

史荒原, 杜凌, 徐道欢. 热带太平洋盐度变化: 2015–2017 年盐度异常[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 47–58, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.005

Shi Huangyuan, Du Ling, Xu Daochuan. The robust salinity anomaly event during 2015–2017 in the tropical Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 47–58, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.005

热带太平洋盐度变化: 2015–2017 年盐度异常

史荒原¹, 杜凌^{1*}, 徐道欢¹

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 本文利用 Argo 海水盐度资料、海流同化数据和同期大气再分析数据, 探讨热带太平洋盐度趋势变化和动力过程。Argo 资料显示, 2015–2017 年热带太平洋出现显著的盐度异常 (SAE), 这是改变长期趋势的主要原因, 表现为表层显著淡化和次表层咸化特征。这种盐度异常具有明显的区域性特征和垂直结构的差异, 体现在热带太平洋北部海区 (NTP) 和南太平洋辐合区 (SPCZ) 表层淡化, 盐度最大变幅为 0.71~0.92, 淡化可以达到混合层底; 热带太平洋南部海区 (STP) 次表层咸化, 最大变幅为 0.46, 主要发生在温跃层附近, 期间盐度异常沿着等位密面从西向东扩展。平流和挟卷是与 SAE 密切相关的海洋动力过程, 两者在 NTP 淡化海域有着持续而较为显著的影响, 在 SPCZ 淡化、STP 咸化海域后期贡献也较大, 其中盐度平流对热带太平洋海区盐度变化起主要贡献。NTP 淡化海区表层淡水通量和 STP 咸化海区密度补偿引起的混合也是 SAE 的重要影响因素。

关键词: 盐度异常; 平流和挟卷; 密度层结; 热带太平洋

中图分类号: P731.12

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)03-0047-12

1 引言

海洋盐度变化是衡量海洋水团的重要指标之一, 它通过改变浮力通量进而影响海洋环流和混合过程^[1], 也是衡量世界大洋气候变化过程的一个重要指标^[2]。作为全球水循环的重要部分, 海水盐度的变化与海表淡水通量、地表径流、海洋内部混合和平流输送以及海平面变化密切相关^[3-6]。已有的研究指出, 由于全球变暖引起全球水循环增强, 热带和中纬度地区湿润地区会变得更湿润, 亚热带干旱和半干旱的地区会变得更加干旱, 在这一过程下, 热带以及低纬度强降水海域盐度会降低, 副热带蒸发强烈的海域盐度将增加^[7-8]。

随着海洋观测数据的不断丰富, 以及海洋遥感数据的广泛使用, 世界大洋表层盐度 (Sea Surface Salin-

ity, SSS) 的变化特征逐渐得到共识。在过去的几十年里全球水循环增强, 副极地和热带海区 SSS 降低, 副热带海区 SSS 增加^[9]。洋盆尺度上, 太平洋海域呈现广泛的淡化, 最显著的是西太暖池^[10], 而 Du 等^[11]分析热带太平洋 1993–2017 年表层盐度趋势, 发现西太暖池区有咸化特征。大西洋海区则表现出显著的增盐趋势^[2, 13], 南大洋在近几年里具有大范围的淡化现象^[13]。表层盐度变化趋势在全球尺度上表现出显著的区域性特征, 符合全球水循环不断增强的现状^[10, 14]。

表层盐度的长期变化扩展到海洋深层, 太平洋不同深度上海水盐度长期变化较为复杂。Boyer 等^[15]和 Durack 等^[16]发现 20 世纪近几十年间北太平洋上 300 m 海水显著淡化, 高纬度深层海洋淡化较弱; 南太平洋低纬度海区上层海水咸化, 高纬度深层海水淡

收稿日期: 2019-03-25; 修订日期: 2019-09-25。

基金项目: 国家自然科学基金 (41376008, 41576020); 全球变化与海气相互作用专项 (GASI-03-01-01-09); 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB417401)。

作者简介: 史荒原 (1992—), 女, 安徽省合肥市人, 从事全球海平面变化研究。E-mail: shihuangyuan@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者: 杜凌, 副教授, 从事气候变化与全球海平面变化研究。E-mail: duling@ouc.edu.cn

化。而 Wong 等^[17] 研究表明 1960–1994 年北太平洋上 300 m 增盐, 中层水具有明显的长期淡化特征。从 20 世纪 90 年代中期开始, 西太平洋副热带环流上温跃层/盐跃层海水盐度迅速淡化^[18]。2000 年之后热带太平洋北部和西南部海区上 100 m 增盐明显, 最显著的增盐趋势位于西太暖池, 在 50 m 以浅达到最大, 弱的淡化特征出现在赤道以南 100 m 深度^[19]。而这一大范围增盐趋势在 2015 年发生了改变, 西太平洋出现大范围淡化^[14]。Yan 等^[20] 发现 2002–2013 年西北太平洋次表层盐度趋势在 15°N 南北区域上相反。

影响盐度变化垂直分布特征的因素有很多。表层盐度变化与蒸发和降水密不可分, 也与人类活动对热带水循环的影响有关^[8], 同时还受环流的影响^[21–23]。风场调整的等密度面起伏和水团混合的共同作用导致密度面上温盐关系的改变^[12, 24]。海洋表层温盐异常形成的潜沉, 以及不稳定混合过程, 是引起次表层盐度变化的主要原因。Nonaka 和 Sasaki^[25] 分析了东南太平洋副热带海域冬季表层降温和等密度面露头区经向移动过程中, 潜沉作用对低纬度次表层盐度的影响, Yeager 和 Large^[26] 提出跨等密度面的混合机制影响了混合层底的温盐变化。此外, 众多研究从混合层盐度收支的角度, 分析了影响盐度变化的动力因素, 如平流、混合、挟卷以及湍流耗散作用^[27–29], ECCO 模拟结果则显示, 垂向混合以及挟卷在盐度收支中有着更为重要的影响, 次表层高盐水的垂直挟卷混合与表层平流和淡水通量具有同等的重要性^[30]。

近年来, 热带太平洋表层盐度变化复杂, 2014 年赤道太平洋中部海区存在明显的盐度正异常^[31], Gasparin 和 Roemmich^[32] 则发现 2015 年冬季热带太平洋北部海区出现了明显的淡水异常, 这种复杂的变化对盐度长期趋势的影响显著。本文利用 Argo 海水盐度资料、海流同化数据, 以及同期大气风场、蒸发和降水数据, 着重分析 2015–2017 年热带太平洋上层海洋盐度异常事件及其区域性特征和垂直结构, 探讨影响该盐度异常演变过程的主要动力学因素。

2 数据

国际 Argo 计划于 2000 年正式成立, 由 Argo 剖面浮标组成实时海洋观测网, 对大洋 0~2 000 m 深度海水的温度和盐度实施大范围的准实时观测。该计划基于上层海洋观测网而构建, 扩大了观测的空间和时间范围, 提高了观测精度, 是获取世界大洋次表层数据的重要来源。本文采用斯克里普斯海洋研究所 (Scripps Institution of Oceanography) 提供的 Argo 温盐同化网格

数据^[33], 时间跨度为 2004–2017 年, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 共分 58 层, 其中上 200 m 每 10 m 一层, 用以探讨热带太平洋上 400 m 盐度垂直变化特征。

海流数据来自全球海洋资料同化系统 (NECP GODAS)^[34]。该数据集采用的大气强迫场为 NECP 再分析资料, 基于 MOM3 海洋模式, 同化了来自 XBT 和 CTD 的温盐剖面观测数据, 月均海流数据的水平分辨率为 $1^\circ \times (1/3)^\circ$, 垂直方向从 5 m 到 4 478 m 共分 40 层, 本文选择 2004–2017 年的海流数据。同期大气数据均来自于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的 ERA-Interim 数据集^[35], 本文采用的是月均 10 m 风速, 数据的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。蒸发数据为来自 WHOI 的 OAFflux (Objectively Analyzed Air-sea Fluxes) 数据集^[36], 分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。降水数据来自 NECP 的 GPCP (Global Precipitation Climatology Project)^[37–38], 分辨率为 $(1/2)^\circ \times (1/2)^\circ$ 。

3 热带太平洋盐度变化

3.1 上层海洋盐度特征

分析结果表明, 近年来热带太平洋上 400 m 层海洋盐度变化显著, 主要表现为北部副热带环流区表层高盐海域的增盐趋势停止甚至发生逆转, 以致出现热带太平洋北部海区的大范围淡化, 与之相反的是东南部海区高盐水的增盐趋势进一步加强。本文基于 Argo 数据^[33] 研究了两个时段: 2004–2014 年和 2004–2017 年的热带太平洋表层与次表层 (100 m) 盐度线性趋势 (图 1), 进而比较盐度变化差异。对于表层盐度变化而言, 2004–2014 年热带太平洋大部分海区都呈现明显的增盐趋势, 160°W 以西海区的增盐趋势尤为显著, 最大达到了 0.4 psu/(10 a), 南太平洋辐合区 (Southern Ocean Convergence Zone, SPCZ) 附近海区也显著增盐, 咸化程度和北部海区相当; 只有在东南部海域, 即北美西岸至赤道中太平洋的狭窄海域内, 存在海水淡化趋势, 但范围并不大, 与 Du 等^[19] 的研究结果较为一致。而 2004–2017 年线性趋势空间分布与前者相比有着明显的不同, 赤道以及东北部海区出现了大范围的海水显著淡化, 且与前者相比增盐海区向西退缩, 同时咸化程度明显减弱, 而东南部海区则从淡化变为咸化特征 (图 1b)。

这种盐度趋势变化的差异不仅存在于表层, 也同样发生在次表层, 深达温跃层底。次表层盐度趋势分布和表层相似, 程度有所不同。2004–2014 年次表层盐度变化趋势主要表现为热带太平洋西北部与东南部海区的反相变化, 东南部海区 100 m 深度附近淡化

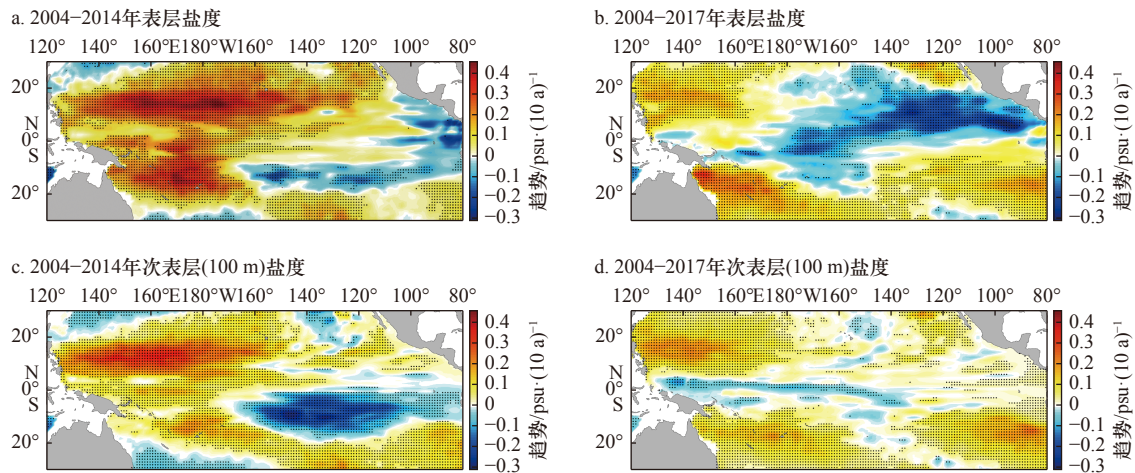


图1 2004–2014年(a, c)和2004–2017年(b, d)热带太平洋表层(a, b)和次表层(100 m)(c, d)的盐度线性变化趋势
 Fig. 1 Surface salinity (a, b) and subsurface (100 m) salinity (c, d) linear trends during 2004–2014 (a, c) and 2004–2017 (b, d) in the tropical Pacific Ocean

图中黑色点覆盖区域表示盐度线性趋势通过95%的显著性检验

The regions shaded in black represented the significant area at the 95% confidence level

趋势达到极值, 约为 $-0.3 \text{ psu}/(10 \text{ a})$, 淡化程度明显大于表层(图1c), 而2004–2017年盐度趋势则显示这一海区淡化特征几乎消失, 甚至变为弱咸化, 100 m深度上由盐度负异常变成正异常(图1d)。以上的比较分析表明, 热带太平洋盐度在2015–2017年产生了显著的异常变化, 表现为在北部海域和SPCZ海区出现盐度负异常, 东南部海区则主要表现为正异常。

基于两时段热带太平洋的盐度趋势差异的垂直结构, 及盐度变化的区域性特征, 本文比较了盐度趋势差异在垂直方向上的极大值, 如图2a所示, 表示的是2004–2017年与2004–2014年盐度趋势之差, 同时考虑垂直深度上最大趋势差异在不同海区所处的不同深度, 重点探讨以下3个研究海域: 热带太平洋北部海区(NTP: $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$), 南太平洋辐合区(SPCZ: $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{W}$)和热带太平洋南部海区(STP: $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$, $110^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{W}$)。NTP和SPCZ海区的增盐趋势明显减弱, 甚至变为淡化趋势(图2a, 表1), 表明2015–2017年该海域的盐度负异常显著, 最显著的负异常发生在日界线以东, 同期STP海区次表层盐度由淡化特征变为弱咸化。上层盐度趋势差异的廓线(图2b)更为清晰的反映了这种盐度变化的垂直结构以及盐度趋势的改变。2004–2014年间, 以低盐为特征的NTP和SPCZ海区增盐趋势的极值发生在表层和近表层, 而高盐的STP海区最显著淡化的深度是125 m。由于2015–2017年发生的盐度异常(Salinity Anomaly Event, SAE), 改变了热带太平洋海区盐度的变化趋势, 使得2004–2017年整个海区盐

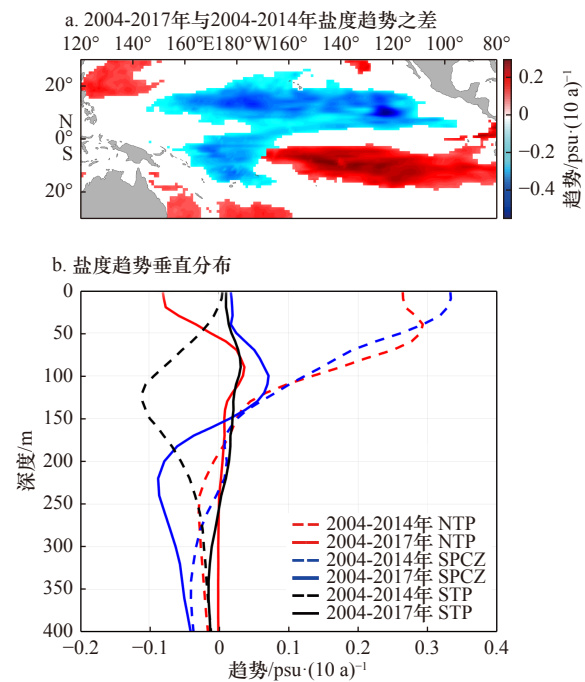


图2 热带太平洋上层盐度的线性趋势之差(a), 及其显著区两个时段盐度趋势的垂直结构(b)
 Fig. 2 The salinity trend differences of the two periods (a) and salinity trends vertical structure of the three regions in the upper tropical Pacific Ocean (b)

度变化趋势几乎一致, 量值减小, 且最大值集中在100 m以浅。其中NTP的表层盐度趋势差异变化最显著, 相当于SAE造成了该海域出现约为 -0.34 的盐度负异常(表1)。此外, SPCZ海域上400 m深度内出现了通过显著性检验的咸化–淡化的垂直结构。

表 1 热带太平洋 3 个海区在两个时间段的盐度变化特征

Table 1 The salinity variability in the tropical Pacific Ocean three key regions during the two periods

	NTP		SPCZ		STP(100 m)	
	2004–2014年	2004–2017年	2004–2014年	2004–2017年	2004–2014年	2004–2017年
平均盐度	34.4	34.3	34.9	34.8	36.0	36.1
趋势/psu·(10 a) ⁻¹	0.26	-0.08	0.33	0.02	-0.21	0.03
趋势差异*/psu·(10 a) ⁻¹		-0.34		-0.31		0.24
盐度变幅**		0.71		0.92		0.46

注: *表示2004–2017年盐度趋势与2004–2014年盐度趋势之差; **表示2004–2017年各海区盐度低频变化的幅度, 详见图3。

近年来热带太平洋盐度的变化特征发生了显著改变, Argo 数据显示, 正是由于 2015–2017 年的盐度异常, 使得整个海区盐度趋势发生了根本性变化, 一方面表现为咸化和淡化趋势迅速减弱甚至发生逆转, 另一方面盐度变化的垂直结构具有显著的区域性特征, 呈现出表层和次表层盐度趋势在两个时段内相反变化的特征。

3.2 盐度异常

Argo 盐度数据显示, 近年来热带太平洋发生盐度异常事件, 具有明显的区域性特征。3 个海区区域平均盐度的低频时间变化(图 3)表明, 表层及次表层盐度变化明显不同。去除季节变化后, 表层盐度的显著变化主要出现在 NTP 和 SPCZ 海区, 次表层的关键区则发生在 STP 海区。但无论是表层盐度, 还是次表层盐度, 均在 2015–2017 年间发生了明显改变, 表现为盐度的显著异常, 是观测时段内最为突出的现象。这种年际差异的最大负异常约为-0.92, 而在南部海区 100 m 次表层盐度异常则可达 0.46。正是 2005–2017 年间的 SAE 事件, 改变了热带太平洋盐度变化趋势(图 1)。

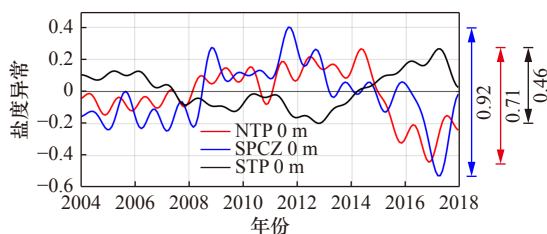


图 3 热带太平洋 NTP, SPCZ 和 STP 海区的盐度异常低频变化(13 个月低通滤波)

Fig. 3 The 13-month lowpass filtered salinity variabilities of three regions (NTP, SPCZ and STP) in the tropical Pacific Ocean

热带太平洋 3 个海区的 SSS 与次表层盐度异常均表现出显著的低频变化特征, 而在 2015 年 10 月和 2016 年 12 月 NTP 海区先后两次刷新近年来的最低

值, 且 SPCZ 海区在 2017 年 4 月也出现了最显著盐度负异常, 超过了-0.5; 几乎同时 STP 海区的次表层盐度达到近年来的最大值。整个热带太平洋 SPCZ 海区的 SSS 变化最为强烈, 年际变化也最大(变幅超过 0.9)。由图 3 可知, 热带太平洋上层盐度异常主要集中在以上 3 个海区, 本文分别选取了两条纬向断面(14°N 和 8°S, 图 4), 以便更清晰地刻画盐度异常的垂直结构。

近年来热带太平洋盐度异常主要发生在上 400 m, 空间差异显著, 这在纬向断面(14°N 和 8°S, 图 4)上更为明显。2004–2014 年 NTP 海区 14°N 纬向断面呈现上层咸化、下层淡化的特征, 这一特征在日界线以西最为明显。由于 2015–2017 年该海域上层海水发生了显著的盐度负异常, 一方面改变了盐度变化的垂直结构, 日界线以东温跃层之上出现了大范围的显著淡化(趋势最大值超过-0.2 psu/(10 a)), 以及西侧的暖池附近海域次表层淡化趋势进一步加剧(图 4b), 盐度趋势之差主要集中在 100 m 以浅的混合层内; 另一方面也表现为 2004–2017 年间盐度趋势的垂直分布与主温跃层深度变化密切相关, 日界线以西和 140°W 以东的温跃层深度变化完全相反, SAE 事件前后, 西侧海域的温跃层由加深变为显著抬升, 东部温跃层明显加深, 伴随着更多的低盐水进入主温跃层, 表现出显著的淡化特征。

对比 NTP 海区, STP 海区盐度变化特征明显不同(图 4c, 图 4d), 主要体现在 2015 年后显著的咸化发生在次表层, 且日界线以东海域温跃层以上均发生大范围的咸化现象, 趋势值可达 0.2 psu/(10 a), 同样是由于 2015–2017 年的 SAE 事件, 使得温跃层出现明显的盐度正异常。同时, 8°S 断面日界线以西 SPCZ 海区的盐度垂直结构的变化表现为 100 m 以上近表层出现广泛而显著的淡化, 即原有增盐趋势大幅度减弱, 甚至转为淡化趋势。相应的, 温跃层深度也表现为 SAE 期

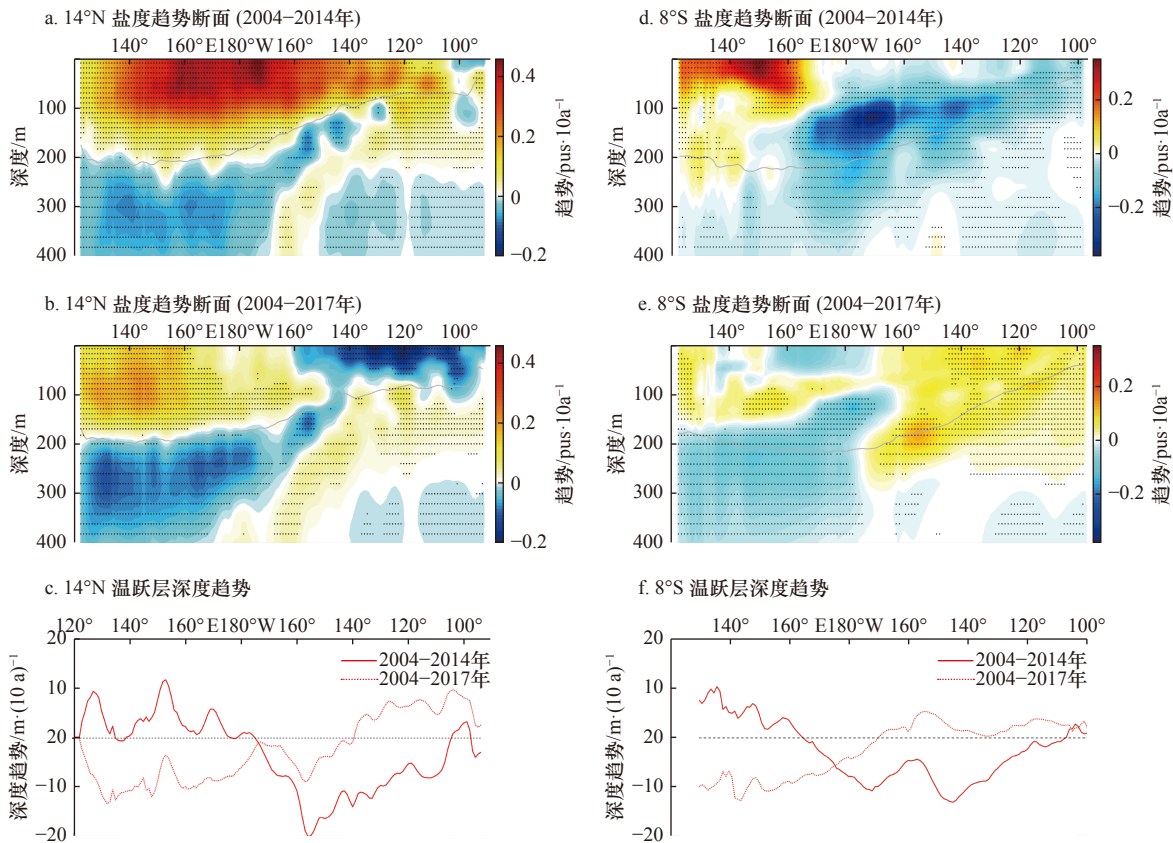


图4 2004–2014年(a, d)和2004–2017年(b, e)热带太平洋上层的盐度趋势及温跃层深度变化(c, f)

Fig. 4 Vertical structure of the upper salinity trends (a–e) and thermocline depth trends (c, f) during the 2004–2014 (a, d) and 2004–2017 (b, e) periods in 14°N and 8°S sections

图中黑色点表示盐度线性趋势通过了95%显著性检验

The regions significant at the 95% confidence level are hatched in black

间160°W以东显著抬升, 而以西变化相反。这种盐度垂直结构的改变和温跃层起伏有着密切的关系, 厄尔尼诺期间热带太平洋海温异常造成了温跃层的变化, 温跃层异常起伏会使得具有不同垂直分层的海水上涌或下沉, 进而对温跃层以上海水的盐度变化有着重要的影响。

从14°N和8°S在不同演变阶段内盐度变化的垂直结构(图4, 图5, 盐度异常已去除季节变化)中可以看出, 淡化集中在100m以上的混合层内(图5a至图5e), 咸化现象主要出现在温跃层上(图5f至图5j)。去除季节变化后, SAE事件发生之前NTP海区东部小范围的低盐水(盐度负异常)出现在密度面露头区, 随后低盐水一部分沿等位密面向西扩展, 强度加强, 在2015年10月和2016年12月达到两次最强负异常, 同时高盐水向西退缩, 低盐水最终分布在上100m的广阔海区; 在此期间一部分中部海区的低盐水跨越了等位密面, 潜沉至温跃层以下, 对应着日界线以西温跃层底的低盐水。近表层低盐水的运动基本被限制

在 $24\sigma_\theta$ 等位密面以内, 而且在这一等位密面上可以观察到混合层内盐度异常的时空变化特征(图6a), 低盐水在2015年10月前后出现, 范围和强度持续增大, 随着时间的演变到2017年末, $24\sigma_\theta$ 等位密面的纬向断面上覆盖了大范围的显著低盐海水。

8°S断面位于东南太平洋副热带模态水(SPES-MW)^[39]的边缘, 主要体现为西侧海域(SPCZ海区)的表层淡化, 与东侧(STP海区, 图2)次表层咸化的盐度异常演变过程。SAE事件的初期, STP海区次表层等位密面($24.5\sigma_\theta \sim 26\sigma_\theta$)分布有高盐水, 200m深度上存在明显的高盐核心, 该高盐水可能是由东南热带太平洋表层冬季露头区域沿等位密面潜沉而来。随后高盐核心的盐度正异常进一步加强, 沿着等位密面范围不断扩大, 表层盐度也有所增加。在2017年4月核心区盐度正异常达到最大(0.5)。值得注意的是, 2016年5月次表层高盐核心仍然存在, 但高盐水已向西扩展到整个纬带, 主要集中在50~150m的深度上, 随着西边界处等位密面的抬升高盐水到达表层^[40]。次

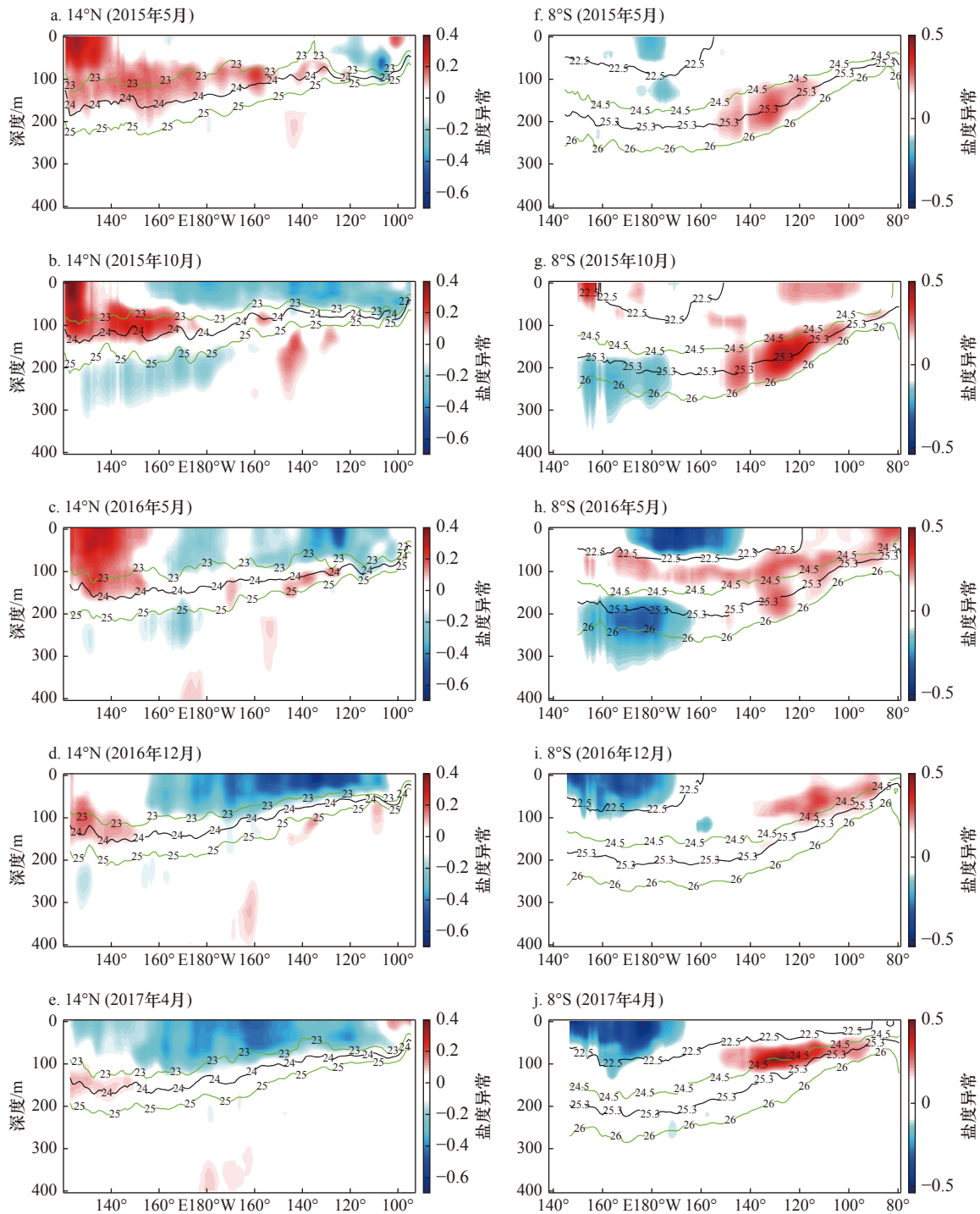


图 5 14°N (a-e) 和 8°S (f-j) 纬度带上 2015–2017 年盐度异常事件的垂直结构演变

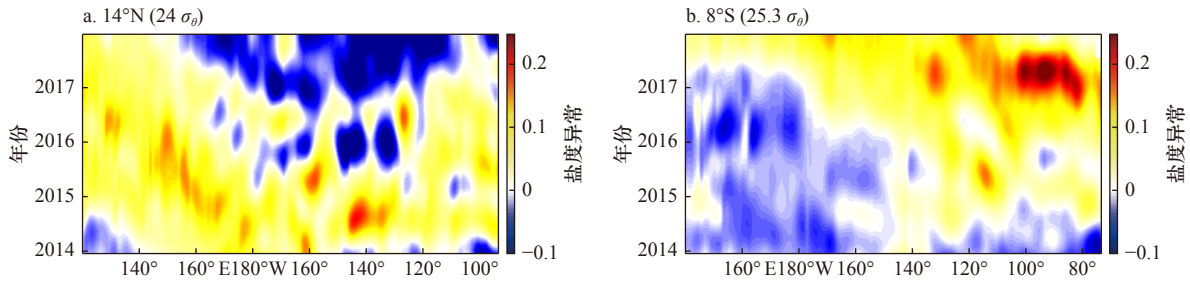
Fig. 5 The evolution of salinity anomaly vertical structure during 2015–2017 in 14°N (a-e) and 8°S (f-j) sections

等值线为等位密面, 其中黑线分别代表 $24\sigma_{\theta}$, $22.5\sigma_{\theta}$ 和 $25.3\sigma_{\theta}$ 等位密面

The contour lines indicate potential isopycnal layers. Black lines represent the $24\sigma_{\theta}$, $22.5\sigma_{\theta}$ and $25.3\sigma_{\theta}$, respectively

表层高盐水体的产生, 一部分受冬季混合层加深的影响, 高盐水向温跃层潜沉^[41], 形成盐度正异常。次年春季时, 混合层迅速变浅, 混合层底水体沿等密度面潜沉, 在海区西部 (SPCZ 海区) 形成次表层高盐水, 加剧了 SPCZ 海区的海洋层化结构。此后 SPCZ 混合层

内的低盐水持续增强, 直至 2017 年春季强度达到最大。25.3 σ_{θ} 位密面上的盐度异常的时空分布 (图 6b) 体现了次表层的盐度异常演变过程。NTP 和 STP 海区在 SAE 事件中的演变过程相似, 都是从东部开始出现盐度异常, 随后沿等密面影响至西部海区, 改变

图6 14°N和8°S纬度带24σ_θ和25.3σ_θ等位密面上的盐度异常时空变化Fig. 6 The salinity anomaly spatiotemporal variability on 24σ_θ and 25.3σ_θ potential isopycnal layers respectively in the 14°N and 8°S sections

了局地海洋层化结构,也受局地挟卷、平流作用的调整。另外,淡化海区盐度可能更多的受表层强迫的影响,而咸化海区可能存在复杂的次表层过程。

4 盐度异常事件的影响因素

影响热带太平洋上层盐度变化的过程十分复杂,海洋动力调整是主要的影响因素,另外在淡化海区还有表层淡水通量、大尺度风场、咸化海区次表层跨密度面混合等因素的共同作用。本文参考目前广泛用于研究混合层盐度变化的收支方程,认为混合层盐度变化受表层淡水通量、水平平流、垂直挟卷和混合过程的影响^[19,30]。本文主要从平流和挟卷的角度,研究了与以上盐度变化密切关联的动力学因素,定量评估了其对于盐度变化的贡献。

4.1 表层淡化

根据2015–2017年SAE事件中NPT和SPCZ海区表层盐度负异常特征,表层淡化主要发生在24σ_θ等位密面以浅,探讨平流和挟卷作用对盐度变化的动力贡献,如图7。根据混合层盐度收支方程,本节计算平流项采用公式 $-\vec{V}_h \cdot \nabla S$, \vec{V}_h 表示层厚 h 内的平均速度,这里 h 为24σ_θ等位密面所在深度, ∇S 为盐度水平

梯度。挟卷项采用 $-(W_e \cdot \Delta S)/h$ 。其中, $\Delta S = S_1 - S_2$, S_1 为24σ_θ等位密面底的盐度, S_2 为24σ_θ位密面层底至表层的平均盐度, h_h 为层厚,挟卷速度 $W_e = H(\partial h / \partial t + \nabla \cdot h \vec{V}_h)$, H 为下层海水对上层影响的Heaviside函数,根据文献[42], $H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$ 。为了更细致地分析混合层的变化,将上400 m的Argo三维温盐资料插值得到垂直分层为1 m的数据,并采用阈值法确定混合层深度^[43]。另外本节也利用ERA-Interim风场数据计算了表层Ekman速度,方程参考 $Ue = (u_e, v_e) = \frac{1}{\rho_0 f h_m} (\tau^x, -\tau^y)$,其中 τ^x 和 τ^y 分别是经向和纬向风应力, h_m 为混合层深度, f 为柯氏参数, ρ_0 为海水参考密度,取1 025 kg/m³^[44]。

SAE事件中表层盐度显著淡化主要与混合层内海洋动力调整有关,两个淡化海区平流作用都是引起盐度异常的主要动力学因素,但是两个淡化海区海洋动力学的演变过程明显不同,NTP海区平流过程具有持续而显著的作用,在SPCZ海区平流项则是在后期起到显著贡献,其动力过程和表层强迫相对复杂。本节将分别分析两个海区的动力学过程和其他表层过程。平流过程在NTP海区盐度异常事件期间持续有正贡献,平流项的显著贡献与盐度梯度变化密切相

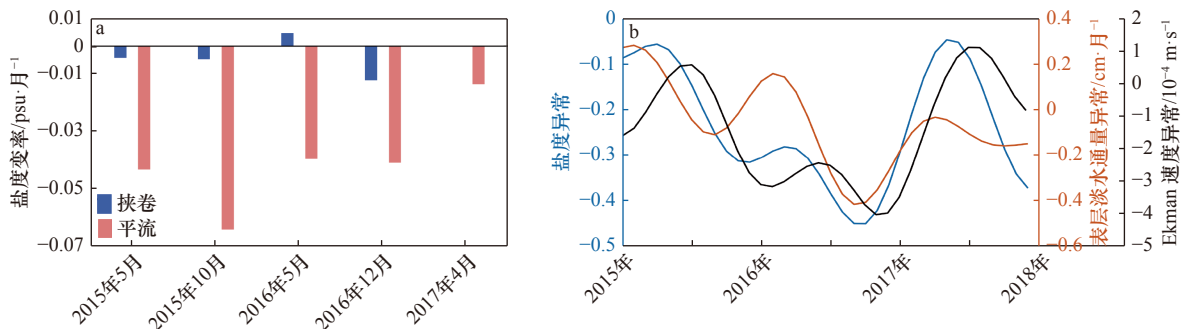


图7 NTP淡化海区平流和挟卷过程的贡献(a)、局地(10°~20°N, 100°~140°W)表层盐度、淡水通量、Ekman运输速度异常的低频变化(b)

Fig. 7 Salinity advection and entrainment fractions (a), low frequency variability of surface salinity, freshwater flux and Ekman transport velocity in NTP freshening region (10°~20°N, 100°~140°W)(b)

关,混合层内盐度梯度从2016年开始发生显著的变化,2016年5-12月盐度场水平经向梯度达到最大负异常,期间平均流对盐度经向梯度扰动的平流输运是造成较强平流项贡献的主要原因(图7a)。相比而言,与密度面起伏相关的挟卷项贡献量值虽小,但仍是不可忽略的一部分,除2016年5月负贡献外,挟卷过程也呈现持续的正贡献。

在NTP表层淡化海域,除了前文提到的混合层内平流、挟卷过程,还包括局地Ekman流和淡水通量(GPCP降水-OAFlux蒸发)的贡献(图7b)。本文分析了14°N纬度带东部局地平均风场引起的Ekman输运效应和淡水通量对表层盐度异常的影响。淡水通量超前盐度异常2个月变化,有利于低盐水在东部近表层的出现,但在SAE事件期间淡水通量并不存在显著增加。Ekman流速滞后盐度异常2个月变化,且对SAE事件的盐度演变具有显著影响,Ekman西向

输运效应有利于低盐水体向西扩展,范围得以扩大。

分析SPCZ淡化海区在SAE事件中相关平流和挟卷的演变过程发现,与NTP淡化海区相比,平流作用的量值较小,但仍是后期SPCZ海区的淡化显著增强的主要原因(图8a)。前期平流过程对这一海区盐度变化有负贡献,后期转变为正贡献并逐渐加强。挟卷过程的演变特征与平流项几乎一致,并且在前两个阶段与平流项量值相当,对该海区盐度变化的贡献较NTP海区更为重要,反映出SPCZ淡化海区复杂的海洋动力学过程。类似地,这里也同时考虑表层淡水通量和风场Ekman输运的可能影响(图8b)。表层淡水通量超前盐度4个月变化,相关性较好。Ekman输运在这一阶段影响较大,与表层淡水通量一起有利于盐度负异常范围的扩展。相比于NTP海区,SPCZ海区表层淡水和风场Ekman输运量值较大,对局地表层淡化的贡献更为重要。

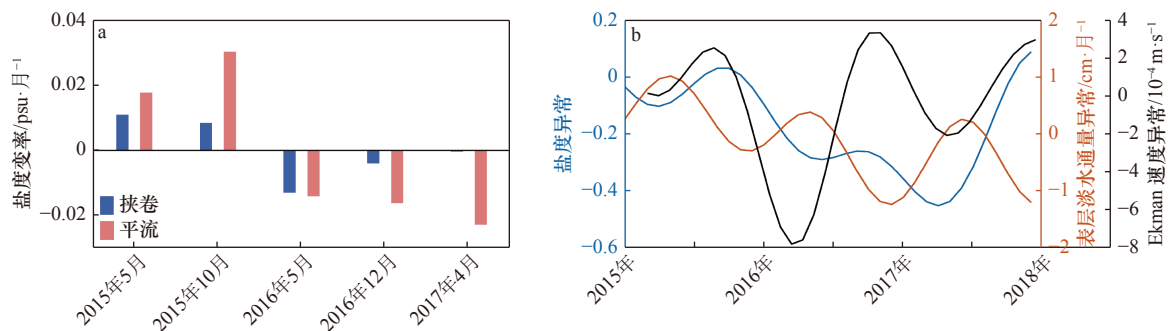


图8 SPCZ淡化海域平流和挟卷的贡献(a),局地(5°~10°S, 170°E~180°)表层盐度、淡水通量、Ekman输运速度异常的低频变化(b)

Fig. 8 Salinity advection and entrainment fractions (a), low frequency variability of surface salinity, freshwater flux and Ekman transport velocity in SPCZ freshening region (5°~10°S, 170°E~180°) (b)

4.2 次表层咸化

已有的研究多聚焦于东南副热带太平洋海区次表层密度面上的盐度异常现象,包括盐度异常的产生,及其沿密度面向西北方向的扩展,研究海区集中在15°~35°S的范围内。本文基于盐度变化特征,着重讨论了STP海区次表层显著持续咸化的动力学因素,以及事件初期由密度补偿造成的混合过程对盐度异常的影响。

咸化海区的盐度变化主要受动力学因素的调控,盐度平流和挟卷在事件期间都起到了重要贡献(图9)。这里计算的是从表层到25.3 σ_θ 等位密面深度积分的平流项和挟卷项。和淡化海区相比,平流和挟卷的量值都较小,但是平流过程仍然是主要贡献者。其中,盐度平流一直处于正贡献,在中后期(2016年12月至2017年4月)的作用尤为显著,说明SAE事件期

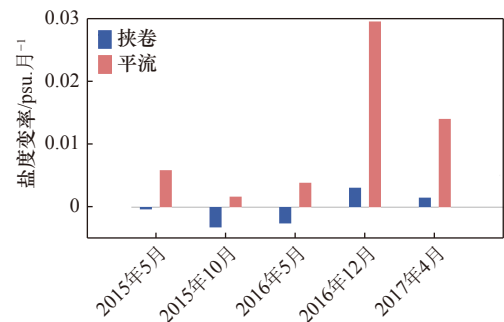


图9 咸化海区(STP)平流和挟卷的动力贡献

Fig. 9 The contribution of salinity advection and entrainment terms to the STP salinification SAE

间,海洋环流调整具有重要的作用。虽然挟卷贡献较小,在SAE前期贡献为负,但后期转为正贡献,可能与此处较弱的密度层结有关。

STP海区冬季海洋表层降温,破坏了夏季的稳定

温度跃层, 混合达到更深的深度。随着上层混合过程的加深, 混合层底出现极大的盐度梯度。以 $25.3\sigma_\theta$ 等位密面附近为例(图 10), 冬季盐度层结强烈且梯度为负, 这种盐度场的垂直结构具有不稳定性, 而此时的温度层结稳定。存在不稳定的盐度垂直结构的海域, 如副热带 SSS 极值区, 由温度造成层结效应会被不稳定的盐度层结所抵消, 这种密度补偿过程会产生对流和垂直混合^[45]。2015 年冬季出现的不稳定的盐度跃层和较为稳定的温度跃层, 有利于发生密度补偿现象, 正是这种跨等密度面混合, 最终造成次表层 $25.3\sigma_\theta$ 等位密面附近的咸化现象。本文利用 Argo 温盐剖面数据计算了特奈角 (T_u), 来研究这一混合强度与层结的关系^[26, 46],

$$T_u = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \partial_z T + \beta \partial_z S}{\alpha \partial_z T - \beta \partial_z S} \right) \\ = \tan^{-1} \left(-2\rho_0 \alpha \frac{\partial T}{\partial \rho} - 1 \right) \quad \alpha = 2.6 \times 10^{-4} \text{C}, \quad (1)$$

式中, α 、 β 分别是热膨胀系数和盐收缩系数; $\partial_z T$ 和 $\partial_z S$ 分别是温度和盐度的垂直梯度; ρ_0 为海水参考密度; ρ 为海水密度。特奈角 T_u 值的大小反映了混合的程度, 当 T_u 在 $\pm 45^\circ$ 之间即 $\partial_z T > 0$, $\partial_z S < 0$ 时, 海水温、盐层结都较为稳定; $T_u > 45^\circ$ 时, 温度层结稳定而盐度梯度不稳定; $T_u > 71.6^\circ$ 时, 密度补偿过程开始活跃^[47]; 而当 T_u 值接近 90° 时, 即发生密度完全补偿作用。

我们捕捉到了 SAE 事件中 STP 海区次表层密度面上咸化特征, 盐度异常在事件初期已较为显著, 而平流和挟卷的动力学贡献主要集中在中后期。图 11 表示 STP 海区次表层 $25.3\sigma_\theta$ 附近等密度面上混合咸

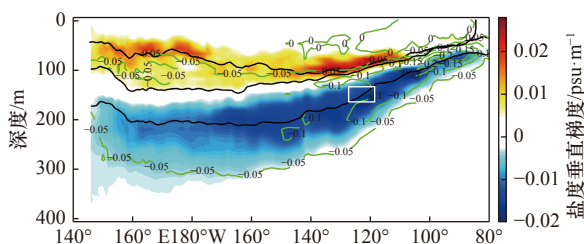


图 10 2015 年 6–8 月 STP 海区盐度垂向梯度

Fig. 10 Salinity vertical gradients in STP from June to August, 2015

黑色等值线分别代表混合层、 $24\sigma_\theta$ 和 $25.3\sigma_\theta$ 等位密面的所在深度; 绿线指示了温度垂向梯度; 若垂向梯度值大于 0, 表示随着深度增加分别对应着盐度增加和温度升高

The black contours indicate the depth of the mix layer, $24\sigma_\theta$ and $25.3\sigma_\theta$ isopycnal. Green contours indicate the temperature vertical gradient. If the vertical gradient > 0 , it means that the salinity and temperature increases with the depth respectively

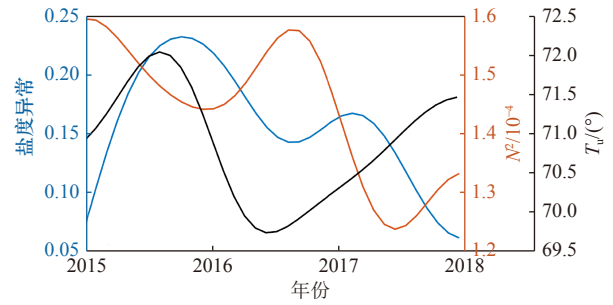


图 11 次表层盐度梯度显著区(如图 10 白色方框所示)的盐度、密度层结(浮力频率 N^2)和特奈角 (T_u) 的变化

Fig. 11 Salinity variability, density stratification (N^2) and Turner angle (T_u) in the marked subsurface box with remarkable salinity gradients shown in Fig. 10

化过程, 结果显示, 次表层盐度变化与跨等密度面混合增盐过程有关, 主要发生在东南太平洋的副热带潜沉区。2015 年冬季(6–8 月)次表层对流混合过程明显增强, 密度层结逐渐减弱, 在次年 1 月达到最小值, 同时 T_u 值从 6 月开始显著增加, 整个冬季至春季均超过 71.6° (图 11), 说明 SAE 初期发生了较强的密度补偿过程。不稳定的盐度梯度, 以及密度层结较弱的情况下发生的跨等密度面混合, 使得盐度在 2015 年冬季 10 月出现最显著的正异常(咸化), 最大超过了 0.2。密度补偿效应主要发生在事件初期, 随后由于密度补偿过程减弱, 密度层结持续减弱, 盐度正异常显著, 加之存在有利于咸化的平流和挟卷过程, 咸化特征得以维持。

5 结果与讨论

本文结合近 14 年的 Argo 盐度数据、海流同化数据和大气风场、蒸发和降水数据, 分析了热带太平洋上层盐度长期趋势, 并探讨了盐度平流和挟卷过程的海洋动力学贡献。结果表明:

(1) 热带太平洋盐度变化趋势存在显著改变, 个别海域甚至出现逆转, 这主要是由于 2015–2017 年期间该海域上层海水发生大范围的盐度异常。

(2) SAE 期间盐度分布具有显著的区域性特征和垂直结构差异。热带太平洋北部海区和南大洋辐合海区淡化, 盐度变幅最大达到 -0.71 和 -0.92 。热带太平洋南部海区咸化, 盐度变幅为 0.46。表层盐度的淡化可深达混合层, 而咸化则主要出现在次表层。两者在 SAE 期间的演变特征也明显不同, NTP 东海岸首先出现低盐异常, 并沿着 $24\sigma_\theta$ 等位密面迅速扩展到整个中部太平洋, 2016 年 5–10 月淡化最为显著, SP-

CZ 海区近表层盐度在 SAE 后期阶段也出现强烈的负异常。STP 海区的咸化则发生在次表层 $25.3\sigma_\theta$ 等位密面附近, 高盐水核心集中在 $100\sim 200\text{ m}$, 沿着等位密面有向西扩展的演变特征, 并可影响到近表层。

(3) 盐度平流和挟卷是与 SAE 密切相关的海洋动力学过程, 是造成热带太平洋显著盐度异常的主要原因。其中盐度平流有主要贡献, 在 NTP 海区具有持续而显著的影响, 在 SPCZ 和 STP 海区则在 SAE 后期较为显著, 这也是海洋环流调整的结果。挟卷过程虽量值较小, 但 SAE 中后期作用有所加强, 也对 SAE 盐度变化有着不可忽视的影响。除此之外, 其他影响淡化与咸化海区盐度变化的因素明显不同, NTP 淡化海

区初期, 在表层淡水通量的影响下, 东边界近表层产生盐度负异常, 并在大尺度风场的作用下进一步发展。STP 咸化海区初期次表层发生密度补偿, 跨等密度面混合作用的影响较大。另外, 海区密度跃层的分布也与盐度垂直结构的变化有着密切关系。

有研究表明, 2014–2016 年连续发生两次厄尔尼诺事件, 其中 2015/2016 年的超强厄尔尼诺事件的爆发, 对热带太平洋表层的淡水异常有着显著的影响^[32]。Qu 等^[48] 分析了赤道太平洋表层盐度分布的年际特征, 并发现次表层高盐水的挟卷也体现出很强的 ENSO 信号。鉴于此, 作者未来将进一步探讨 ENSO 对北太平洋表层低盐异常、南太平洋次表层潜沉密度面上高盐异常有怎样的影响。

参考文献:

- [1] Durack P J. Ocean salinity and the global water cycle[J]. *Oceanography*, 2015, 28(1): 20–31.
- [2] Cravatte S, Delcroix T, Zhang Dongxiao, et al. Observed freshening and warming of the western Pacific Warm Pool[J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33(4): 565–589.
- [3] Maes C. Estimating the influence of salinity on sea level anomaly in the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(19): 3551–3554.
- [4] Antonov J I, Levitus S, Boyer T P. Steric sea level variations during 1957–1994: importance of salinity[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C12): 14–1.
- [5] Bindoff N L, Willebrand J, Artale V, et al. Observations: oceanic climate change and sea level[M]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 385–432.
- [6] Katsura S, Oka E, Qiu Bo, et al. Formation and subduction of North Pacific tropical water and their interannual variability[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(11): 2400–2415.
- [7] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(21): 5686–5699.
- [8] 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.
- [9] Hosoda S, Suga T, Shikama N, et al. Global surface layer salinity change detected by Argo and its implication for hydrological cycle intensification[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(4): 579–586.
- [10] Delcroix T, Cravatte S, McPhaden M J. Decadal variations and trends in tropical Pacific sea surface salinity since 1970[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): C03012.
- [11] Du Yan, Zhang Yuhong, Shi Jiancheng. Relationship between sea surface salinity and ocean circulation and climate change[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(5): 771–782.
- [12] 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.
- [13] Purich A, England M H, Cai Wenju, et al. Impacts of broad-scale surface freshening of the Southern Ocean in a coupled climate model[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(7): 2613–2632.
- [14] Blunden J, Arndt D S. State of the climate in 2015[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(8): Si-S275.
- [15] Boyer T P, Levitus S, Antonov J I, et al. Linear trends in salinity for the World Ocean, 1955–1998[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(1): L01604.
- [16] Durack P J, Wijffels S E, Boyer T P. Long-term salinity changes and implications for the global water cycle[M]//Siedler G, Griffies S M, Gould J, et al. *International Geophysics*. Amsterdam: Academic Press, 2013, 103: 727–757.
- [17] Wong A P S, Bindoff N L, Church J A. Freshwater and heat changes in the North and South Pacific Oceans between the 1960s and 1985–94[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(7): 1613–1633.
- [18] Oka E, Katsura S, Inoue H, et al. Long-term change and variation of salinity in the western North Pacific subtropical gyre revealed by 50-year long observations along 137°E [J]. *Journal of Oceanography*, 2017, 73(4): 479–490.
- [19] Du Yan, Zhang Yuhong, Feng Ming, et al. Decadal trends of the upper ocean salinity in the tropical Indo-Pacific since mid-1990s[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16050.

- [20] Yan Youfang, Svendsen L, Wang Chunzai, et al. A north-south contrast of subsurface salinity anomalies in the northwestern Pacific from 2002 to 2013[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(3): 1795–1806.
- [21] Delcroix T, Hénin C. Seasonal and interannual variations of sea surface salinity in the tropical Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1991, 96(C12): 22135–22150.
- [22] Johnson E S, Lagerloef G S E, Gunn J T, et al. Surface salinity advection in the tropical oceans compared with atmospheric freshwater forcing: a trial balance[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C12): SRF 15–1–SRF 15–11.
- [23] Vialard J, Delecluse P, Menkes C. A modeling study of salinity variability and its effects in the tropical Pacific Ocean during the 1993–1999 period[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C12): SRF 6–1–SRF 6–14.
- [24] Bindoff N L, McDougall T J. Diagnosing climate change and ocean ventilation using hydrographic data[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24(6): 1137–1152.
- [25] Nonaka M, Sasaki H. Formation mechanism for isopycnal temperature-salinity anomalies propagating from the eastern South Pacific to the equatorial region[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(7): 1305–1315.
- [26] Yeager S G, Large W G. Observational evidence of winter spice injection[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(12): 2895–2919.
- [27] Cronin M F, McPhaden M J. Upper ocean salinity balance in the western equatorial Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C12): 27567–27587.
- [28] Foltz G R, Grodsky S A, Carton J A, et al. Seasonal salt budget of the northwestern tropical Atlantic Ocean along 38°W[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C3): C03052.
- [29] Dong Shenfu, 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.
- [30] Gao Shan, Qu Tangdong, Nie Xunwei. Mixed layer salinity budget in the tropical Pacific Ocean estimated by a global GCM[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(12): 8255–8270.
- [31] Chi Jingshan, Du Yan, Zhang Yuhong, et al. A new perspective of the 2014/15 failed El Niño as seen from ocean salinity[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 2720.
- [32] Gasparin F, Roemmich D. The strong freshwater anomaly during the onset of the 2015/2016 El Niño[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(12): 6452–6460.
- [33] Roemmich D, Gilson J. The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program[J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 82(2): 81–100.
- [34] Behringer D, Xue Yan. Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: the Pacific Ocean[C]//Proceedings of the Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface. Seattle, Washington: AMS, 2004.
- [35] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553–597.
- [36] Yu Lisan, Weller R A. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(4): 527–540.
- [37] Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(1): 5–20.
- [38] 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.
- [39] Wong A P S, Johnson G C. South Pacific eastern subtropical mode water[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(7): 1493–1509.
- [40] Qu Tangdong, Gao Shan. Resurfacing of South Pacific tropical water in the Equatorial Pacific and its variability associated with ENSO[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(5): 1095–1106.
- [41] Huang Ruixin, Qiu Bo. The structure of the wind-driven circulation in the subtropical South Pacific Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(6): 1173–1186.
- [42] Stevenson J W, Niiler P P. Upper ocean heat budget during the Hawaii-to-Tahiti shuttle experiment[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1983, 13(10): 1894–1907.
- [43] 安玉柱, 张韧, 王辉赞, 等. 全球大洋混合层深度的计算及其时空变化特征分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(7): 2249–2258.
- An Yuzhu, Zhang Ren, Wang Huizan, et al. Study on calculation and spatio-temporal variations of global ocean mixed layer depth[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(7): 2249–2258.
- [44] Ren Li, Riser S C. Seasonal salt budget in the northeast Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C12): C12004.
- [45] Kolodziejczyk N, Gaillard F. Observation of spiciness interannual variability in the Pacific pycnocline[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C12): C12018.
- [46] Ruddick B. A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity[J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1983, 30(10): 1105–1107.

- [47] Johnson G C. Generation and initial evolution of a mode water θ - S anomaly[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(4): 739–751.
- [48] Qu T, Song Y T, Maes C. Sea surface salinity and barrier layer variability in the equatorial Pacific as seen from Aquarius and Argo[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(1): 15–29.

The robust salinity anomaly event during 2015–2017 in the tropical Pacific Ocean

Shi Huangyuan¹, Du Ling¹, Xu Daohuan¹

(1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract: Salinity linear trends and their contributed dynamics processes in the tropical Pacific Ocean were investigated with the Argo salinity and temperature fields, current assimilations and atmospheric reanalysis datasets. The robust salinity anomaly event (SAE) occurred in the tropical Pacific Ocean during 2015–2017, which resulted possibly in the reversing of Argo salinity long-term trends. Such SAE was characterized as distinct regional discrepancies and vertical structures. Significant surface freshening occurred in the northern tropical Pacific (NTP) and Southern Ocean Convergence Zone (SPCZ), whose remarkable freshening maximum could reach 0.71–0.92 and covered the upper mixed layer. Another subsurface salinification in the southern tropical Pacific (STP) with the maximum of 0.46 was found around thermocline layer. Moreover, the salinity anomalies in SAE can expand from west to east along the isopycnal layers. Salinity advection and entrainment were exhibited as the fundamental dynamic processes to the SAE event in the tropical Pacific Ocean, while advection term acted as the major contribution to salinity variability. Both of the dynamic factors played important role on SAE features during the whole event in the NTP and later period in the SPCZ and STP. The surface freshwater flux and subsurface mixing induce by density compensation were also supplements to the SAE events in the NTP freshening and STP salinification respectively.

Key words: salinity anomaly event; advection and entrainment; density stratification; tropical Pacific Ocean