

近二十年南海表层海水的盐度淡化及其机制*

傅圆圆^{1,2}, 程旭华¹, 张玉红¹, 严幼芳¹, 杜岩¹

1. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 南海北部航次观测资料显示南海北部表层盐度在 2004—2012 年期间缓慢降低, 2012 年盐度达到最低。客观分析数据 EN4(the UK Met Office EN.4.0.2 objective analyses)以及 OFES(ocean general circulation model for the Earth Simulator)模式结果都显示南海表层海水盐度在 1993—2014 年有淡化趋势, 最显著区域位于吕宋岛以西和南海南部。盐度收支分析表明淡水强迫在吕宋岛以西海域起主要贡献, 而水平平流输运主导南海西部的表层盐度变化。吕宋岛以西表层盐度的降低与近年来沃克环流加强引起的夏季强降雨增加有关。

关键词: 南海; 表层盐度; 淡化; 降雨; 水平平流; 海气相互作用

中图分类号: P731.12 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2017)04-0018-07

The freshening trend of surface salinity in the South China Sea in recent two decades and its mechanism

FU Yuanyuan^{1,2}, CHENG Xuhua¹, ZHANG Yuhong¹, YAN Youfang¹, DU Yan¹

1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science), Guangzhou 510301, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In situ hydrographic data of sea surface salinity (SSS) revealed a freshening trend in the northern South China Sea (SCS) during 2004—2012, which was the freshest in 2012. Such freshening was also found in the UK Met Office EN4 objective analysis product and the ocean general circulation model for the Earth Simulator (OFES) output during 1993-2014, particularly west of Luzon Island and in the southeastern SCS. The salinity budget analysis in the upper layer indicated that the fresh water forcing and horizontal salinity advection contributed to the trends of SSS west of Luzon Island and in the western SCS, respectively. The excessive precipitation in summer accounted for the decrease of SSS to a great extent west of Luzon Island, which was associated with the strengthening trend of the Walker Circulation.

Key words: South China Sea; sea surface salinity variability; freshening; precipitation; horizontal salinity advection; air-sea interaction

海洋盐度是海洋学的物理参数之一, 其变化可以影响全球气候变化(Held et al, 2006; IPCC, 2007; Ren et al, 2010; Katsura et al, 2013)。盐度变化主要是以改变海洋层结, 影响海洋环流和热量输送, 进而

收稿日期: 2016-10-19; 修订日期: 2017-01-02。林强编辑

基金项目: 国家自然科学基金(41522601、41230962、41276025、41506019); 热带海洋环境国家重点实验室自主项目(LTOZZ1501); 广州市珠江科技新星项目(201506010036)

作者简介: 傅圆圆(1990—), 女, 山东省潍坊市人, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: yuanf@scsio.ac.cn

通信作者: 程旭华(1980—)男, 江西省吉安市人, 研究员, 主要从事海洋动力学研究。E-mail: xuhuacheng@scsio.ac.cn

*致谢: 感谢 2004—2012 年度中国科学院南海海洋研究所‘实验 1 号’和‘实验 3 号’科考船南海北部航次的全体科考人员和船员。

Received date: 2016-10-19; Revised date: 2017-01-02. Editor: LIN Qiang

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41522601, 41230962, 41276025, 41506019); The Open Project Program of State Key Laboratory of Tropical Oceanography (LTOZZ1501); The Pear River S&T Nova Program of Guangzhou (201506010036);

Corresponding author: CHENG Xuhua. E-mail: xuhuacheng@scsio.ac.cn

由降水、蒸发、径流和冰冻结及融化引起的, 热带海域海洋表层盐度变化能够反映大尺度蒸发降水的变化(Delcroix et al, 1991)。海洋盐度变化不仅在水循环中起到重要的作用, 也是影响水循环过程的重要指标(Lagerloef et al, 2002)。长时间尺度的盐度变化还可以反映气候和水循环的变化(Williams et al, 2007)。研究盐度的变化规律有助于了解海洋环流、全球水循环以及海—气相互作用。

南海是西太平洋最大的边缘海, 受季风、地形、太阳辐射、降雨和黑潮入侵等影响, 南海环流呈现多时空尺度变化特征。盐度是南海重要的动力环境要素之一, 其变化对南海的水动力环境有重要影响, 而水动力环境变化进一步影响了南海的环流。

近年来, 随着观测数据的增加以及卫星遥感技术的发展, 对南海盐度的研究逐渐展开。郭敬等(2013)基于世界海洋数据库(World Ocean Database 2005, WOD05)盐度数据分析发现南海混合层盐度季节变化的主要影响因素是降雨和水平平流。Yan 等(2015)利用 ROMS 模式数据和卫星数据发现夏季吕宋岛以西表层存在低盐水, 这种低盐水与地形效应引起的强降雨有关。Nan 等(2013)基于卫星和观测数据发现, 在 1993—2010 年期间黑潮入侵有减弱趋势, 使南海东北部上层 750m 盐度呈淡化趋势。通过分析 2004—2012 年期间南海北部开放航次数据, 王静等(2015)发现南海 18°N 断面上层盐度在此期间呈淡化趋势, 并存在显著的年际变化。同时, 卫星数据观测显示南海上层 100m 的盐度在 2012 年明显低于 2011 年, 这与局地淡水通量的增加和黑潮入侵的减弱有关(Zeng et al, 2014)。盐度的变化受到环流的影响, 同时盐度的变化也会影响环流, 例如盐度变化所引起的海面动力高度的改变对南海贯穿流有重要的影响(Qu et al, 2006)。除了黑潮入侵减弱以及淡水输入的影响, 南部苏禄高盐水入侵也会影响南海盐度的变化(李磊等, 2002)。

前人研究揭示了南海盐度的季节变化特征及其机理, 指出淡水强迫和海洋平流作用是盐度变化的主要原因。受盐度观测资料缺乏的限制, 关于南海表层盐度的长期变化的研究甚少, 其变化机制也有待进一步研究。航次观测资料和客观分析资料的日益丰富使研究盐度的长时间变化成为可能, 而高时空分辨率海洋数值模式为探讨盐度变化动力机制提供了有力的工具。本文重点研究 1993—2014 年期间南海表层盐度(表层 50m 盐度的平均值)

变化趋势及其机制, 发现南海表层盐度有淡化的趋势, 而且淡化趋势最明显的区域位于吕宋岛以西和南海东南部, 淡水增加是南海海水淡化的主要原因。研究结果提高了对南海环流和海—气相互作用的认识, 并有助于回答边缘海如何响应全球变化这一科学问题。

1 数据和方法

1.1 数据来源

中国科学院南海海洋研究所自 2004 年起实施南海北部开放航次, 持续观测 8、9 月份南海北部的海洋状况, 本文分析了 2004—2012 年期间 CTD 观测到的盐度观测数据。

本文还采用了 Met office 的 EN4 和 Ishii 客观分析盐度数据。EN4(Good et al, 2013)融合了世界海洋数据库(World Ocean Database 2009, WOD09)、全球温度和盐度剖面计划(Global Temperature and Salinity Profile Programme, GTSP)、地转海洋学实时观测序列(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)的盐度廓线数据, 该数据主要包括了 1900—2014 年全球海洋温盐月平均资料, 水平分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。Ishii(Ishii et al, 2006)数据分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 近几年的盐度融合了 Argo 数据。本文采用 World Ocean Atlas 2013 version 2 (WOA13)气候态月平均的盐度数据, 水平分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

为了分析南海表层盐度的变化机制, 本文还采用海洋模式 OGCM for the Earth Simulator (OFES)模式的盐度、海流等输出产品。该数据为日本地球模拟器模拟计算得到的长时间具有中尺度分辨率的高精度海洋模式数据。模式的计算区域为 75°S — 75°N 。模式的计算区域为除北极海域外的全球区域。模式的水平空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 垂直方向上分为 54 层, 每层的厚度参考真实海洋的温跃层厚度, 随深度增加而逐渐变大, 温盐资料初始场采用 World Ocean Atlas 1998(WOA 98)的结果。

降水资料采用美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)1993—2014 年的降雨资料, 本文使用逐月资料, 水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 本文插值到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的经纬度网格上。蒸发数据是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的逐日蒸发数据, 水平分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。本文所有分析的数据来源见表 1。

表 1 盐度变化和机制分析所用数据

Tab. 1 Data used for the analysis of salinity trend and its mechanism

序号	资料	水平分辨率	变量
1	南海北部航次资料		盐度
2	EN4 客观分析资料	1°×1°	盐度
3	Ishii 资料	1°×1°	盐度
4	OFES 资料	0.1°×0.1°	盐度、流速
5	GPCP 资料	2.5°×2.5°	降雨量
6	ECMWF 资料	1°×1°	蒸发
7	WOA13 资料	1°×1°	盐度

1.2 研究方法

混合层盐度控制方程如下所示(Delcroix et al, 1991; Ren et al, 2009):

$$\frac{\partial S}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} \right) - \frac{S_0(P-E)}{h} - w_e \frac{S - S_h}{h}$$

式中 S 代表混合层平均盐度, t 代表时间变化, u 、 v 为水平平流的纬向和经向分量, h 为混合层的深度, S_0 为表层盐度, S_h 为混合层底的盐度, w_e 为混合层的垂向速度, E 为蒸发量, P 为降水量。等号右边的分别为水平平流项、淡水强迫项、垂直夹卷项。本文关注的重点区域为非上升流区域, 垂向夹卷项较其余两项至少小一个量级, 因此本文将重点研究淡水强迫项和盐度水平平流项对混合层盐度的影响。

本文还采用了非参数检验方法(Mann-Kendall)来检测南海表层盐度长期变化趋势, 该方法通常用于检验趋势的显著性, 广泛用于水文趋势检验的研究(Khaled, 2008)。

2 南海表层盐度的淡化趋势与机制分析

2.1 基于南海北部航次观测和 EN4 盐度资料的分析

南海北部航次资料显示在 2004—2012 年期间, 南海北部夏末秋初的表层(0~50m)盐度有明显的淡化趋势, 盐度淡化率为 $0.1 \text{psu} \cdot \text{y}^{-1}$ 。同时, WOA13 数据中的南海北部夏末秋初的表层盐度偏低(图 1), 这与夏末秋初强降雨有关。2012 年开放航次期间, 受到台风“启德”带来的强降雨影响, 表层盐度淡化明显, 达到最小值(图 2)。本文分析了 EN4 和 Ishii 盐度资料中与航次站点覆盖的对应区域表层盐度, 发现南海北部表层盐度在 2004—2012 年期间呈淡化趋势, 其中 EN4 更加接近于观测, 因此本文将用 EN4 数据研究南海表层盐度的长时间尺度变化。

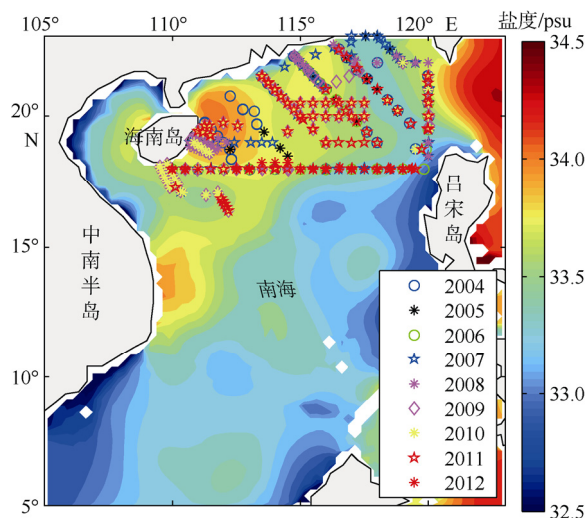


图 1 2004—2012 年南海北部开放航次温盐站点位置(散点)和 WOA13 资料 8、9 月份表层(0~50m)盐度平均值的空间分布(填色)

Fig. 1 Stations of conductivity-temperature-depth (CTD) during the open cruises in the northern South China Sea of 2004–2012 (symbols) and the spatial distribution of the averaged SSS during August and September in the SCS (South China Sea) from the WOA13 data (shading)

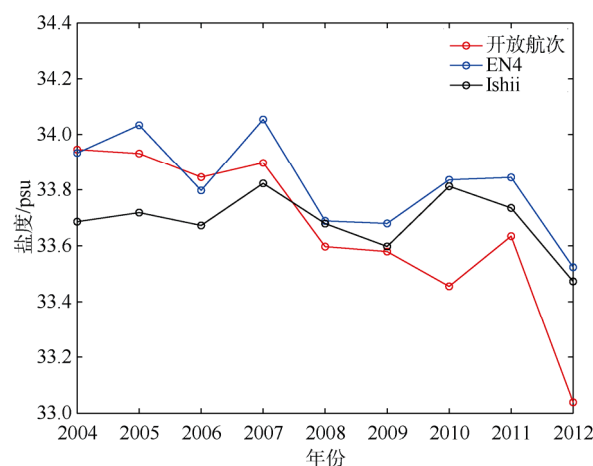


图 2 南海北部开放航次、客观分析数据 EN4 和 Ishii 数据的表层盐度时间序列

Fig. 2 Time series of SSS in the northern SCS based on the open cruises data, the Objectively Analysis EN4 data and the Ishii data

EN4 数据显示南海海盆平均的表层盐度在 1993—2014 年期间呈淡化趋势, 其淡化率为 $0.33 \text{psu} \cdot (22\text{y})^{-1}$, 2012 年秋冬季盐度达到最低值(图 3)。除长期趋势外, 南海表层盐度同时存在显著的年际和年代际变化特征。年代际变化最为显著, 分别在 1993—2002 年和 2004—2012 年期间出现两次显著的淡化现象, 其中第二次淡化过程与航次观测到的南海北部淡化过程相吻合, 反映南海表层盐度存在显著的年代际变化特征。此外, 显著的年际变化叠加在年代际信号之上,

例如 1996、1997、2000、2001、2009、2012 年夏秋季呈现显著盐度负异常,而在 2004—2007 年以及 2010 年呈现显著盐度正异常(图 3)。

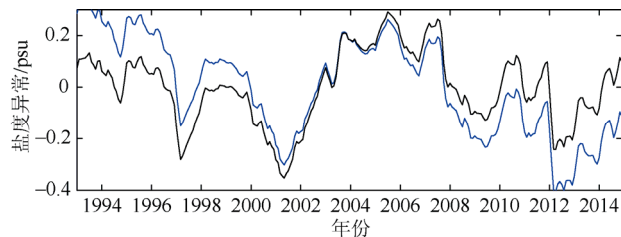


图 3 基于 EN4 数据 1993—2014 年期间南海海盆(5°—23°N, 110°—121°E)平均的海表盐度时间序列(蓝色实线)及去趋势后的海表盐度时间序列(黑色实线)

Fig. 3 Time series of basin-averaged SSS anomalies from 1993 to 2014 in the SCS (blue). The black curve is the basin-averaged SSS anomalies with trend removed

2.2 南海表层盐度变化趋势的空间分布

EN4 资料分析结果显示南海表层盐度在 1993—2014 年期间的变化趋势具有显著的区域差异性。表层盐度淡化最显著的区域位于吕宋岛以北海域以及南海南部,最大淡化率高达 $0.6\text{psu}\cdot(22\text{y})^{-1}$,并通过了 99% 的显著性检验。与深水海盆的盐度淡化相反,在西边界陆架区海表盐度呈较弱的增加趋势(图 4)。

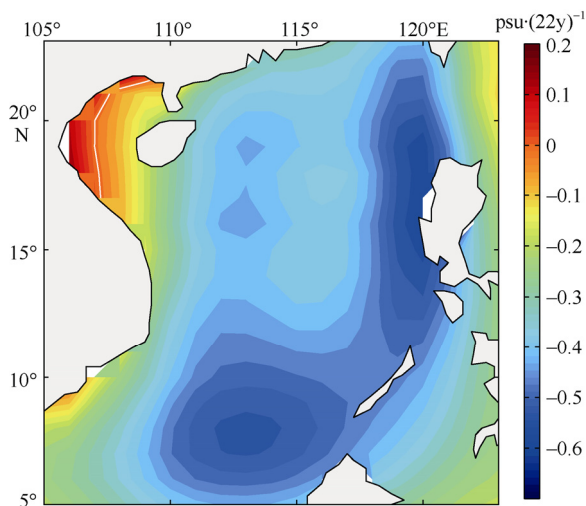


图 4 基于 EN4 数据的南海表层盐度在 1993—2014 年期间的变化趋势

Fig. 4 Linear trends of SSS during 1993–2014 in the SCS derived from the EN4 data

OFES 模式中的表层盐度变化趋势与 EN4 的结果类似,在吕宋岛以西和南海中南部表层盐度有显著的淡化趋势,淡化率最大达到 $0.3\text{psu}\cdot(22\text{y})^{-1}$,约为 EN4 的一半(图 5)。与东部盐度呈现淡化趋势不同,南海西部水体盐度有增加趋势。西部表层盐度

增加的区域与西边界流流经区域相一致,这可能与南海西部环流变化有关。OFES 模式结果在吕宋海峡以西以及北部沿岸区域与 EN4 的表层盐度长期趋势相反;OFES 模式中,南海西北部的表层盐度结果不可信。利用非参数检验方法检验了南海表层盐度长期趋势,结果显示 OFES 模式数据中,吕宋岛以西的表层盐度长期趋势通过了 99% 的显著性检验。

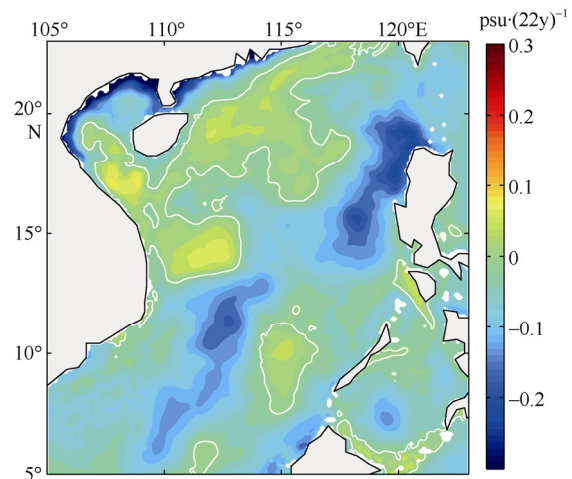


图 5 基于 OFES 模式的南海表层盐度在 1993—2014 年期间的变化趋势

Fig. 5 Linear trends of SSS during 1993–2014 in the SCS derived from the OFES output

前人主要关注黑潮入侵减弱对北部(吕宋海峡以西)盐度的影响,近年来黑潮入侵减弱(Nan et al, 2013)和降雨(Zeng et al, 2014)都对南海盐度的淡化做出了贡献。南海表层盐度变化趋势的空间差异性是如何产生的,淡水通量和水平平流在南海盐度变化中谁占主导,都有待进一步研究。

3 南海表层淡化的机制分析

混合层盐度的变化受到水平平流、淡水强迫以及垂直对流的影响。由于淡盖效应,垂向平流对南海表层盐度的变化影响很小,因此本文忽略垂向对流对表层盐度的影响,并根据盐度控制方程分析水平平流及其纬向和经向分量、淡水强迫对表层盐度长期变化趋势的贡献。

3.1 盐度水平平流对表层盐度变化的贡献

OFES 模式中表层盐度水平平流在 1993—2014 年的变化趋势的空间分布如图 6 所示,水平平流对盐度的贡献较大的区域位于南海的西部和南部,吕宋岛以西平流作用不显著。近年来南海冬季季风减弱,而夏季季风增强(Yang et al, 2012),南海环流相应发生变化,进而影响到盐度的水平输送。南海西

部沿岸和南部区域水平平流对表层盐度变化起主导作用。在 13°N 越南以东, 东向急流增强, 东向流将高盐水向东输运东至 115°E , 进而使该区域表层盐度呈增加趋势 (图 6、图 7a)。在南海西部沿岸, 南海表层盐度有弱的增加趋势, 这种增加的趋势与盐度经向平流有关 (图 7b)。总体来讲, 盐度纬向平流的作用大于经向平流。在南海西南部, 盐度明显淡化与此处反气旋环流有关。模式中的盐度水平平流不能解释吕宋岛以西表层海水的淡化趋势, 说明淡水强迫可能起到主要的作用。

3.2 淡水强迫对吕宋岛以西表层盐度的影响

基于 ECMWF 数据和 GPCP 数据的淡水强迫项在 1993—2014 年期间的趋势如图 8a 所示, 除了海南和广东沿岸, 南海大部分区域的淡水是增加的, 淡水强迫趋势最明显的区域位于南海东南部和吕宋岛以西, 这与 EN4 数据中南海东南部和吕宋岛以西海表盐度(sea surface salinity, SSS)明显淡化一致, 说明上述两区域的 SSS 明显淡化与近年来降雨增加有关。淡水强迫使南海深水海盆表层盐度淡化, 而使广东沿岸海水盐度增加 (图 4)。同时, 在 OFES 结

果中, 由于模式数据的缺陷, 盐度通量项包括了淡水强迫项和盐度恢复项, 结果显示盐度通量项的长期趋势是基于实测的淡水强迫项的五分之一, 南海南部的表层盐度以及吕宋岛以西的表层盐度淡化与盐

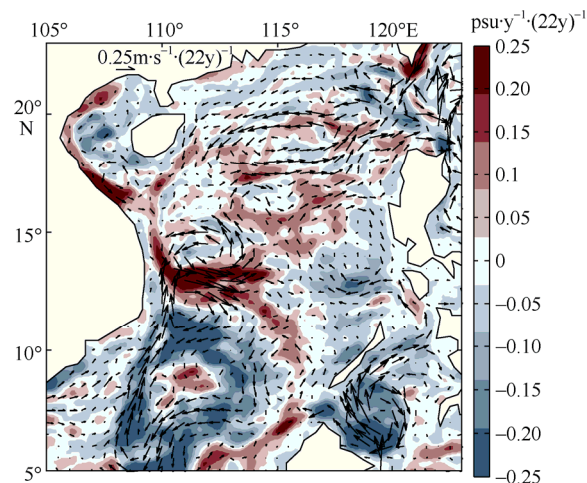


图 6 基于 OFES 数据南海表层盐度水平平流(填色)和海流(箭头)在 1993—2014 年的趋势

Fig. 6 Linear trends of surface salinity advection (shading) and surface current (vector) during 1993–2014 in the SCS

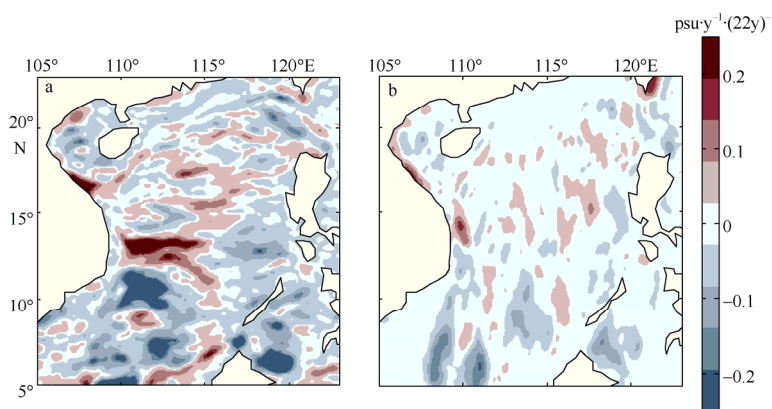


图 7 南海纬向(a)和经向(b)盐度平流在 1993—2014 年的趋势

Fig. 7 Linear trends of surface (a) zonal and (b) meridional salinity advective during 1993–2014 in the SCS

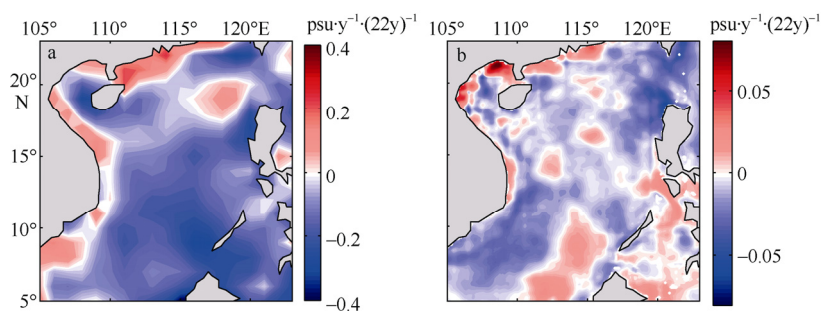


图 8 基于 GPCP 和 ECWMF 的淡水强迫(a)和 OFES 的盐度通量(b)在 1993—2014 年的趋势

Fig. 8 Linear trends of fresh water forcing derived from GPCP and ECWMF datasets (a) and surface salinity flux derived from the OFES output (b) during 1993–2014 in the SCS

度通量趋势(图 8b)的位置相同, 也进一步说明了南海南部表层盐度的长期变化受到淡水强迫的影响。吕宋岛以西的淡水强迫导致表层盐度与图 4 相比淡化偏弱, 这可能与南海降雨与蒸发的季节差异性有关。

图 4 和图 5 中吕宋岛以西在 1993—2014 年期间有明显的淡化趋势, 这可能与夏季强降雨有关。夏季西南季风在吕宋岛以西受到地形效应的影响, 在此处产生强降雨, 吕宋岛以西出现表层低盐水(Xu et al, 2008; Yan et al, 2015)。南海夏季降雨在 1993—2014 年期间的趋势如图 9f 所示, 吕宋岛以西的夏季降雨在 1993—2014 年期间明显增加, 与图 9b 对应的吕

宋岛以西的表层盐度在夏季有明显的淡化趋势; 而其他季节的降雨增加的位置位于南海南部(如图 9e、g、h), 与之对应的盐度淡化的中心位于南海西部与南部。夏季吕宋岛以西的降雨占全年的比例达到 55%, 说明吕宋岛以西的夏季强降雨在全年的淡水强迫项中占主导, 因此吕宋岛以西的表层盐度淡化可以用夏季降雨趋势增加来解释。近年来沃克环流加强使南海东部与东南印度洋降雨增加(Du et al, 2015), 吕宋岛以西和南海东南部的表层盐度明显淡化与沃克环流加强有关, 反映了大气强迫对南海表层盐度的影响。

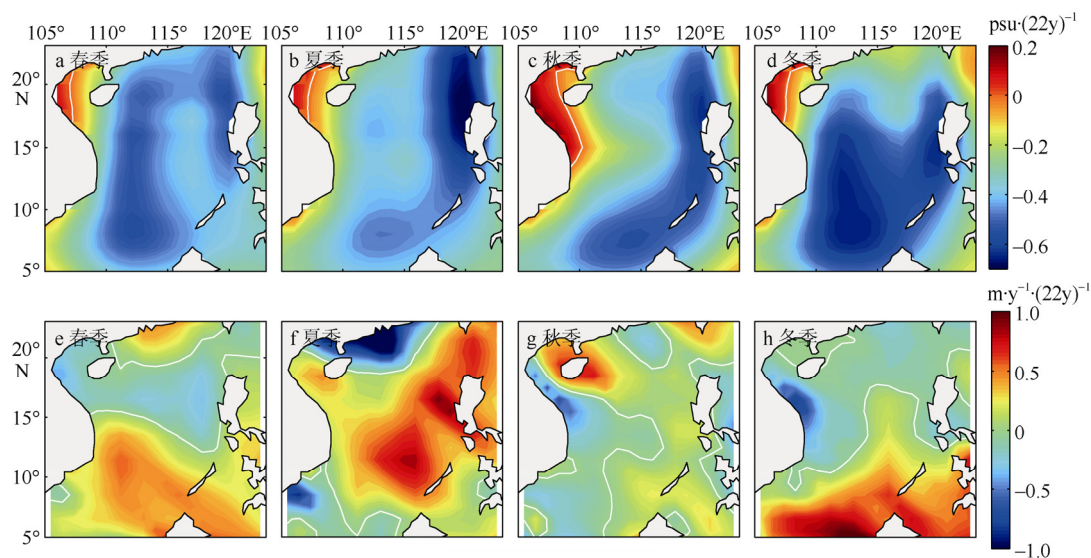


图 9 基于 EN4 数据的春季—冬季的南海表层盐度在 1993—2014 年期间的变化趋势(a—d)和基于 GPCP 数据的春季—冬季南海降雨在 1993—2014 年期间的变化趋势(e—f)

白色等值线是趋势的零值线

Fig. 9 Linear trends of spring–winter SSS during 1993–2014 in the SCS derived from the EN4 data (a–d) and linear trends of spring–winter precipitation forcing during 1993–2014 in the SCS derived from GPCP (e–f)

4 结论

本文利用航测、客观分析数据 EN4 资料以及模式 OFES 结果分析了南海表层盐度的淡化趋势, 探讨了水平平流以及淡水强迫对南海表层盐度的影响, 得出如下主要结论。

1) 航测资料、Ishii 以及 EN4 均显示南海北部表层盐度在 2004—2012 年存在淡化趋势, 其中 2012 年盐度最低, EN4 数据更加接近航次观测结果。

2) EN4 客观分析数据和 OFES 数据都显示南海

表层盐度在 1993—2014 年淡化, 而淡化最明显的区域位于吕宋岛以西以及南海东南部。

3) 利用盐度控制方程探讨了南海表层盐度的变化机制, 南海西部表层盐度增加受到水平平流的影响, 纬向平流作用占主导; 在吕宋岛以西和南海东南部, 表层盐度的淡化受到水平平流和淡水强迫的共同影响, 淡水强迫(其中吕宋岛以西淡化主要是夏季降雨增加)占主导; 南海近年来淡水通量的增加受到加强的沃克环流的调制。从长期来看, 受降雨的影响, 低盐区域呈现淡化趋势。

参考文献 References

郭敬, 陈显尧, 张远凌, 2013. 影响南海混合层盐度季节变化的

因素分析[J]. 海洋科学进展, 31(2): 180–187. GUO JING,

- CHEN XIANYAO, ZHANG YUANLING, 2013. Factors influencing the seasonal variations of mixed layer salinity in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 31(2): 180–187 (in Chinese with English abstract).
- 王静, 赵飞达, 齐义泉, 2015. 夏末秋初南海 18°N 断面混合层结构特征分析[J]. *海洋通报*, 34(1): 52–58.
- WANG JING, ZHAO FEIDA, QI YIQUAN, 2015. Characteristics of mixed layer cross section 18°N in the South China Sea during late summer and early autumn[J]. *Marine Science Bulletin*, 34(1): 52–58 (in Chinese with English abstract).
- 李磊, 李凤岐, 苏洁, 许建平, 2002. 1998 年南海夏冬季南海水团分析[J]. *海洋与湖沼*, 33(4): 393–401.
- LI LEI, LI FENGQI, SU JIE, XU JIANPING, 2002. Analysis on water masses in the South China Sea in summer and winter of 1998[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33(4): 393–401 (in Chinese with English abstract).
- DELCROIX T, HÉNIN C, 1991. Seasonal and interannual variations of sea surface salinity in the tropical Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(C12): 22135–22150.
- DU YAN, ZHANG YUHONG, FENG MING, et al, 2015. Decadal trends of the upper ocean salinity in the tropical Indo-Pacific since mid-1990s[J]. *Scientific Reports*, 5: 16050.
- GOOD S A, MARTIN M J, RAYNER N A, 2013. EN4: quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(12): 6704–6716.
- HELD I M, SODEN B J, 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J]. *Journal of Climate*, 19(12): 5686–5699.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press: 1–996.
- ISHII M, KIMOTO M, SAKAMOTO K, et al, 2006. Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses[J]. *Journal of Oceanography*, 62(2): 155–170.
- KATSURA S, OKA E, QIU BO, et al, 2013. Formation and subduction of North Pacific tropical water and their interannual variability[J]. *Journal Physical Oceanography*, 43(11): 2400–2415.
- KHALED H H, 2008. Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. *Journal of Hydrology*, 349(3–4): 350–363.
- LAGERLOEF G S E, 2002. Introduction to the special section: The role of surface salinity on upper ocean dynamics, air-sea interaction and climate[J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(C12): 8000.
- NAN FENG, XUE HUIJIE, CHAI FEI, et al, 2013. Weakening of the Kuroshio Intrusion into the South China Sea over the past two decades[J]. *Journal of Climate*, 26(20): 8097–8110.
- QU TANGDONG, DU YAN, SASAKI H, 2006. South China Sea throughflow: A heat and freshwater conveyor[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(23): L23617.
- REN LI, RISER S C, 2009. Seasonal salt budget in the northeast Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114(12): C12004.
- REN LI, RISER S C, 2010. Observations of decadal time scale salinity changes in the subtropical thermocline of the North Pacific Ocean[J]. *Deep Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(13–14): 1161–1170.
- WILLIAMS P D, GUILYARDI E, SUTTON R, et al, 2007. A new feedback on climate change from the hydrological cycle[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(8): L08706.
- XU HAIMING, XIE SHANG-PING, WANG YUQING, et al, 2008. Orographic effects on South China Sea summer climate[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100(1–4): 275–289.
- YANG JIAYAN, LIN XIAOPEI, WU DEXING, 2012. On the dynamics of the seasonal variation in the South China Sea throughflow transport[J]. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 118: 6854–6866.
- YAN YUNWEI, WANG GUIHUA, WANG CHUNZAI, et al, 2015. Low-salinity water off West Luzon Island in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 120(4): 3011–3021.
- ZENG LILI, LIU T W, XUE HUIJIE, et al, 2014. Freshening in the South China Sea during 2012 revealed by Aquarius and in situ data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12): 8296–8314.