也就印证了波浪自南大洋经南太平洋“涌浪池”向北传播直至低纬海域的事实。

### 3 南太平洋“涌浪池”的通道作用分析

东太平洋中低纬度海域的Stokes漂流分布如图3所示,分别从纬向和经向两方面来研究东太平洋的Stokes漂流。纬向Stokes漂流会产生东西方向的波浪输运,经向Stokes漂流则会产生南北方向的波浪输运。总体来看,东太平洋中低纬度海域的纬向Stokes漂流是向西的,在南北纬15°附近达到较大值。经向Stokes漂流在大洋东边界表现为向赤道,即中高纬度的冷水会向赤道输运。需要注意的是,南半球东太平洋中纬度海域的向赤道Stokes漂流明显强于北半球,且其在太平洋东边界的影响范围呈倒三角形从40°S一直延伸到赤道以北,最远处到达了5°N。

在涌浪特征高值海域选取30°S截面,经度范围150°E~60°W,绘制40 a间经向Stokes漂流的年际变化图。图4结果显示波浪的北向Stokes漂流在东西方向上存在一定的差异性:即90°W以东表现为北向,且Stokes漂流值较大;140°W~90°W总体表现为南向“逆流”,其空间范围有小振幅的波动但量值始终较小;150°E~140°W整体上表现为北向Stokes漂流,有的年份偶尔会出现较弱的南向运动。这与40 a平均值显示的结果高度一致,也基本反映了南太平洋“涌浪池”的特征:大洋东边界和西边界的Stokes漂流总体都呈现北向输运,尤其是大洋东边界保持常年北向强输运,输运的水体则主要是来自于南大洋。另外,图3中大洋东边界经向Stokes漂流的分布特征与40 a平均的海表面温度分布特征是极其相似的,这进一步表明了它们之间可能存在重要相关关系:南太平洋东边界的北向强Stokes漂流会对赤道区域的海表面温度产生影响,输运的冷水增多则赤道的SST会降低,输运的冷水减少则赤道区域的SST会升高。

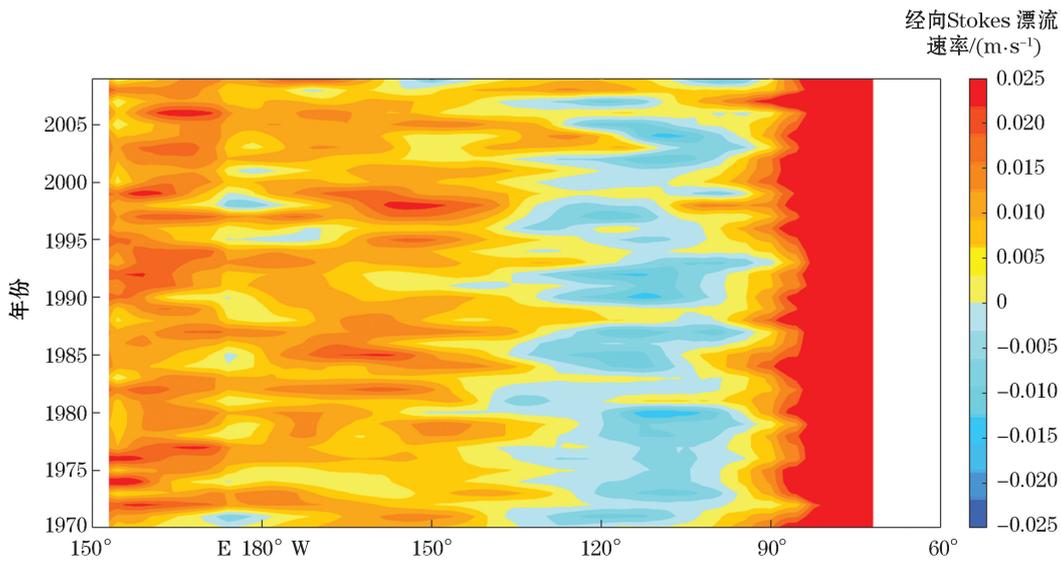
南大洋是环绕南极大陆、北边无陆界的独特水域,南半球北向的涌浪和 Stokes 漂流均发源于此<sup>[32]</sup>。结合图 3、图 4,综合考量全球的涌浪分布特征,再一次证实了空间范围为(150°E~60°W,40°S~10°N)的南太平洋海域是连接赤道太平洋和南大洋的重要通道。判断厄尔尼诺现象的 Niño1+2、Niño3、Niño4 和 Niño3.4 指数分别定义为 Niño1+2 区(90°~80°W,10°S~0°)、Niño3 区(150°~90°W,5°S~5°N)、Niño4 区(160°E~150°W,5°S~5°N)和 Niño3.4 区(170°~120°W,5°S~5°N)的区域平均海温距平,这些区域均位于选取的南太平洋涌浪区,所以加深对南太平洋涌浪区的研究,对于进一步了解厄尔尼诺现象具有重要意义。



注:图 a 填色区的纬向 Stokes 漂流以自西向东方向为正;图 b 填色区的经向 Stokes 漂流以自南向北方向为正;等值线表示 40 a 平均的海表面温度,单位为℃。

图 3 东太平洋中低纬度海域 40 a 平均的 Stokes 漂流分布

Fig.3 Distribution of Stokes drift in the middle and low latitudes of the eastern Pacific Ocean averaged over 40 years



注:填色区 Stokes 漂流值以穿过此截面向北的方向为正。

图 4 30°S 截面的经向 Stokes 漂流年际变化

Fig.4 Interannual variation of meridional Stokes drift at the cross section of 30°S

#### 4 南太平洋涌浪区 Stokes 漂流对厄尔尼诺的影响

Tamura 等<sup>[33]</sup>提出 Stokes 漂流通过将动量输入到 Eulerian 平均流中从而对上层海洋的动量平衡产生

重要作用,并且 Stokes 漂流通过 Langmuir 湍流的诱导影响到海洋上混合层<sup>[34]</sup>。上层海洋温度变化方程<sup>[35]</sup>为:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{Q_0 - Q_h}{\rho c_p h} - \left[ \bar{\vec{V}} \cdot \nabla \bar{T} + \nabla \cdot \left( \int_{-h}^0 \bar{\vec{V}} \bar{T}' dz \right) \right] - \frac{\bar{T} - T_h}{h} \omega_e, \quad (4)$$

式中:  $T$  为温度;  $t$  为时间变量;  $Q$  为垂向热通量,  $Q_0$  为海表面的垂向热通量,  $Q_h$  为  $h$  深度处的垂向热通量;  $\rho$  为海水密度,  $c_p$  为海水的比热容,  $\rho c_p$  为单位体积海水的热容量;  $h$  为水深;  $T_h$  为  $h$  深度处的温度; 垂向平均的海洋平均温度和水平速度分别为  $\bar{T}$  和  $\bar{\vec{V}}$ ,  $\bar{\vec{V}}'$ 、 $\bar{T}'$  分别表示温度和水平速度相对于平均量的偏差;  $\omega_e$  为穿越等深面的垂向速度。方程左边一项表示垂向平均的海水平均温度随时间的变化率; 方程右侧第一项为上层海洋净热通量对于温度的影响; 右侧第二项为温度的平流输运作用的影响, 右边第三项为垂直卷挟作用的影响。但上述方程忽略了波浪输运项, 吴克俭等<sup>[12]</sup>在温度平流变化项中加入了 Stokes 漂流的影响, 修正形式的上层海洋温度变化方程为:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{Q_0 - Q_h}{\rho c_p h} - \bar{\vec{V}} \cdot \nabla \bar{T} - \bar{\vec{V}}_s \cdot \nabla \bar{T} - \nabla \cdot \left( \int_{-h}^0 (\bar{\vec{V}} + \bar{\vec{V}}_s) \bar{T}' dz \right) - \frac{\bar{T} - T_h}{h} \omega_e, \quad (5)$$

式中:  $\bar{\vec{V}}_s$  为波浪输运在其影响深度上的平均流速,  $\bar{\vec{V}}_s'$  为相对平均流速的扰动项,  $dz$  为波浪输运有效影响深度。虽然在低纬度区域, 波浪诱导的平流热输运作用相对较弱, 但是在中高纬度其对混合层温度变化的贡献是非常显著的, 能够与上层海洋平均流的平流热输运贡献达到同等量级。张晓爽和吴克俭<sup>[10]</sup>得到过类似的结论: 波浪输运与平均流的热输送相比, 在南北半球的中高纬度, 浪致平流热输送的作用相当显著, 能够达到 50%, 即波浪在热输送的贡献占平均流的一半。由此推断涌浪区的波浪输运会对赤道太平洋的海表面温度产生影响。

由图 3 可见, 南太平洋经向和纬向的波浪输运都会对 Niño3 区域的海表面温度产生影响。尤其是在经向输运方向上, 可以很明显地观察到 Niño3 区域受南半球的北向波浪输运影响较大, 因为南半球输运而来的冷水到达此区域会降低此区域的 SST, 若输运的冷水相对往年较少, 则会造成此区域的 SST 升高; 若输运的冷水增多, 则会造成此区域 SST 降低。

对涌浪区 40 a 的涌浪波高月距平进行 EOF 分析, 结果显示: 前两个模态的方差贡献率分别为 53.8% 和 22.9%, 其总方差贡献率超过 75%, 之后各模态的方差贡献率均小于 10%, 因此前 2 个模态可以表征涌浪波高月距平的空间分布结构(图 5)。第一模态的空间结构是承接南大洋的同心圆状单一相位结构, 在涌浪通道区的南端出现极大值, 并逐渐扩散蔓延至赤道区域, 充分体现了该区域的“通道”性质; 在时间序列中出现的两次最大的异常值对应的年份分别为 1983 年和 1997 年, 而这两年正是强厄尔尼诺年份, 这说明涌浪波高的异常与厄尔尼诺现象的发生存在着重要的联系, 二者同相位变化。在其他异常振荡较大的年份, 如: 1977 年、1987 年、1994 年和 2001 年, 全球气候同样出现了明显的异常偏暖或偏冷现象<sup>[36-39]</sup>。第二模态则呈现出明显的东西向反相位振荡, 在一定程度上与厄尔尼诺现象的东西反相位变化表现相似。

为进一步了解涌浪区经向 Stokes 漂流时空分布特征, 图 6 给出了对其进行 EOF 分解得到的空间结构和时间序列。第一模态和第二模态的方差贡献率分别为 63.2% 和 19.1%。在第一模态的空间结构中, 涌浪通道区的中北部表现为同相位特征, 由于地形等原因的影响在南美洲南端出现了极大的反相位异常区; 时间序列中振荡明显较大的年份发生在 1982—1983 年和 1997—1998 年, 对应着强厄尔尼诺的爆发, 说明两者确实有不可忽视的重要关系。第二模态的空间分布结构中, 除赤道以北的正异常外, 其他区域呈现出东西向的反相位变化特征, 对应着大洋东西两岸的差异。但必须要注意的是, 经向 Stokes 漂流表征的涌浪通道区与厄尔尼诺事件的关系是负相关的, 即经向 Stokes 漂流与厄尔尼诺事件是存在一定的超前或滞后关系的, 并非严格同步发生, 且经向 Stokes 漂流更有可能是造成厄尔尼诺事件衰退的重要原因。

基于以上假设, 在涌浪区内每隔 3 个纬度取一截面, 计算通过该纬度的经向 Stokes 漂流与 Niño3 指数之间的相关关系, 结果如图 7 所示, 相关系数最大为 0.84。除紧挨着 Niño3 区的 6°S 截面外, 其余截面处经

向 Stokes 漂流与 Nino3 的正相关系数基本随纬度增加越来越低,且极值点的出现时间随纬度增加逐渐滞后。这基本能够说明在厄尔尼诺事件发生后,南太平洋涌浪区的经向 Stokes 漂流由近到远产生响应,北向 Stokes 漂流逐渐增强,将来自中高纬度的冷水运输到低纬海域,使赤道东太平洋的海水降温,影响了厄尔尼诺事件的衰退。

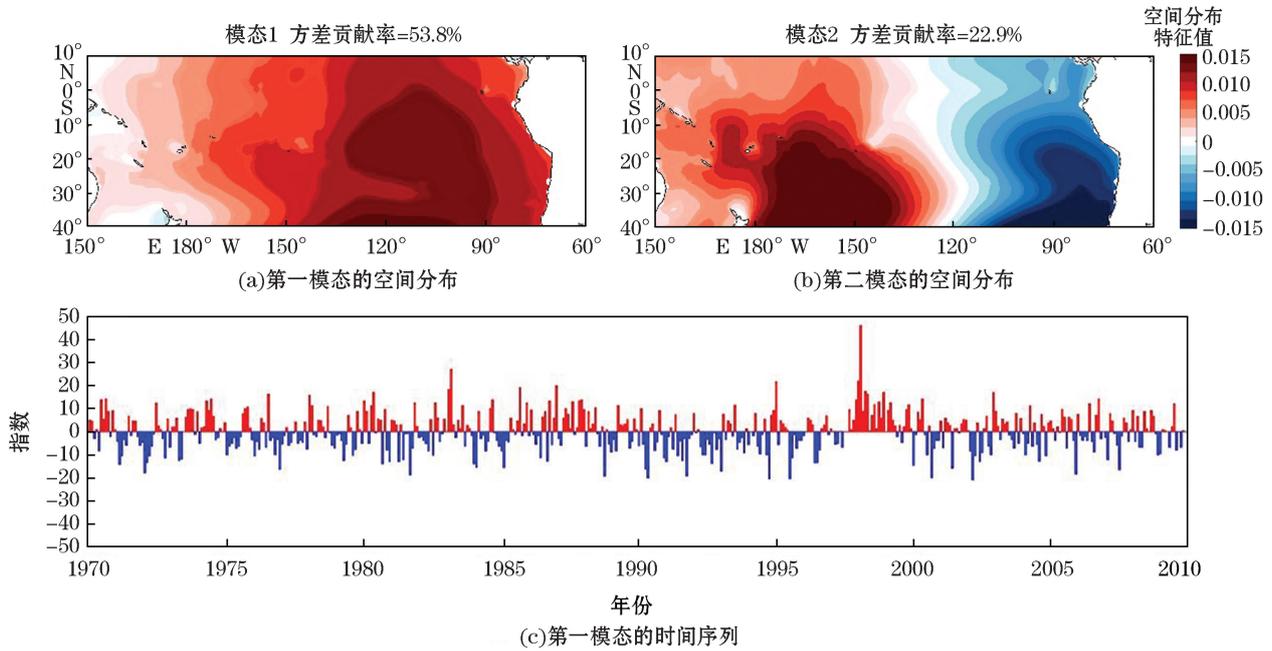
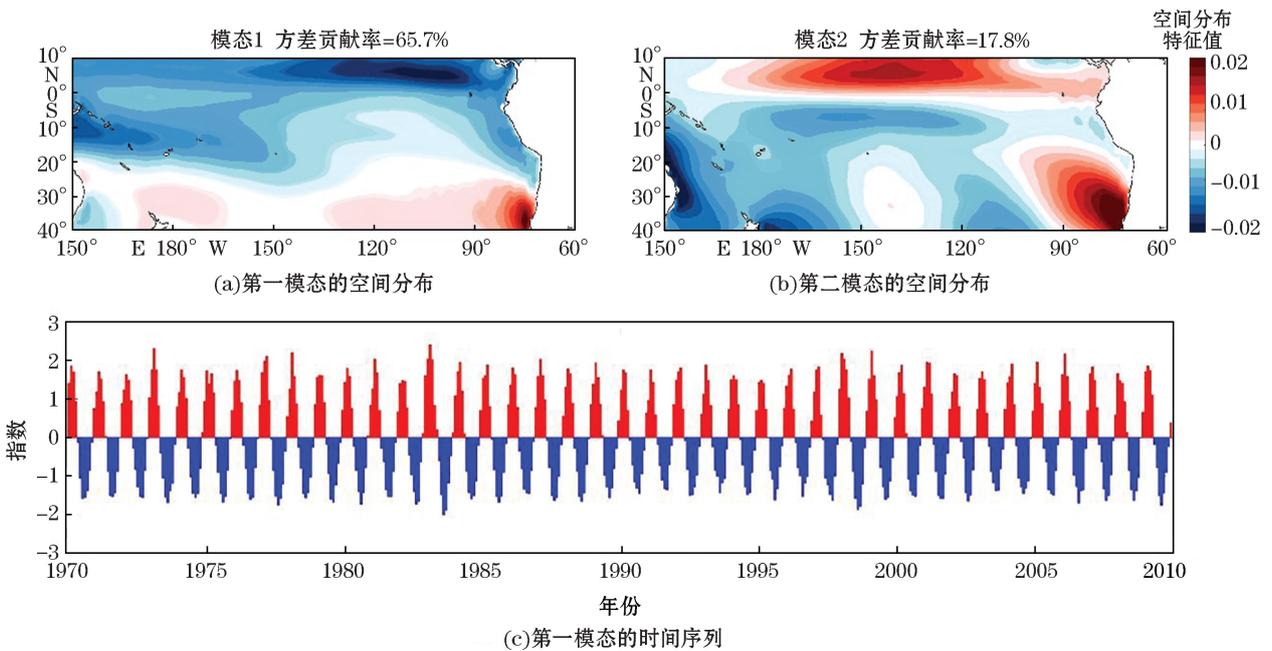


图 5 南太平洋涌浪区 40 a 涌浪波高月距平的 EOF 分析结果

Fig.5 Monthly anomaly of swell height based on EOF analysis in the South Pacific swell region over 40 years

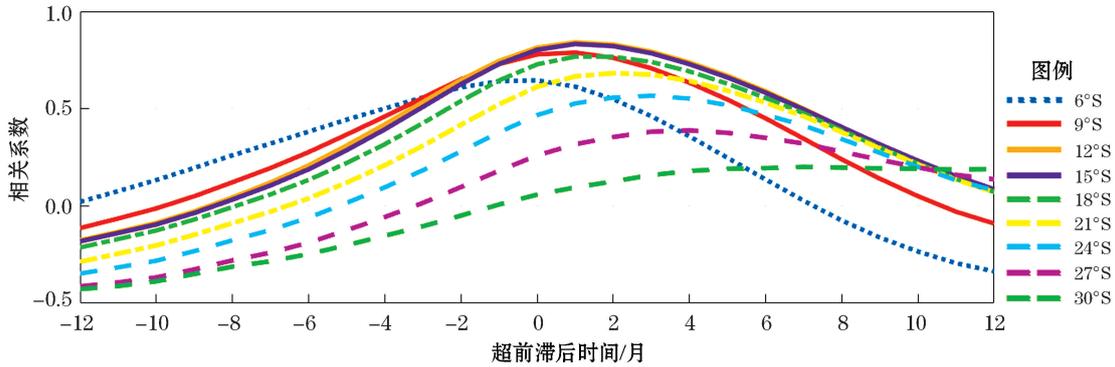


注:经向 Stokes 漂流以自南向北方向为正。

图 6 南太平洋涌浪区 40 a 经向 Stokes 漂流的 EOF 分析结果

Fig.6 Meridional Stokes drift based on EOF analysis in the South Pacific swell region over 40 years

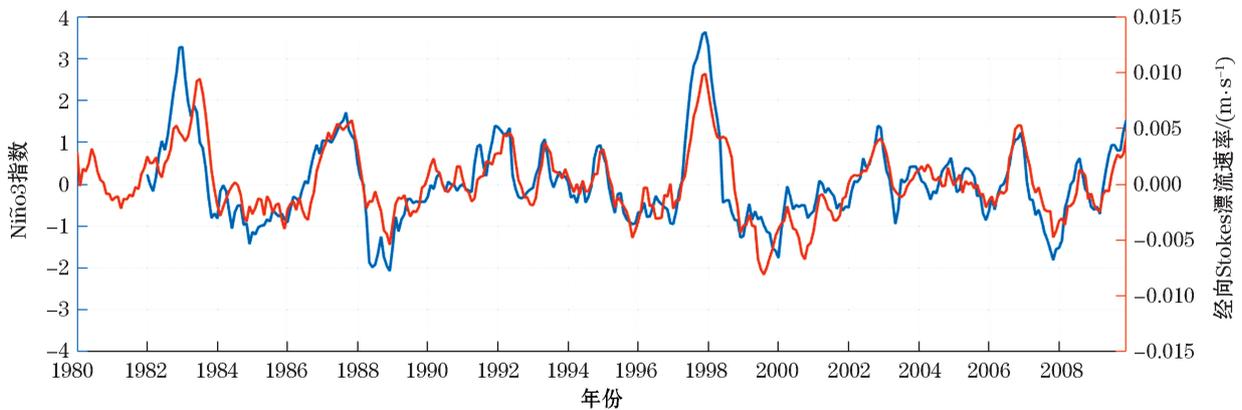
选取经向 Stokes 漂流与 Niño3 指数相关系数最高的 12°S 截面来研究两者间更为具体的时间关系,图 8 结果显示经向 Stokes 漂流每一次的较大异常值均能与强厄尔尼诺事件实现较好的对应,比较显著的是 1982—1983 年和 1997—1998 年,且距平异常值基本都超过了 0.005 m/s。结合图 7 可知,平均滞后时间大概为 1~2 个月;而在经向 Stokes 漂流出现明显的负异常振荡时(异常值小于 -0.005 m/s),如 1989 年、2001 年,也都发生了强烈的拉尼娜现象。在其他年份,经向 Stokes 漂流并没有表现出较大的异常值。



注:横坐标中的负数表征 Stokes 漂流超前于 Niño3 指数的时间,正数表征 Stokes 漂流滞后于 Niño3 指数的时间。

图 7 南太平洋涌浪区内各纬向截面的经向 Stokes 漂流与 Niño3 指数超前滞后相关关系

Fig.7 The advance and lag correlation between the meridional Stokes drift and Niño3 index along each zonal section in the South Pacific swell region

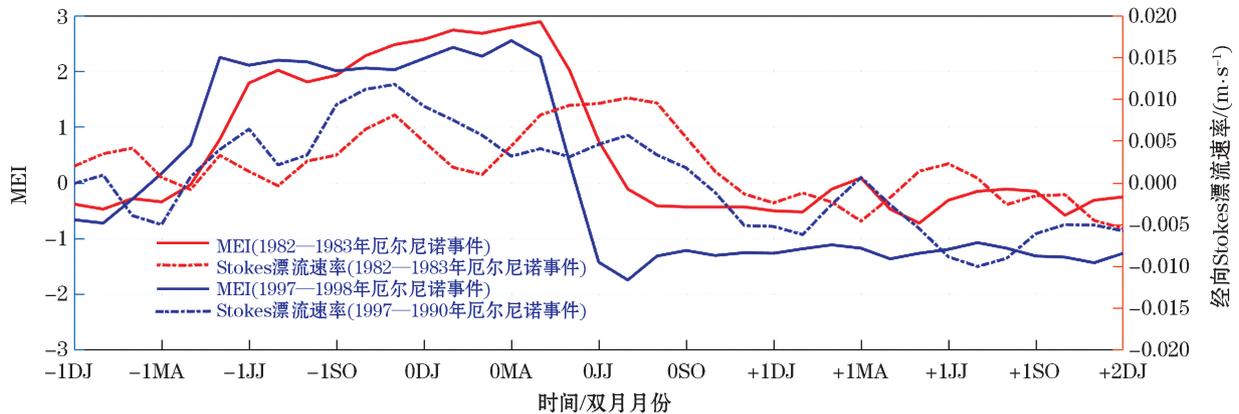


注:红色实线表示经向 Stokes 漂流值,以自南向北方向为正;蓝色实线表示 Niño3 指数。

图 8 12°S 截面经向 Stokes 漂流与 Niño3 指数的时间序列对比

Fig.8 Time series of 12°S cross-section meridional Stokes drift and Niño3 index

相比于 Niño3 指数,MEI 更能够体现出厄尔尼诺事件在季节甚至是月份上的演变特征<sup>[28-29]</sup>,以 1982—1983 年和 1997—1998 年两次强厄尔尼诺事件为例,经向 Stokes 漂流与 MEI 的时间序列关系如图 9 所示。两者在直观上就已展现出了高度的相似性,而计算结果显示经向 Stokes 漂流在滞后 1982—1983 年厄尔尼诺事件的 MEI 3 个月时相关系数达到最大值 0.91,在滞后 1997—1998 年厄尔尼诺事件的 MEI 4 个月时相关系数达到最大值 0.88。这都为证明经向 Stokes 漂流在厄尔尼诺事件衰退过程起到重要作用提供了强有力的证据。当厄尔尼诺事件发生后,南太平洋涌浪区的经向 Stokes 漂流产生响应,北向运动发生强化,中高纬度的冷水被输运到低纬海域使海水降温,厄尔尼诺事件逐渐消退。尽管经向 Stokes 漂流对 MEI 的响应比较及时且响应强度相对比较剧烈,但其响应幅度并没有 MEI 本身的变化幅度大。



注:横坐标表示厄尔尼诺事件发生的前一年(-1)、当年(0)、后一年(+1)以及后两年(+2)的双月月份,其中 DJ 表示 12 月和 1 月、MA 表示 3 月和 4 月、JJ 表示 6 月和 7 月、SO 表示 9 月和 10 月。

图 9 12°S 截面经向 Stokes 漂流与 MEI 的双月平均时间序列对比

Fig.9 Time series of bi-monthly mean of the 12°S cross-section meridional Stokes drift and the MEI

## 5 结 论

本文基于一种涌浪指标和波高、平均周期等涌浪特征值分析了全球的涌浪分布特征,并结合前人结论,进一步深入研究了南太平洋涌浪区 Stokes 漂流对赤道东太平洋 SST 和厄尔尼诺事件的影响,结果显示:

1) 全球涌浪指标存在较为明显的季节变化,在赤道区域涌浪一直占优,从赤道向两极递减,在南半球的大洋东边界存在着涌浪指标高值区——“涌浪池”。

2) 南大洋的波浪能够经南太平洋的“涌浪池”,通过 Stokes 漂流向北传播至低纬海域。当选取涌浪指标较高的南太平洋涌浪区(150°E~60°W,40°S~10°N)作为主要研究区域时,在涌浪波高距平中找到了与厄尔尼诺事件相对应的信号,并发现经向 Stokes 漂流是联系波浪与厄尔尼诺事件之间的重要“介质”。

3) Niño3 区域会受到南太平洋涌浪区经向 Stokes 漂流的影响,南半球的冷水会通过此途径影响涌浪区的海表面温度,若通过涌浪区的北向输运减少,则势必会造成 Niño3 区域的海表面温度升高,从而导致此区域 SST 异常;若北向输运增加,则会起到降温的作用。

4) 南太平洋涌浪区内的经向 Stokes 漂流异常正信号滞后于 Niño3 指数 1~2 个月,滞后于 MEI 的变化 3~4 个月。也就是说,南太平洋涌浪区内的经向 Stokes 漂流能够响应厄尔尼诺事件,产生北向的强化,输运冷水至低纬海域使其降温,从而加速厄尔尼诺事件的衰退。

综上,由南大洋而来的南太平洋经向 Stokes 漂流能够对低纬 SST 产生不可忽视的影响,进而影响到全球气候。本文存在的不足是没有将 Stokes 漂流对赤道太平洋 SST 的影响进行量化,南太平洋的经向 Stokes 漂流会对厄尔尼诺事件产生多大的影响这一科学问题未得到解决。下一步的工作便是通过数值模式来模拟南太平洋经向 Stokes 漂流的输运过程,以及在模式中量化其对赤道太平洋 SST 的影响。

### 参考文献(References):

- [1] SERVAIN J, WAINER I, MCCREARY J P, et al. Relationship between the equatorial and meridional modes of climatic variability in the tropical Atlantic[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(4): 485-488.
- [2] POLTON J A, LEWIS D M, BELCHER S E. The role of wave-induced Coriolis-Stokes forcing on the wind-driven mixed layer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(4): 444-457.

- [3] LIU B, WU K J, GUAN C L. Global estimates of wind energy input to subinertial motions in the Ekman-Stokes layer[J]. *Journal of Oceanography*, 2007, 63(3): 457-466.
- [4] WU K J, LIU B. Stokes drift-induced and direct wind energy inputs into the Ekman layer within the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C10): C10002.
- [5] MCWILLIAMS J C, RESTREPO J M. The wave-driven ocean circulation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(10): 2523-2540.
- [6] 孙孚, 钱成春, 王伟, 等. 海浪波生切应力及其对流驱动作用的估计[J]. *中国科学 D 辑*, 2003, 33(8): 791-798. SUN F, QIAN C C, WANG W, et al. Estimation of wave shear stress and its convective driving effect[J]. *Science in China (series D)*, 2003, 33(8): 791-798.
- [7] WITTING J. Effects of plane progressive irrotational waves on thermal boundary layers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 50(2): 321-334.
- [8] HILL R H. Laboratory measurement of heat transfer and thermal structure near an air-water interface[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1972, 2(2): 190-198.
- [9] MILLER A W, STREET R L. On the existence of temperature waves at a wavy air-water interface[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1978, 83(C3): 1353-1365.
- [10] 张晓爽, 吴克俭. 波浪对海洋上混合层温度变化的影响研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(9): 1-6. ZHANG X S, WU K J. The influence of Stokes-Drift on the alteration ratio of temperature in the oceanic mixed layer[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(9): 1-6.
- [11] 夏浩峰, 吴克俭, 李瑞, 等. 印度洋波浪诱导的水体输运效应及其对赤道 SST 异常的影响[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(2): 226-237. XIA H F, WU K J, LI R, et al. The wave-induced transport in the Indian Ocean and its influence on tropical SST anomaly[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(2): 226-237.
- [12] 吴克俭, 石永芳, 张晓爽. 从波浪到厄尔尼诺[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(3): 8-14. WU K J, SHI Y F, ZHANG X S. From the surface waves to the El Niño[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2017, 37(3): 8-14.
- [13] SHI Y F, YANG Y Z, WU K J, et al. The signal of La Niña in wave transport[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 70: 118-124.
- [14] WHITE W B, PETERSON R G. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent[J]. *Nature*, 1996, 380(6576): 699-702.
- [15] CHEN G, CHAPRON B, EZRATY R, et al. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(11): 1849-1859.
- [16] DEND Z A, XIE L, LIU B, et al. Coupling winds to ocean surface currents over the global ocean[J]. *Ocean Modelling*, 2009, 29(4): 261-268.
- [17] 毕凡. 波浪对环流输运影响和涌浪传播耗散特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. BI F. On the wave-induced effect to circulation transport and the characteristics of swell propagation and dissipation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [18] 肖林, 史剑, 蒋国荣, 等. Stokes 漂流对全球海表面温度模拟的影响[J]. *海洋通报*, 2018, 37(1): 55-62. XIAO L, SHI J, JIANG G R, et al. The influence of Stokes-drift on the global sea surface temperature in the simulation[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(1): 55-62.
- [19] MARTIN P J. Simulation of the mixed layer at OWS November and papa with several[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C1): 903-916.
- [20] EZER T. On the seasonal mixed layer simulated by a basin-scale ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C7): 16843-16855.
- [21] QIAO F L, MA J, YANG Y Z, et al. Simulation of the temperature and salinity along 36°N in the Yellow Sea with a wave-current coupled model[J]. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 2004, 39(1): 35-45.
- [22] 宋振亚, 乔方利, 雷晓燕, 等. 大气-海浪-海洋环流耦合数值模式的建立及北太平洋 SST 模拟[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2007, 22(5): 543-548. SONG Z Y, QIAO F L, LEI X Y, et al. The establishment of an atmosphere-wave-ocean circulation coupled numerical model and its application in the North Pacific SST simulation[J]. *Journal of Hydrodynamics (series A)*, 2007, 22(5): 543-548.
- [23] 李燕. 次级环流及波致垂向混合研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012. LI Y. On the secondary circulation in the upper ocean and wave-induced vertical mixing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [24] BABANIN A V, CHALIKOV D. Numerical investigation of turbulence generation in non-breaking potential waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C06010): 1-14.
- [25] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The CERA-20C reanalysis dataset, monthly means of daily means. [2021-01-02]. <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/cera20c-edmo/levtype=sfc/type=an/>.

- [26] National Climate Center, China Meteorological Administration. The Niño-indices dataset, Niño 3 index.[2021-01-05]. [http://cmdp.nccma.net/download/ENSO/Monitor/Nino-indices/month\\_ninoindex.txt](http://cmdp.nccma.net/download/ENSO/Monitor/Nino-indices/month_ninoindex.txt).
- [27] Physical Sciences Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2).[2021-01-03]. <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>.
- [28] WOLTER K, TIMLIN M S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext)[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(7): 1074-1087.
- [29] WOLTER K. The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the Tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1987, 26: 540-558.
- [30] 郑崇伟, 林刚, 孙岩, 等. 近 45 年太平洋海浪特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(6): 6-12. ZHENG C W, LIN G, SUN Y, et al. Analysis of wave characteristics in the Pacific Ocean during the last 45 years[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(6): 6-12.
- [31] 邓增安, 吴克俭, 于婷. 太平洋东边界波浪运输[J]. *海洋学报*, 2007, 29(6): 1-9. DENG Z A, WU K J, YU T. The wave transport of the eastern area of the Pacific[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(6): 1-9.
- [32] CARRASCO A, SEMEDO A, ISACHSEN P E, et al. Global surface wave drift climate from ERA-40: the contributions from wind-sea and swell[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(12): 1815-1829.
- [33] TAMURA H, MIYAZAWA Y, OEY L. The Stokes drift and wave induced-mass flux in the North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C08021): 1-14.
- [34] MCWILLIAMS J C, HUCKLE E, LIANG J H, et al. Langmuir turbulence in swell[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(3): 870-890.
- [35] STEVENSON J W, NIILER P P. Upper ocean heat budget during the Hawaii-to-Tahiti shuttle experiment[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1983, 13: 1894-1907.
- [36] 刘丽, 谭言科, 桂发银. 北太平洋年代际振荡对华北地区气候异常的影响[C]. 西安: 第 33 届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报, 2016. LIU L, TAN Y K, GUI F Y. Climate change features of North China and its relationship with Pacific Decadal Oscillation [C]. Xi'an: The 33rd Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S1 Disasters Weather Monitoring, Analysis and Forecast, 2016.
- [37] 庄丽莉, 孙除荣. 1987 年世界气候概况[J]. *气象*, 1988, 14(4): 45-47. ZHUANG L L, SUN C R. Overview of the World Climate in 1987[J]. *Weather*, 1988, 14(4): 45-47.
- [38] 庄丽莉. 1994 年世界气候概况[J]. *气象*, 1995, 21(4): 29-32. ZHAUNG L L. Overview of the World Climate in 1994[J]. *Weather*, 1995, 21(4): 29-32.
- [39] 李晓燕. 2002 年全球重大气候事件概述[J]. *气象*, 2003, 29(4): 28-31. LI X Y. Significant climate events in the world during 2002[J]. *Weather*, 2003, 29(4): 28-31.

## Cooling Effect of the Stokes Drift in the South Pacific During El Niño's Decline

DONG Xiang-hui<sup>1</sup>, WU Ke-jian<sup>1</sup>, LI Rui<sup>1</sup>, XIA Hao-feng<sup>2</sup>, CAO Tong-gang<sup>3</sup>

(1. College of Oceanic and Atmospheric Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. PLA Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China;

3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The variation of sea surface temperature (SST) in the equatorial eastern Pacific plays an important role in global climate change, and waves are an important factor affecting sea surface temperature. In order to further study the impact of waves on the global climate, the relationship between Stokes drift in the South Pacific swell region and El Niño is analyzed by using the reanalysis data of wave parameters and sea surface temperature published by ECMWF, the methods of EOF analysis, and advanced-lag correlation analysis. First, a swell index and various wave characteristic values are selected to summarize the characteristics of global swell. It is concluded that the swell is more dominant in low latitudes, southern hemi-

sphere, and the eastern boundary of the ocean. Based on this, the swell region of the South Pacific is delineated, and its role as a channel connecting the Southern Ocean and the equatorial eastern Pacific is found. Furthermore, the influence of Stokes drift in the South Pacific swell region on the SST in the equatorial eastern Pacific is studied. The results show that following the occurrence of El Niño event, the meridional Stokes drift in the region will be strengthened, so the wave induced Stokes drift transports the high latitude cold water to low latitude sea area, thus cools the low latitude sea area and accelerates the decline of El Niño, affecting the global climate. This paper not only provides a new idea of explaining the decline of El Niño, but also opens up a new direction for the study of large-scale effects of waves.

**Key words:** South Pacific; swell index; Stokes drift; El Niño

**Received:** May 21, 2021