

南太平洋海表面盐度最大值年代际变异机理研究

朱婷婷^{1,2}, 王庆业^{2*}, 陈丽丽¹

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 已有研究表明南太平洋海表面盐度最大值存在明显的年代际变化, 表现为盐度位置的变化, 而对于调控该年代际变化的机制尚不清楚。利用1999—2022年的盐度数据, 再现了盐度最大值位置的东北—西南向摆动, 即2005年和2016年盐度位置偏东北, 2011年和2022年偏西南。在此基础上, 利用盐度收支分析与1.5层约化重力模式两种方法研究了1999—2022年南太平洋海表面盐度最大值的年代际变化机理, 评估了淡水强迫、水平平流、垂直夹卷、水平扩散这4种因素的相对贡献。结果表明: 水平平流、淡水强迫的平均贡献最大, 前者是驱动南太平洋海表面盐度最大值位置的年代际变化的关键因素, 而淡水强迫项主要是引起盐度量值大小的年代际变化; 垂直夹卷项与水平扩散项在盐度最大值年代际变化中的贡献可能较小。

关键词: 南太平洋; 海表面盐度; 年代际变化; 水平平流; 淡水强迫

中图分类号: P731.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0051-11

0 引言

海洋盐度变化是全球气候变化的重要标志, 也是全球水循环加剧的关键指标^[1-5]。大量研究通过分析海洋盐度的变化来推测全球水循环变化, 即海洋盐度在以降水为主的地方越来越小, 在以蒸发为主的地方越来越大^[6-8]。海表面盐度的全球分布显示, 每一个亚热带海洋地区都存在高盐度中心, 形成一个水平的海表面盐度最大值, 这些高盐度中心的变化往往受到全球水循环与海洋平流和混合过程的影响^[4, 9-10]。海表面盐度最大值的低频变化, 例如年代际变化, 往往受到海洋淡水通量、海洋平流与混合过程的多种调控^[11], 因此, 了解海表面盐度最大值的低频变化及其潜在机制有利于解释气候变化对海洋循环的影响。

关于南太平洋海表面盐度最大值的变化特征与机制, HASSON等^[12]基于卫星盐度数据、DELCROIX等^[13]基于太平洋网格海表面盐度产品

以及海洋一般环流模式分析调查了最近几十年太平洋盐度最大值的形成原因与变化, 他们认为盐度最大值重心存在低频西移的现象, 但具体机制尚不清楚。BINGHAM等^[14]通过对比不同的盐度数据集分析了2011—2017年盐度最大值的变异性, 认为盐度最大值位置向东北方向移动, 猜测盐度的变化与亚热带环流和南赤道流的变化以及埃克曼输送和埃克曼抽吸的变化有关。王心茹^[15]基于实测数据讨论了1999—2020年太平洋盐度最大值的变化, 发现2004年和2016年盐度最大值移至最北端, 2000年和2011年移至最南端, 且盐度最大值的低频变化与太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)同期相关, 通过盐度收支分析认为可能与经向平流有关。

迄今为止, 一些研究对南太平洋海表面盐度最大值年代际变化的调控机制提出了猜想^[6, 15], 但一直没有确切结论。因此, 为确定南太平洋海表面盐度最大值的年代际变异机制, 本文通过盐度收支方程

收稿日期: 2023-10-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976011)。

作者简介: 朱婷婷(1999-), 女, 硕士, 主要从事全球海洋与气候变化研究。E-mail: 1514045868@qq.com

*通信作者: 王庆业(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: wangqy@qdio.ac.cn

与1.5层约化重力模式两种方法开展探讨,并评估淡水强迫、水平平流、垂直夹卷、水平扩散项这4种因素的相对贡献,揭示了由风场引起的水平平流是南太平洋盐度最大值年代际变化的主要因素。

1 数据与方法

1.1 数据

本文使用数据包括:

①盐度数据:来源于英国气象局哈德莱中心(Hadley Centre)EN系列数据集第4版即EN4提供的逐月再分析海表盐度数据产品^[16](网址:https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/index.html),该数据水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向5~5 350 m共42层,为非等间距分布。本文选取利用LEVITUS等^[17]偏差校正方法校正后的盐度数据,数据时间范围为1999年1月—2022年12月。

②蒸发数据:来源于客观分析海气通量(Objectively Analyzed Air-sea Fluxes, OAFlux)提供的逐月蒸发量^[18](网址:https://oafux.whoi.edu/data-access/),该数据水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。本文选取该数据的时间范围为1995年1月—2022年12月。

③降水数据:来源于全球降水气候学项目(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)提供的月平均降水^[19](网址:https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcp.html),该数据水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。本文选取该数据的时间范围为1995年1月—2022年12月,为与蒸发数据相匹配,使用线性插值方法将该数据插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格。

④地转流数据:采用了法国卫星海洋存档数据中心(Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data, AVISO)提供的逐月地转流产品^[20](网址:ftp://ftp-access.aviso.altimetry.fr/climatology/global/delayed-time/monthly_mean/),该数据水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。本文选取该数据的时间范围为1995年1月—2022年12月。

⑤风场数据:采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析数据集(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)提供的10 m风矢量^[21](网址:https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!

/dataset/),该数据水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。本文选取时间范围为1995年1月—2022年12月,用于计算盐度收支方程中的埃克曼流速并驱动1.5层约化重力模式。

⑥PDO数据:来源于世界气象组织提供的PDO年指数^[22](网址:https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/index.html)。

⑦混合层深度数据:来自于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的月等密度及混合层海洋气候学(Monthly Isopycnal & Mixed-layer Ocean Climatology, MIMOC)的每月气候学混合层深度产品^[23](网址:https://www.pmel.noaa.gov/mimoc/)。

以上所有数据的时间分辨率均为月,为方便计算,均使用线性插值方法将其插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格。这些数据均用于盐度收支分析与1.5层约化重力模式。

1.2 方法

①盐度收支方程

混合层盐度变化受淡水强迫、水平平流、混合层底部垂直夹卷与水平扩散的影响。盐度收支方程^[24-26]可表示为:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{S_0(E-P)}{h} - u \frac{\partial S}{\partial x} - v \frac{\partial S}{\partial y} - \frac{w_e(S-S_{-h})}{h} + K_H \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + R \quad (1)$$

式中: S 表示混合层盐度; t 表示时间; S_0 表示参考盐度35 psu; E 表示蒸发量; P 表示降水量; u 、 v 分别表示水平速度的向东分量、向北分量; S_{-h} 表示混合层底盐度; w_e 表示混合层底部的夹卷速度; K_H 表示水平扩散系数 $3\,000\text{ m}^2/\text{s}$; h 表示混合层深度; R 表示余项,其中包括混合层底部湍流过程引起的盐通量扰动项与混合层内的扰动项,由于本文主要关注年代际变化,该项为小量,故在文中的计算暂不作考虑。

方程左边 $\frac{\partial S}{\partial t}$ 表示盐度变化趋势项;右边 $E-P$ 表示淡水通量, $\frac{S_0(E-P)}{h}$ 表示淡水强迫项, $-u \frac{\partial S}{\partial x} - v \frac{\partial S}{\partial y}$ 表示水平平流项, $-\frac{w_e(S-S_{-h})}{h}$ 表示垂直夹卷

项, $K_H(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2})$ 表示水平扩散项。

在本研究中,垂向夹卷速度 w_e 的计算公式为^[27]:

$$w_e = \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla h \vec{v} \quad (2)$$

式中: \vec{v} 为水平速度。对于混合层,当 $w_e > 0$ (垂直向上) 时,混合层底以下的水体进入混合层改变混合层盐度;当 $w_e < 0$ 时,混合层内的盐度不受底层影响,故此时令夹卷速度为 0。对每月的混合层深度进行时间区域平均,得到 1999—2022 年南太平洋海表面盐度最大值区的混合层深度平均值为 52.6 m,南太平洋区域的混合层深度平均值为 47.7 m。为简化计算且与前人研究^[15]保持一致,本文选取 50 m 为混合层深度,相应地,式(1)中 S_{-h} 选取深度 50 m 处的盐度值。

②1.5层约化重力模式

1.5层约化重力模式是由温度、盐度、流速、海表面高度剧烈变化的上层与各海洋要素基本不变的下层组成的抽象海洋模式。模式动力学框架^[28]由式(3)—(5)构成,通过有限差分方法求解,模式可积分得到第一层厚度 h 和水平流速 u, v 。在动力学框架基础上加入式(6)用以计算同一时刻的盐度,盐度收支方程是在动力学框架外加入的,不破坏模式的稳定性。

$$u_t + uu_x + vu_y - fv = -g'h_x + \frac{\tau_x}{h\rho_0} + A_h \nabla_h^2 u - \frac{Ru}{h} \quad (3)$$

$$v_t + uv_x + vv_y + fu = -g'h_y + \frac{\tau_y}{h\rho_0} + A_h \nabla_h^2 v - \frac{Rv}{h} \quad (4)$$

$$h_t + (hu)_x + (hv)_y = 0 \quad (5)$$

$$S_t = \frac{S_0(E - P)}{h_1} - uS_x - vS_y - u_e S_x - v_e S_y + K_H \nabla^2 S \quad (6)$$

式中: h 为第一层厚度 400 m; h_1 表示混合层厚度 50 m; u, v 分别表示水平速度的 u 分量、 v 分量; f 表示科里奥利参数; g' 表示约化重力加速度 0.0287 m/s^2 ; R 表示界面摩擦系数 0; A_h 表示横向摩擦系数 $3000 \text{ m}^2/\text{s}$; ρ_0 表示海水密度 1025 kg/m^3 ; τ_x, τ_y 分别表示风应力的 x 分量与 y 分量; u_e, v_e 分别表示埃克曼流速的 u 分量、 v 分量。由于第一层层厚设置为 400 m, 而埃克

曼层厚度约为 30~50 m, 两者相差一个量级, 故在该模式中, 埃克曼流的作用被削弱很多或约等于只有地转流的作用, 因此我们在盐度收支方程中又单独增加埃克曼项。Ekman 速度计算公式为^[24]:

$$\begin{aligned} u_e &= \frac{\tau_x \cos \theta + \tau_y \sin \theta}{\rho_0 f h} \\ v_e &= \frac{-\tau_x \sin \theta + \tau_y \cos \theta}{\rho_0 f h} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: θ 表示流矢量与风矢量的夹角。

为进一步确定南太平洋海表面盐度最大值年代际变异的机制, 本研究使用 1.5 层约化重力模式进行数值实验, 揭示了不同物理过程在南太平洋海表面盐度最大值年代际变异中所起的作用。在本研究中, 配置的模式区域为 $120^\circ\text{E} \sim 70^\circ\text{W}$, $50^\circ\text{S} \sim 50^\circ\text{N}$, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间步长为 3 600 s, 边界采用固壁边界条件。参考前人^[29-31]在模式中选择南边界的方法, 本文的南边界处是南大洋的南极绕极流, 以纬向流为主, 对本文模式区域并无明显贡献; 而在其他开边界, 如白令海峡、印尼贯穿流等, 距离本文关注的南太平洋海表面盐度最大值区较远, 影响微小。因此, 本文在 1.5 层约化重力模式中采用固壁边界条件。

表 1 是数值实验模式的具体配置, 其中气候态风应力由 1999—2022 年风场数据计算得到, 气候态淡水通量由月蒸发量与月降水量的差计算得到。实际风应力是由 1995—2022 年风场数据计算得到的逐月风应力, 实际淡水通量是由月蒸发量与月降水量得到的逐月淡水通量。由气候态风应力驱动, 模式直接输出 h, u, v , 在此基础上加入气候态淡水通量计算同一时刻的盐度。运行时间为 10 年, 选取第十年的盐度与流场平均作为气候态流场与气候态盐度, 该实验称为 Spin up 实验。

Main Run 实验以气候态流场、盐度场为初始场, 由实际风应力驱动并加入实际淡水通量。通过选取输出的 1999—2022 年盐度再现了该时间段盐度的真实变化。Exp-1 实验与 Main Run 实验条件相同, 但淡水通量场设置为气候态淡水通量场, 旨在探究淡水强迫项对盐度年代际变异的影响。Exp-2 实验与 Main Run 实验条件相同, 但将驱动模式的风场设置为气候态风应力, 旨在探究由风场引起的水平平流项对盐度年代际变异的作用。

表1 数值实验模式具体配置

Tab.1 Model setup details of numerical experiment

实验	运行时间	风应力	淡水通量	初始值	作用
Spin up	10年	气候态风应力	气候态淡水通量	流速=0 盐度=35 psu	求气候态流场与盐度场,作为后续实验的初始值
Main Run	1995—2022年	实际风应力	实际淡水通量	Spin up	再现盐度的真实变化
Exp-1	1995—2022年	实际风应力	气候态淡水通量	Spin up	探究淡水强迫的作用
Exp-2	1995—2022年	气候态风应力	实际淡水通量	Spin up	探究风应力的作用

2 结果与分析

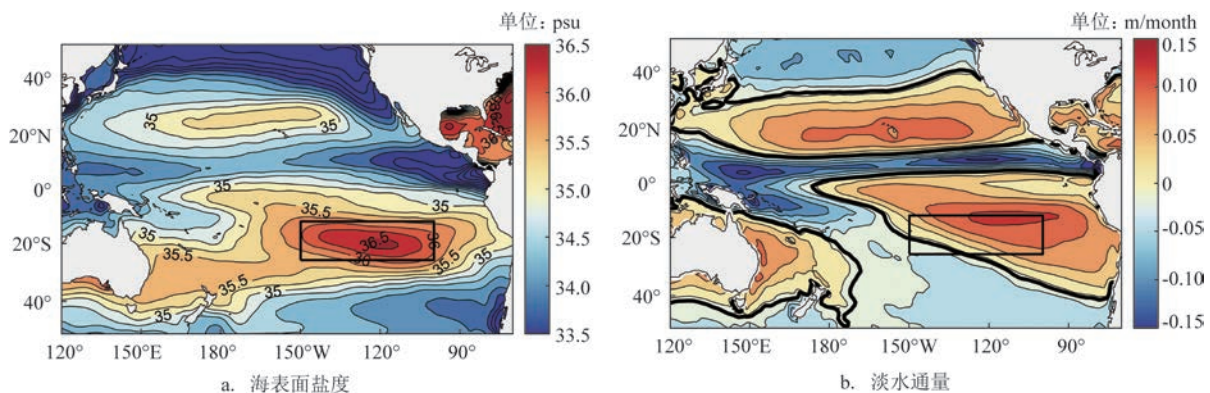
本文首先使用观测数据分析 1999—2022 年各要素平均场的空间分布及盐度年代际变化,讨论这一时期的平均海表面盐度平衡,并分析每一项对于盐度平衡的贡献,最后在验证模型有效性的基础上,通过数值实验进一步确定南太平洋海表面盐度最大值的年代际变异机制。

2.1 年代际变异特征

EN4 数据提供的 1999—2022 年平均的海表面盐度图(见图 1a)显示出南北半球均有盐度最大值,其中南太平洋盐度最大值比北太平洋大,且受南太平洋辐合带(South Pacific Convergence Zone, SPCZ)的影响被分为两部分。本文主要研究南太平洋海表面盐度最大值较大的一部分,即以 36.0 psu 为界线,选取图 1 中黑色矩形框为研究区域。1999—

2022 年平均淡水通量(E-P)显示(见图 1b),热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)与 SPCZ 出现了明显的通量负值区,其中正值区位于盐度最大值的东北方向。南太平洋海表面盐度最大值区西南端由 SPCZ 占据,受负淡水通量控制,东北端由正淡水通量控制。

为了解南太平洋海表面盐度最大值区中心位置变化,对 36.0 psu 等值线内盐度值进行加权平均,并将其作为盐度中心位置。图 2 是 1999—2022 年盐度中心位置的南北位置(见图 2a)与东西位置(见图 2b)的变化。从图中可看出盐度中心位置存在明显偏移,南北位置在 1999—2005 年、2011—2016 年向北移动了 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$,2005 年—2011 年向南移动了 2° ;东西位置在 2005—2008 年、2016—2022 年向西移动了 $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$,在 2008—2016 年向东移动了 8° 。沿图 2b 中的东西中心位置将盐度作为 $30^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{S}$ 的时间函数,得到盐度中心位置南北移动的另一表



注:黑色矩形框代表南太平洋海表面盐度最大值区;图b中正值表示蒸发大于降水,负值表示降水大于蒸发

图1 1999—2022年平均的海表面盐度与淡水通量

Fig.1 Average sea surface salinity and freshwater flux during 1999—2022

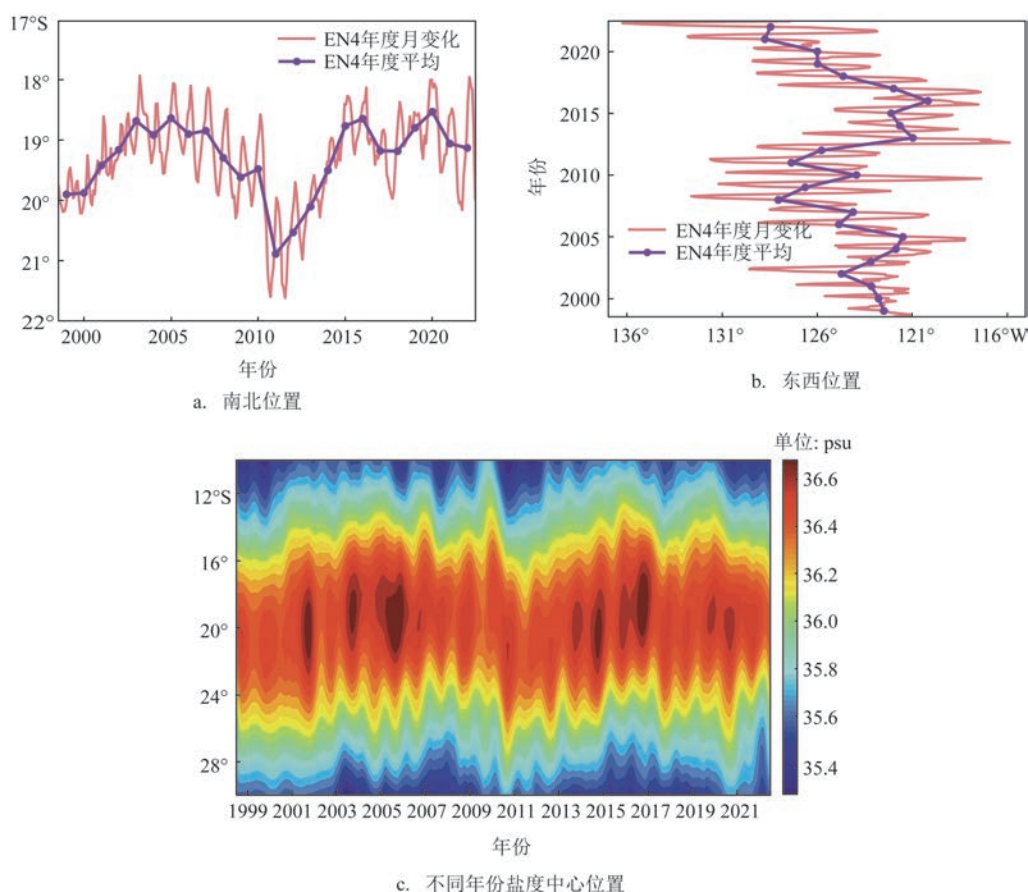


图2 南太平洋海表面盐度最大值区盐度中心位置的变化

Fig.2 The change of the central position in the sea surface salinity maximum region of the South Pacific Ocean

达形式(见图2c),盐度中心在1999—2005年、2011—2016年变大且向北移动,在2005—2011年变小且向南移动。

为了解南太平洋海表面盐度最大值区的时空特征,对 $26^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{S}$, $150^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{W}$ 区域(见图1黑色矩形框)进行经验正交分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)。图3是第一模态的空间分布与时间系数,其中第一模态可以解释总方差的33%,其空间分布呈两极型,揭示了南太平洋海表面盐度最大值东北部与西南部变化呈反向的跷跷板分布(见图3a),这表明盐度最大值区及其中心位置存在东北—西南向移动。结合时间序列,第一模态表明1999—2022年南太平洋海表面盐度最大值区存在明显位置变化,即2005年、2016年偏东北,2011年、2022年偏西南。这与图2中盐度中心的位置变化基本一致,表明EOF第一模态可较好地描述南太平洋海表面盐度最大值区的位置变化。将第一模态的

时间序列与PDO指数作比较(见图3b),两者同期相关系数为0.84,说明海表面盐度最大值的位置摆动与PDO密切相关。王心茹^[15]分析了1999—2020年的盐度数据,指出该时间段盐度的年代际变化与PDO有关,而我们使用更长的时间序列进一步证实了王心茹^[15]的结论,再次验证了南太平洋海表面盐度最大值区的年代际变异特征及其与PDO同期相关的关系。

2.2 盐度收支方程诊断分析

图4是1999—2022年南太平洋区域盐度收支方程中各项的空间分布,淡水强迫项主要受淡水通量影响,负值主要出现在SPCZ区域,正值出现在蒸发占主导的亚热带环流区域。这与BINGHAM等^[14]的研究结果一致,其研究结果显示(见[14]的图10a、10b),盐度中心位置的西南方向以降水为主,平均淡水强迫呈负值。水平平流项除在亚热带地区($36^{\circ}\sim$

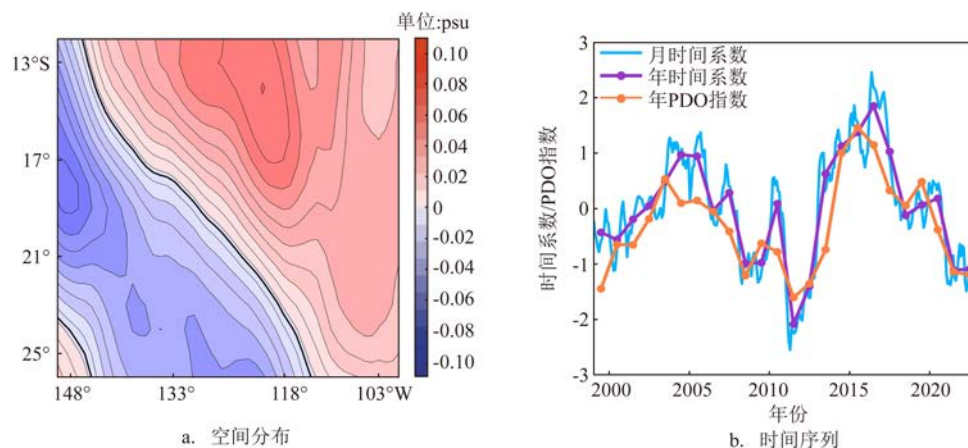


图3 EN4数据EOF第一模态的空间分布与时间序列

Fig.3 The spatial distribution and time series of the first EOF mode obtained from EN4 data

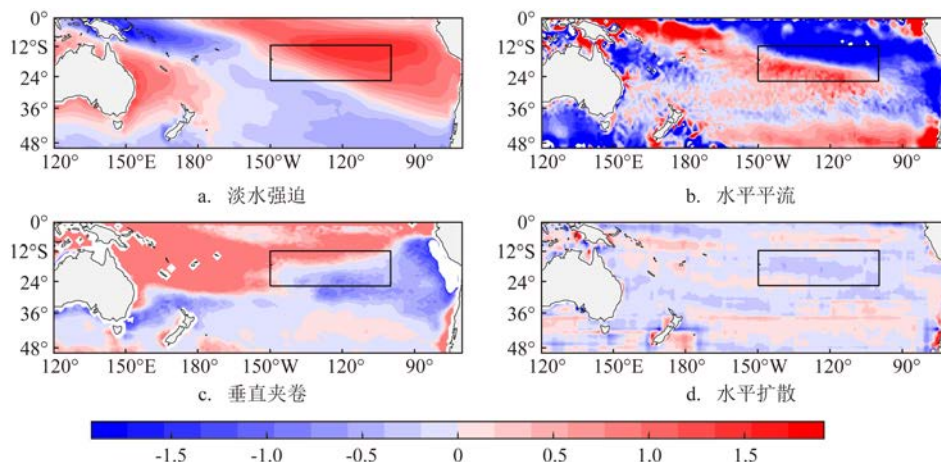


图4 盐度收支方程中各项的空间分布(单位:psu/a)

Fig.4 The spatial distribution of terms in the salinity budget equation (unit: psu/a)

42°S, 170°~90°W)海域为负值,其余海域的空间分布与淡水强迫项相似,但符号相反,这表明海洋环流在盐度收支中平衡淡水强迫的重要性。垂直夹卷项的空间结构主要受盐度差的影响,在所罗门群岛南端正值较高,而在南太平洋两个盐度最大值附近为负值,但量值较小。比较而言,水平扩散项在整个南太平洋区域都较小。

图5是不同时间段盐度收支方程各项的平均贡献,其中St表示盐度趋势项,Sum表示盐度收支方程右项和,EP表示淡水强迫项,Adv表示水平平流项,Ent表示垂直夹卷项,Diff表示水平扩散项。1999—2022年,盐度趋势项(2.7×10^{-3} psu/a)与盐度收支方程右项和(2.5×10^{-3} psu/a)基本平衡。淡水强

迫项、水平平流项、垂直夹卷项与水平扩散项的平均贡献大小分别为 6.608×10^{-1} psu/a、 -7.417×10^{-1} psu/a、 2.041×10^{-1} psu/a、 -1.207×10^{-1} psu/a。图5还区分了1999—2005年、2005—2011年、2011—2016年、2016—2022年各项的平均贡献。总的来说,盐度变化趋势项与盐度收支方程右项和在不同时间段平均贡献的正负一致,大小相当,表明本研究的盐度收支分析在该区域合理。在盐度收支方程右端各项中,淡水强迫项与水平平流项对盐度变化的平均贡献最大且符号相反,相比而言,垂直夹卷项与水平扩散项对于盐度变化的平均贡献较小。因此,主要关注淡水强迫项与水平平流项对于南太平洋海表面盐度最大值年代际变异的作用。

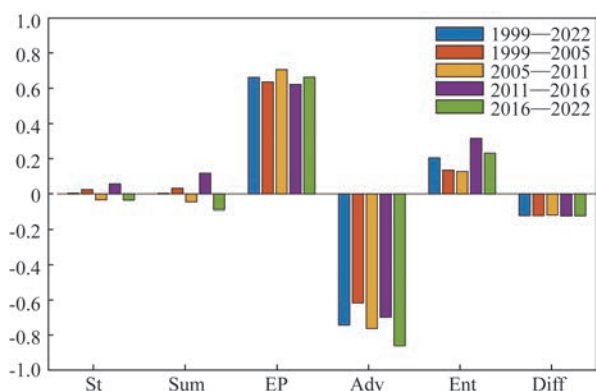


图5 不同时间段盐度收支方程中各项的平均贡献(单位: psu/a)

Fig.5 The average contribution of each item in the salinity budget equation at different time periods (unit: psu/a)

为单独了解淡水强迫项、水平平流项两种控制因素对南太平洋海表面盐度最大值区年代际变化的作用,我们以1998年12月EN4盐度为初始场,分别对淡水强迫项和水平平流项进行时间积分,得到

由淡水强迫项和水平平流项重建的盐度场^[18]。

图6是分别由淡水强迫项、水平平流项重建得到的第一模态的空间分布与时间系数,其中第一模态分别解释了总方差的65%、44%。将空间分布与时间序列相结合分析,淡水强迫项重建盐度在1999—2022年主要表现为盐度量值波动(见图6a, 6c),而水平平流项重建盐度则表现为明显的位置变化(见图6b, 6d),特别是盐度等值线在2006年、2017年偏东北,2013年、2022年偏西南,这与实测盐度观测到的位置变化大致相同,仅存在1~2年的时间差。这意味着淡水强迫项可能不是导致南太平洋盐度最大值区年代际位置变化的主要因素,而水平平流项似乎在引起位置的南北摆动方面发挥关键作用。

2.3 年代际变异机理的模拟分析

图7是EN4数据与模式输出数据的对比,旨在评估1.5层约化重力模式的模拟效果。将EN4数据1999—2022年平均海表面盐度与Spin up实验输出

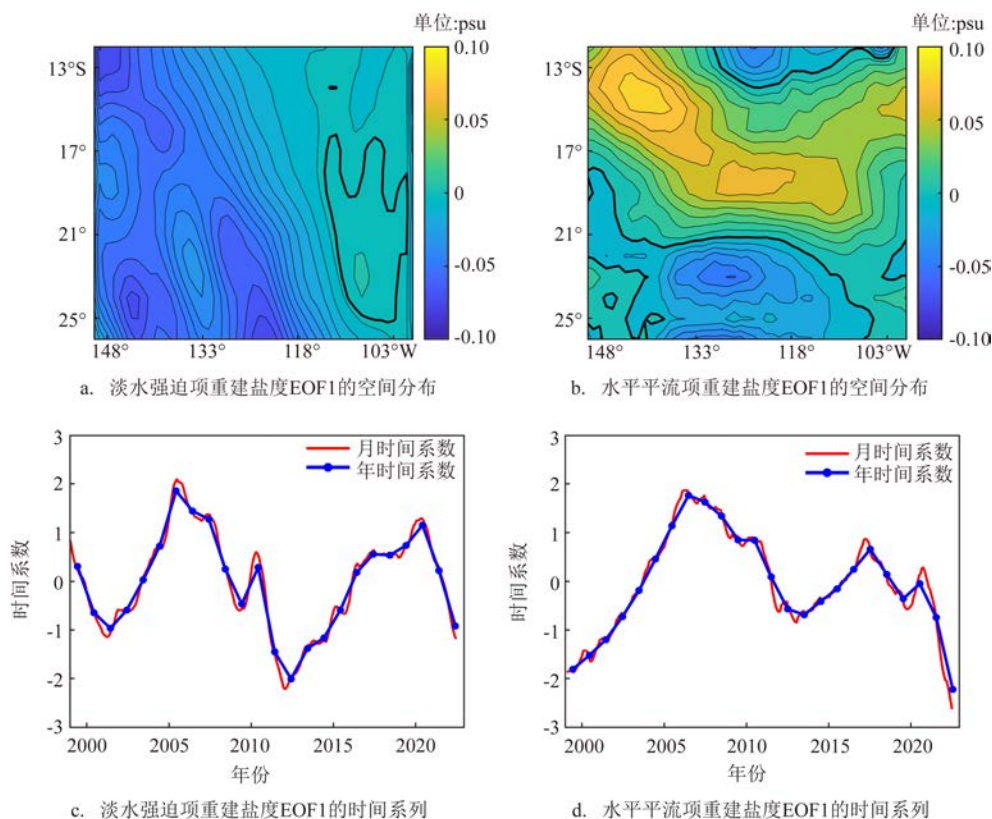


图6 重建盐度 EOF 第一模态的空间分布与时间序列

Fig.6 The spatial distribution and time series of the first EOF mode obtained from reconstructed salinity

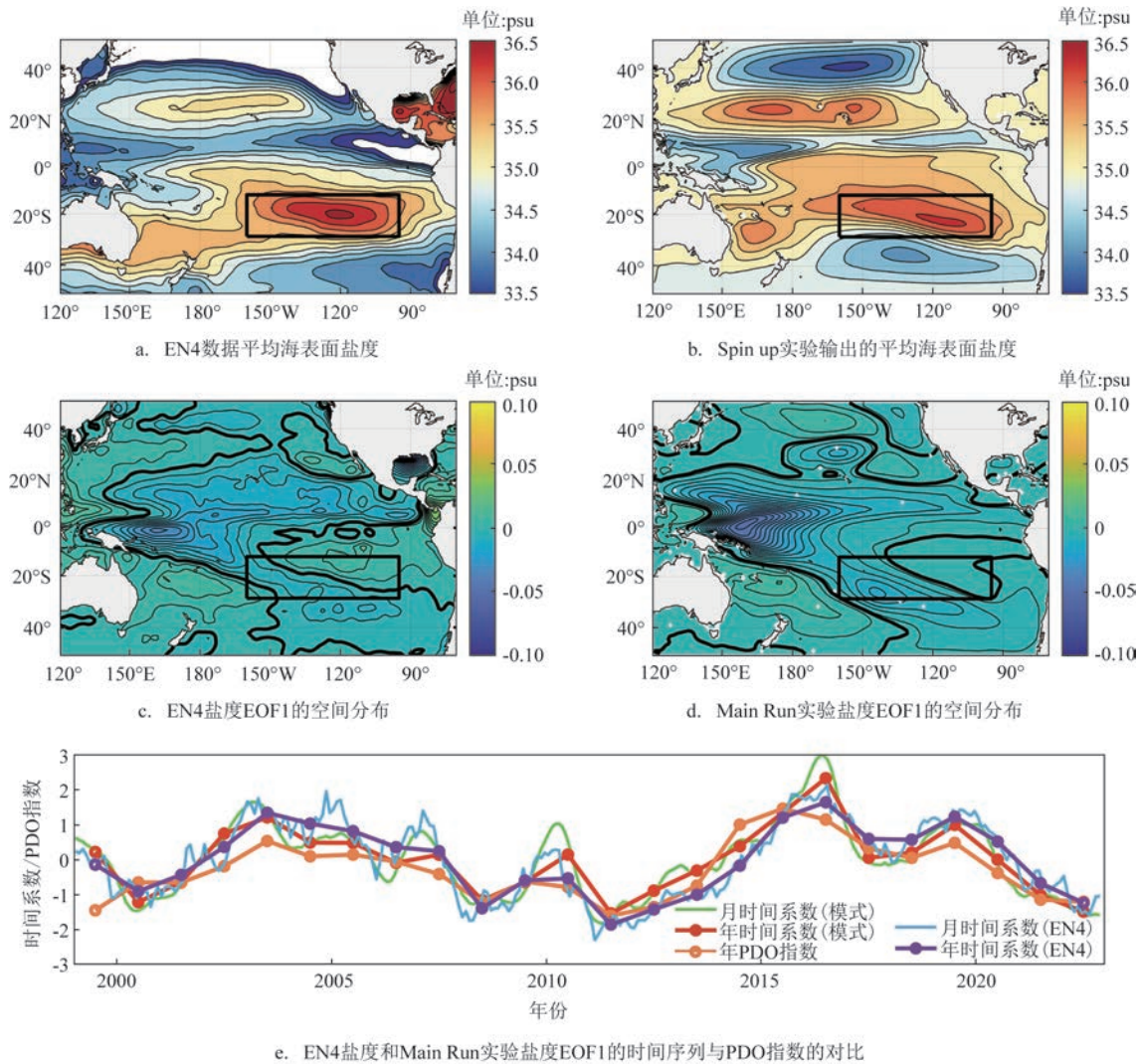


图7 实测数据与模式输出数据的对比

Fig.7 Comparison of the actual measurement data with the output data of the model

的平均海表面盐度进行对比,模拟结果显示海表面盐度在南太平洋区域有两个最大值,一个位于亚热带环流中心约20°S附近,另一个位于西太平洋塔斯曼海约30°S附近(见图7b),这与实测盐度最大值区的位置相近(见图7a)。在南太平洋区域,Spin up实验气候态盐度与EN4气候态盐度的时间相关系数为0.79,在南太平洋盐度最大值区域,Spin up实验盐度与EN4盐度之间的空间相关系数为0.78。这表明模式较好地模拟了南太平洋海表面盐度的平均状态。

为了更准确观察模型输出的盐度变化,以36.0 psu为界限,选取图7b中的矩形框为后续模式结果的研究区域。为了评估模式对南太平洋海表

面盐度年代际变化的模拟效果,图7c—e分别比较了Main Run实验和EN4盐度第一模态的空间分布与时间序列。经计算,第一模态分别解释了总方差的47.46%、25.00%。模拟结果在空间分布和时间演变方面与观测结果基本一致,特别是在南太平洋海表面盐度最大值区域,模拟结果再现了盐度的南北摆动,即东北部和西南部的反向跷跷板分布。在时间序列上,模拟结果与EN4盐度之间的相关系数为0.90,且与PDO同期相关。这表明模拟结果成功再现了1999—2022年太平洋区域海表面盐度的年代际变化,可为下一步数值实验奠定基础。

图8是Main Run、Exp-1与Exp-2数值实验输出盐度在南太平洋海表面盐度最大值区第一模态的

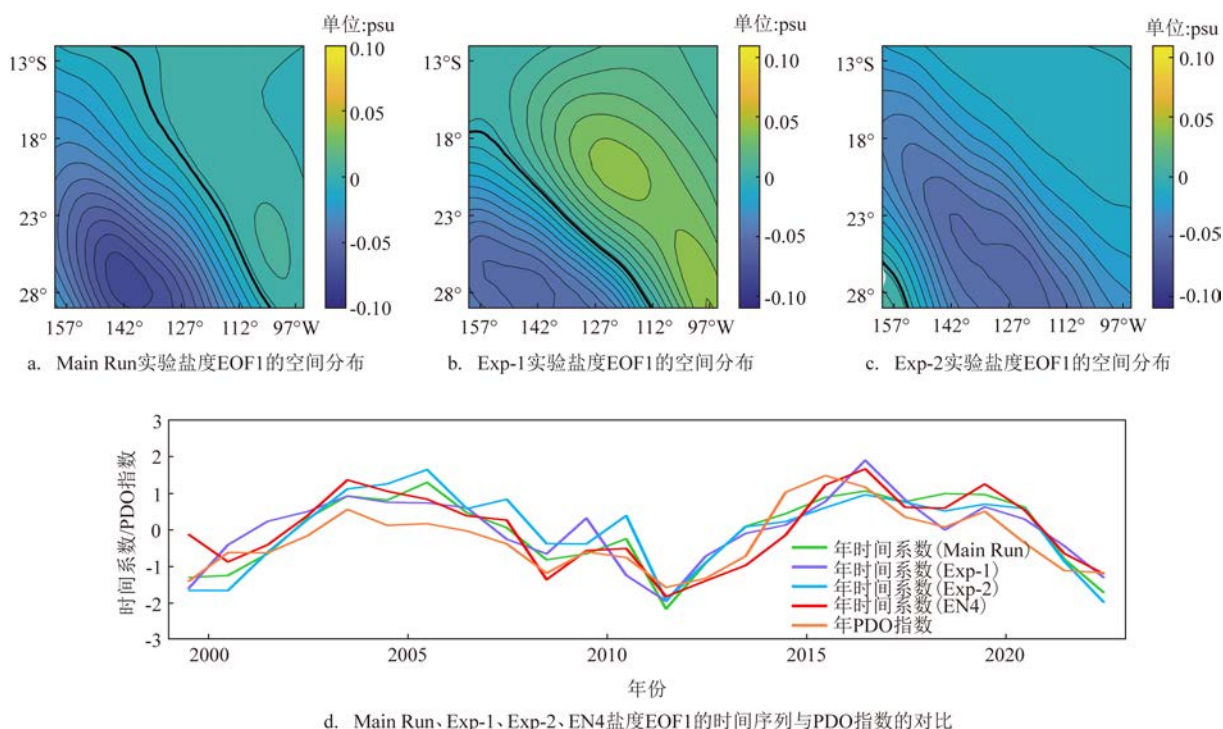


图8 数值实验盐度 EOF 分析第一模态的空间分布与时间序列

Fig.8 The spatial distribution and time series of the first EOF modes of salinity obtained by numerical experiments

空间分布与时间系数,经计算,第一模态分别解释了总方差的 55.53%、43.87%、55.11%。Main Run 实验模拟结果(见图 8a、8d)与实测数据(见图 3)均显示了年代际尺度上盐度最大值区的南北摆动,即 2005 年、2016 年偏东北,2011 年、2022 年偏西南。这与观测到的摆动时间完全吻合,表明淡水强迫项与水平平流项对南太平洋海表面盐度年代际变化的重要性。尽管模式简单,未考虑垂直夹卷项的贡献,但仍可较好地再现盐度的年代际变化,也意味着垂直夹卷项相对于淡水强迫项、水平平流项的作用较小。

在考虑真实风场和气候态淡水通量的情况下,Exp-1 第一模态空间分布存在东北—西南的跷跷板结构,可捕捉到与实测结果一致的盐度最大值区的南北摆动(见图 8b)。时间序列与 PDO 指数对比的结果表明两者同期相关(见图 8d)。与 Main Run 实验对比结果表明淡水强迫项对于盐度最大值的南北摆动并不是那么重要,这意味着风场所引起的水平平流项可能是主要调控因素。

在考虑真实淡水通量和气候态风场的情况下,Exp-2 第一模态空间分布在整个区域几乎是同步变

化,中部存在一个从西北—东南的最大值,这表明盐度最大值的年代际变化是其盐度量值大小的变化,而不是其南北摆动(见图 8c)。对于中部存在的从西北—东南的最大值,我们推测与 SPCZ 的年代际变化有关。时间序列与 PDO 指数对比结果表明两者同期相关(见图 8d),这表明淡水强迫项的年代际变化会引起盐度量值的年代际变化。该实验无法再现盐度最大值的南北摆动,表明这种年代际风场所引起的水平平流非常重要,再一次验证了 Exp-1 的实验结果,即水平平流项是调控盐度最大值年代际变化的主要因素。

3 结论

南太平洋海表面盐度最大值区具有明显的年代际变化特征,这也是全球变暖研究中的一个重要指标,但其潜在的机制尚未确定。本研究采用盐度收支分析与 1.5 层约化重力模式研究了南太平洋海表面盐度最大值的年代际变异机制,评估了淡水强迫、水平平流、垂直夹卷、水平扩散这 4 种因素的相对贡献,揭示了由风场所引起的水平平流的主导作

用。结论如下:

①1999—2022年南太平洋海表面盐度最大值区及其中心位置存在明显的年代际变化,表现为2005年、2016年偏东北,2011年、2022年偏西南。这种低频变化主要是由于水平平流项的调控作用,而不是淡水强迫的作用。

②淡水强迫项的作用主要是引起南太平洋海表面盐度最大值区盐度量值大小的年代际变化,这与SPCZ的年代际变化有关,而对于盐度最大值位置摆动的贡献较小。

③在盐度最大值区,垂直夹卷项与水平扩散项的平均贡献较小。1.5层约化重力模式中没有垂直夹卷项仍可较好地再现盐度最大值的南北摆动,这意味着垂直夹卷项的贡献可能较小,其具体贡献将在后续工作中进一步展开研究。

参考文献:

- [1] LEVITUS S. Annual cycle of salinity and salt storage in the world ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1986, 16(2): 322-343.
- [2] DURACK P J, WIJFFELS S E. Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(16): 4342-4362.
- [3] TERRAY L, CORRE L, CRAVATTE S, et al. Near-surface salinity as nature's rain gauge to detect human influence on the tropical water cycle[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(3): 958-977.
- [4] MELZER B A, SUBRAHMANYAM B. Investigating decadal changes in sea surface salinity in oceanic subtropical gyres[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(18): 7631-7638.
- [5] HELBER R W, RICHMAN J G, BARRON C N. The influence of temperature and salinity variability on the upper ocean density and mixed layer[J]. *Ocean Science Discussions*, 2010, 7(4): 1469-1495.
- [6] YU L S, JOSEY S A, BINGHAM F M, et al. Intensification of the global water cycle and evidence from ocean salinity: a synthesis review[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2020, 1472(1): 76-94.
- [7] YU L S. A global relationship between the ocean water cycle and near-surface salinity[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C10): C10025.
- [8] SHI H Y, DU L, NI X B. Salinity variability modes in the Pacific Ocean from the perspectives of the Interdecadal Pacific Oscillation and global warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(7): e2021JC018092.
- [9] GORDON A L, GIULIVI C F, BUSECKE J, et al. Differences among subtropical surface salinity patterns[J]. *Oceanography*, 2015, 28(1): 32-39.
- [10] BINGHAM F M, BUSECKE J, GORDON A L, et al. The North Atlantic subtropical surface salinity maximum as observed by Aquarius[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(11): 7741-7755.
- [11] CHEN J, LIU H L, BAI C Z, et al. Identifying climate modes contributing to sea surface salinity decadal variation in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(10): e2019JC016011.
- [12] HASSON A, DELCROIX T, BOUTIN J. Formation and variability of the South Pacific Sea Surface Salinity maximum in recent decades[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(10): 5109-5116.
- [13] DELCROIX T, ALORY G, CRAVATTE S, et al. A gridded sea surface salinity data set for the tropical Pacific with sample applications (1950—2008) [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2011, 58(1): 38-48.
- [14] BINGHAM F M, BUSECKE J J M, GORDON A L. Variability of the South Pacific subtropical surface salinity maximum[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(8): 6050-6066.
- [15] 王心茹. 太平洋盐度的时空变化及气候效应[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- WANG X R. Temporal and spatial variation of salinity in the pacific ocean and climatic effects[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2022.
- [16] GOOD S A, MARTIN M J, RAYNER N A. EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(12): 6704-6716.
- [17] LEVITUS S, ANTONOV J I, BOYER T P, et al. Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(7): L07608.
- [18] YU L, JIN X, WELLER R A. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAFlux) project: latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables[R]. Barnsborough County: Woods Hole Oceanographic Institution, 2008: 64.
- [19] ADLER R F, HUFFMAN G J, CHANG A, et al. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-present) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, 4(6): 1147-1167.
- [20] DUCET N, LE TRAON P Y, REVERDIN G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C8): 19477-19498.
- [21] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [22] MANTUA N J, HARE S R, ZHANG Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon

- production[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(6): 1069-1080.
- [23] JOHNSON G C, SCHMIDTKO S, LYMAN J M. Relative contributions of temperature and salinity to seasonal mixed layer density changes and horizontal density gradients[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C4): C04015.
- [24] DONG S F, GARZOLI S L, BARINGER M. An assessment of the seasonal mixed layer salinity budget in the southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C12): C12001.
- [25] 张玉红, 徐海明, 杜岩, 等. 阿拉伯海东南海域盐度收支的季节变化[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(5): 66-74.
- ZHANG Y H, XU H M, DU Y, et al. Seasonal variability of salinity budget in the southeastern Arabian Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(5): 66-74.
- [26] KIM S B, FUKUMORI I, LEE T. The closure of the ocean mixed layer temperature budget using level-coordinate model fields[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23(6): 840-853.
- [27] FENG M, HACKER P, LUKAS R. Upper ocean heat and salt balances in response to a westerly wind burst in the western equatorial Pacific during TOGA COARE[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C5): 10289-10311.
- [28] HUANG R X. *Ocean circulation: wind-driven and thermohaline processes*[M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2009: 261-267.
- [29] LUO Y Y, ROTHSTEIN L M, ZHANG R H, et al. 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*, 2005, 110(C10): C10002.
- [30] LACASCE J H, ISACHSEN P E. On Sverdrup discontinuities and vortices in the Southwest Indian Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(12): 2940-2950.
- [31] HUTCHINSON K, BEAL L M, PENVEN P, et al. Seasonal phasing of Agulhas Current transport tied to a baroclinic adjustment of near-field winds[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(10): 7067-7083.

Mechanism of interdecadal variation of sea surface salinity maximum in the South Pacific Ocean

ZHU Tingting^{1,2}, WANG Qingye^{2*}, CHEN Lili¹

(1. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: This article utilizes salinity data from 1999 to 2022 to depict the northeast-southwest oscillation in the position of the maximum salinity, with a shift to the northeast in 2005 and 2016, and a shift to the southwest in 2011 and 2022. Two methods, salinity budget analysis and a 1.5-layer reduced gravity model, are used to investigate the interdecadal variation mechanism of the sea surface salinity maximum in the South Pacific Ocean from 1999 to 2022, and to assess the relative contributions of freshwater forcing, horizontal advection, vertical entrainment, and horizontal diffusion. The results show that the average contribution of horizontal advection and freshwater forcing are dominant, with horizontal advection being the key factor driving the interdecadal variation in the position of the sea surface salinity maximum in the South Pacific Ocean, while the freshwater forcing mainly causes changes in the magnitude of salinity values. The contributions of vertical entrainment and horizontal diffusion to the interdecadal variation in the salinity maximum may be relatively small.

Key words: South Pacific Ocean; sea surface salinity; interdecadal variation; horizontal advection; freshwater forcing