中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 5 期: 765 ~ 777
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

进 展

海洋表面盐度与海洋环流和气候变化的关系

杜岩[1,2*], 张玉红[1], 施建成[3]

1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101
* E-mail: duyan@scsio.ac.cns

收稿日期: 2018-04-05; 收修改稿日期: 2018-06-26; 接受日期: 2018-09-25; 网络版发表日期: 2018-12-07
中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA19060501)、国家海洋局"全球变化与海气相互作用"专项项目(编号: GASI-IPOV AI-02)和国家自然科学基金项目(批准号: 41525019、41506019、41830538)资助

摘要 依据Argo的海洋盐度观测及降水、蒸发、海面高度等数据分析了全球海洋表层盐度的平均态和低频变化特征及其与海洋环流和气候变化的关系, 并结合前人成果对海洋盐度的研究进行了回顾和展望. 蒸发减降水在最低阶上决定了海洋表层盐度的分布, 海洋环流动力过程在大部分海域调整了海洋表层盐度的空间结构, 并影响了海洋表层盐度的低频变率. 全球变暖的情况下, 海洋表层盐度表现为盐度高的地方会变得更高、盐度低的地方会变得更低, 表征为整个水循环系统的加强. 在最近20年全球变暖停滞期, 海表盐度变化与全球变暖的趋势不同, 更多地体现了对气候系统的年代际及多年代际振荡的响应, 此阶段对应着Walker环流加强; 西太平洋和东南印度洋海表盐度的反向变化揭示了跨海盆尺度海洋动力过程的重要性, 海洋Rossby波和印尼贯穿流的共同作用使得东南印度洋海表盐度显著降低; 在东南太平洋和北大西洋更多地体现了全球变暖下的海表盐度单调升高或降低的响应. 期待未来的盐度卫星能够提供更高时空分辨率的盐度数据, 这将和Argo观测一起, 拓展我们在中尺度动力学、区域海洋学以及气候变化等方面的认知.

关键词 海表盐度, 海洋环流, 气候变化, 多尺度耦合

1 引言

海洋的多尺度过程, 包括从微小尺度——米、分钟级别到全球尺度——千年、万公里级别的各种过程, 决定了海洋乃至地球气候系统的复杂性. 全球水循环是其中重要的过程之一, 在这个过程中, 陆地降雨占据22%, 陆地蒸发却只占14%, 意味其中8%是来自于陆地和海洋的水交换(Durack, 2015): 有40单位(1单位=1000km^3)的水从海洋通过蒸发-大气环流-降水直接输送到陆地(Trenberth等, 2007), 大约占陆地降水的35%、海洋降水的11%左右. 因此, 关于水循环系统的研究必须从海、陆、气一体的角度来考虑.

海水盐度是水循环系统一个非常重要的指示因子. 过去几十年, 前人对于气候系统的研究基本都是从热力学的角度来衡量, 例如通过海面温度指示气候系统的变化; 最近十几年, 借助新的观测手段才开始深

中文引用格式: 杜岩, 张玉红, 施建成. 2019. 海洋表面盐度与海洋环流和气候变化的关系. 中国科学: 地球科学, 49: 765–777, doi: 10.1360/N072018-00103
英文引用格式: Du Y, Zhang Y H, Shi J C. 2019. Relationship between sea surface salinity and ocean circulation and climate change. Science China Earth Sciences, 62: 771–782, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9276-6

© 2018 《中国科学》杂志社

入到动力学的角度, 例如通过卫星海面高度的观测来反演得到海表流场等. 但是由于盐度的观测相对困难, 观测手段单一, 导致观测资料缺乏, 关于淡水/盐度在气候系统中的作用的研究进展相对缓慢和滞后. 2000年左右发起的地转海洋学实时观测阵列(Argo)计划以及2009年土壤湿度和海水盐度(SMOS)卫星和2011年水瓶座(Aquarius)卫星的发射, 才使得海洋学家有机会深入探究全球盐度的变化及其与气候系统的关系(Lagerloef等, 2012). 从盐度的角度来看, 气候系统内部的相互作用有很多新的信息. 本文主要应用Argo盐度数据结合相关大气海洋参量, 对海洋表面盐度的变率及其与气候变化的关系做了分析和梳理, 并结合前人的工作进行了简单的回顾和展望.

2 资料

本文采用日本海洋-地球科技研究所(Japan Agency for Marine-earth Science and Technology, JAMSTEC)提供的Argo月平均网格化盐度资料(Hosoda等, 2008), 水平分辨率为1°×1°. 该资料采用的原始温盐资料包括来自Argo、跨洋三角形浮标观测网(TRITON)的资料, 以及历史上获得的温盐深(CTD)探测仪的观测资料. 本文中采用的盐度资料的时间跨度为2001~2017年. 同时, 文章中还采用了英国气象局哈德莱中心提供的EN4盐度资料(Good等, 2013), 分析海表盐度在1970~2017年间的变化.

为了分析与盐度变化相关的大气淡水强迫和海洋动力过程, 文章还采用了降水、蒸发、海表面压强、海表面风场和海表面高度等资料. 其中, 淡水强迫(蒸发减降水, *E*-*P*)采用海气热通量客观分析资料(OAFlux)的月平均蒸发(Yu和Weller, 2007)减去全球降水气候学计划(GPCP)的月平均降水(Adler等, 2003; Huffman等, 2009)得到, 采用的时间尺度与Argo一致. OAFlux的蒸发由美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)提供, 水平分辨率1°×1°. 降水采用GPCP 2.1版本的资料, 空间分辨率为2.5°×2.5°, 为方便计算, 采用线性插值方法将其插值到1°×1°的网格点上. 海表面压强采用欧洲中期天气预报中心提供的ERA-interim再分析资料(Dee等, 2011). 资料原始分辨率大约为0.75°×0.75°, 采用的时间跨度为1979~2017年. 风场采用多平台交叉校准(CCMP)风场资料(Atlas等, 2011). 该资料从遥感系统(RSS, http://www.remss.com/measurements/ccmp)上获得, 水平分辨率0.25°×0.25°, 时间跨度1987~2017年. 海表面高度资料由AVISO提供(https://www.aviso.altimetry.fr), 水平分辨率0.125°×0.125°, 时间跨度为1993~2017年.

3 全球海表面盐度的分布及其年际变率

开阔洋面上的淡水主要来源是大气中的降水. 大气环流的基本结构决定了海洋上降水的分布主要受大气垂向环流的影响. 大气垂向环流上升支对应上升运动, 能够造成潜热释放, 然后形成降雨. 在全球尺度上, 东西向的Walker环流和南北向的Hadley环流占据了主导的作用. 控制淡水通量的另外一个要素是蒸发项, 主要跟海面的风场有关, 由海气的湍通量交换所决定. 而大尺度的海面风场主要是由海洋表面气压分布所控制.

在全球尺度上, 海表盐度与淡水通量在空间分布形态上具有较好的一致性, *E*-*P*在最低阶上控制着海表盐度分布(图1). 但是在洋盆尺度, 二者的中心位置差别可以达到数百到数千公里. 这表明不能单独从大气的角度来解释两者的关系. 前人研究表明, *E*-*P*和海洋动力过程, 包括风场引起的Ekman输送、地转输送、垂向卷夹等共同决定平均态的盐度分布(Yu, 2011; Qu等, 2011). 从海表盐度年际变率也可以看出, 淡水强迫无法解释大部分区域的海表盐度变化(图2). 仅在西太平洋小范围区域, 降雨和盐度有较好的相关性, 这表明在整个气候系统中, 海洋起着重要的作用. 尤其在盐度变率方面, 海洋动力的影响十分重要.

海表盐度年际变率大值区主要分布在暖池深对流区和大型河流的流出海域(图2). 受区域气候和海洋动力过程的影响, 不同海区海表盐度变率差异较大. 在热带东印度洋和热带西太平洋暖池区, 海表盐度年际变率最显著的周期约为5年(Zhang等, 2018), 体现了厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)与印太海洋电容器效应(IPOC)模态的影响(Qu等, 2014; Xie等, 2016). 海洋水平平流输送和混合层底的卷夹作用对ENSO期间赤道中太平洋显著的盐度异常有重要的贡献(Qu等, 2014; Qu和Gao, 2017). 热带西太平洋海表盐度年际变率还表现出多年代际变化的特征(图2). 之前的研究指出, 太平洋年代际气候变化通过改变Walker环流和海洋动力过程影响热带西太平洋海表盐度年代际变化(Du等,

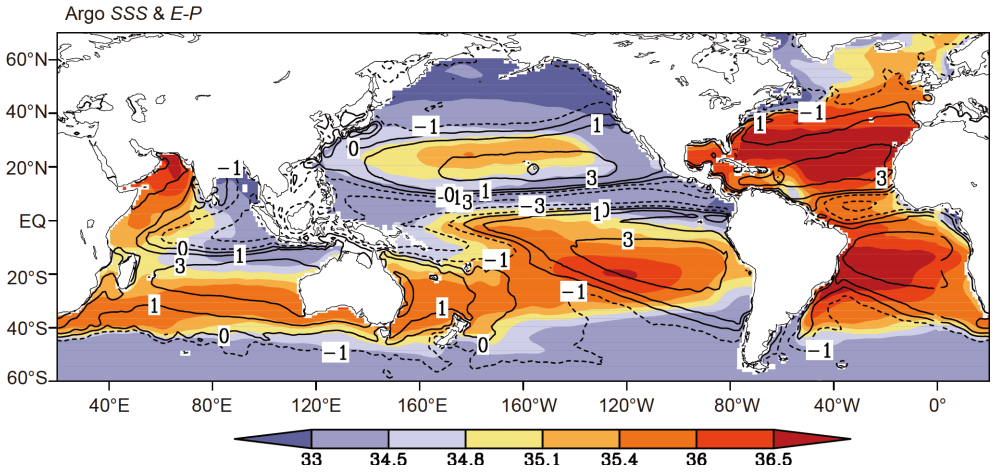

图 1　**Argo气候态年平均的海表面盐度和蒸发减去降水**

SSS, 填色, 单位: psu; *E-P*, 等值线, 单位: mm day^{-1}

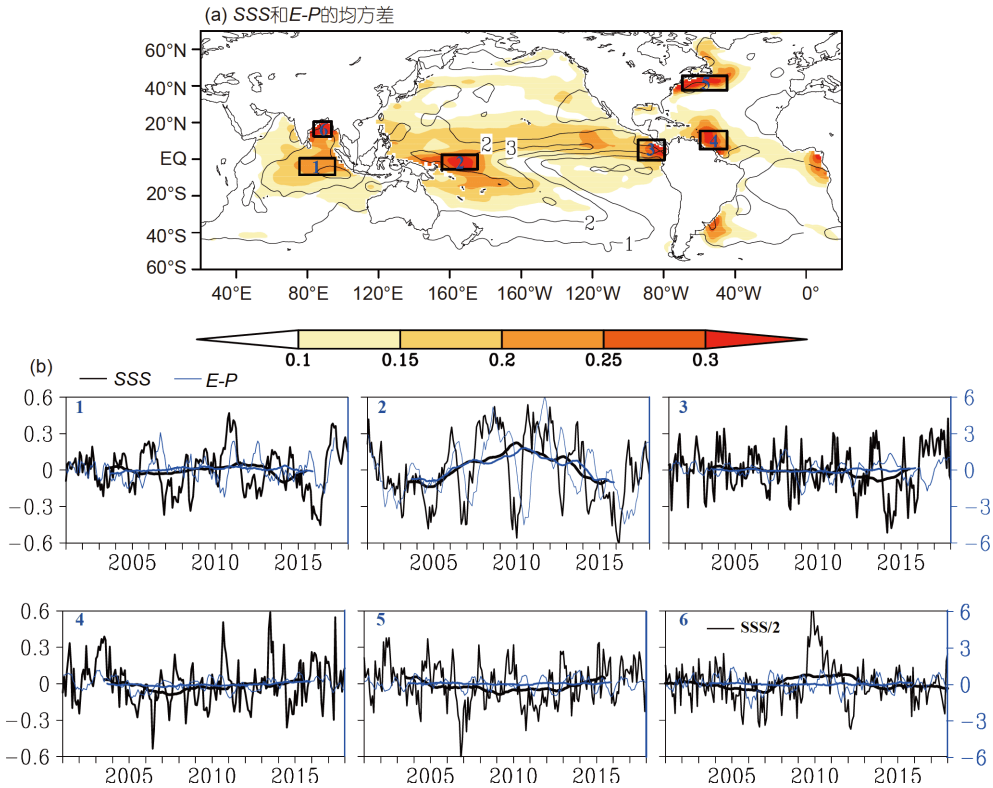

图 2　**Argo *SSS*和*E-P*异常值的年际均方差以及赤道东印度洋、赤道西太平洋、赤道东太平洋、北孟加拉湾、西北大西洋和赤道西大西洋6个区域平均的*SSS*和*E-P*异常时间序列**

SSS(填色, 单位: psu), *E-P*(等值线, 单位: mm day^{-1}). 异常值为2001~2017年原始月分辨率数据去掉季节循环和线性趋势. 6个子图中粗实线为5年滑动平均的值. 区域6中*SSS*的时间序列是异常值乘以1/2的结果

2015). 赤道东太平洋和西大西洋海表盐度年际变率以两年左右周期为主(图2), 与区域风场异常引起的水平平流和垂向卷夹相关(Delcroix和Hénin, 1991). 在热带外海区, 如大西洋西北部湾流延伸体海域的海表盐度变率主要是两年及更低频周期(图2), 体现了西边界流变异的影响(Qiu和Lukas, 1996). 图3给出了海表盐度

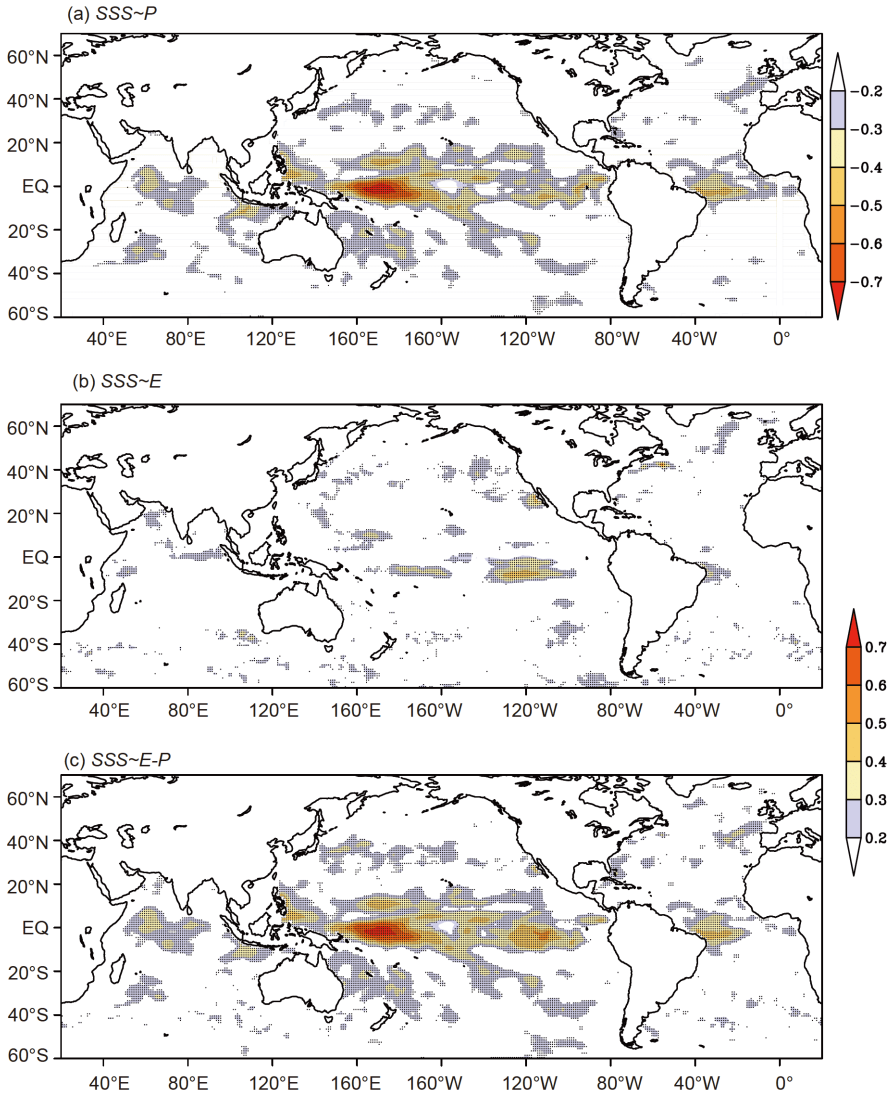

图 3　Argo *SSS*异常分别和降水、蒸发、蒸发减去降水的相关系数

超过95%置信度的区域打点标识

与蒸发、降水之间的关系，进一步表明在全球大部分区域海表盐度和蒸发与降水相关很弱(Xie等，2014)，只有在热带辐合带(ITCZ)与南太平洋辐合带(SPCZ)两个区域呈现出显著的相关. 在全球大部分海域, 必须考虑海洋的动力过程对盐度变化的影响.

4　全球变暖及变暖停滞时期水循环与盐度变化

在全球变暖背景下，水循环和海表盐度有着明显的响应变化(Hartmann等，2013). 全球变暖使得气候系统发生了显著性的变化. 根据克拉珀龙方程: 温度每升高1℃，水汽增加6~7%，降雨增加2~3%(Held和Soden, 2006; Vecchi和Soden, 2007). 在最新的政府间气候变化专门委员会(IPCC, 2014)报告中, 该过程已经作为一个确定性的结论给出. Durack等(2012)指出，温度每升高1℃, 盐度的极大和极小值之间的对比就会增加8%, 水汽通量变化大约是盐度对比的50%，即4%左右. 这意味着在全球变暖的情况下，热力学和动力学约束气候系统遵循如下规律: 海表盐度高的海区会变得更高、海表盐度低的海区会变得更低，即warm gets warmer, wet gets wetter理论, 表征着全球水循环系统会加强.

基于全球有限的观测资料, 研究发现在1950~2000年间, 西太平洋海域的盐度呈变淡趋势, 这与暖池区ITCZ降水增加有关(Delcroix等, 2007, 2011; Cravatte等, 2009; Skliris等, 2014). 从全球大洋纬向平均的南北断面发现, 在北半球的上层海洋显著变淡, 其中绝大部分的影响来自太平洋(Boyer等, 2005). 热带西太平洋作为全球深对流的中心, 是整个暖池和淡水池的核心区域, 它的变化体现了warm gets warmer, wet gets wetter理论(Durack等, 2012). 这一理论从海洋观测中部分的得以证实, 其数据主要来自于全球温盐深仪(CTD)站位以及世界大洋环流实验(WOCE)断面的观测. 但从过去50年的研究尺度来看, 这些资料显然不够, 并且数据很分散, 仅在西北太平洋及北大西洋的观测较为可观, 验证上述结论需要更多的数据. 并且, 从1998年到目前的20年间, 全球陆表和海表的温度变化很小. 这被称作全球变暖停滞期(Meehl等, 2011), 如何解释相关的盐度变化和水循环变化? 目前已经认识到年代际调整起到重要的作用, 但相关的过程很多还不清楚.

最近十几年, 随着Argo计划的实施, 全球大约维持3000~4000个的深海浮标, 可以获取海洋2000m深度以浅全球温度和盐度数据, 从而可以进行相关的盐度变化研究. 图4给出2001~2017年海表盐度的趋势变化, 长期变化的方差贡献与年际变化方差的比率以黑线给出(图4a). 根据全球变暖下水循环和盐度变化的规律, 180°日经线以西的海域, 按水循环增强的情况下, 上层海洋应该变得更淡, 但是Argo的观测结果并非如此, 结果表明该海域盐度升高, 而东南印度洋盐度降低(图4a); 基于2004~2014年的观测, 这一现象更为明显(Du等, 2015). 在北大西洋深层水形成的区域, 海表盐度显著变淡; 该海区是全球大洋输运带的关键海区, 表层海水的性质会影响到垂向子午环流的强弱, 进而影响经向热输送, 以及大气环流系统(Thorpe等, 2001; Vellinga和Wu, 2004; Wang等, 2010). 在赤道东南太平洋海

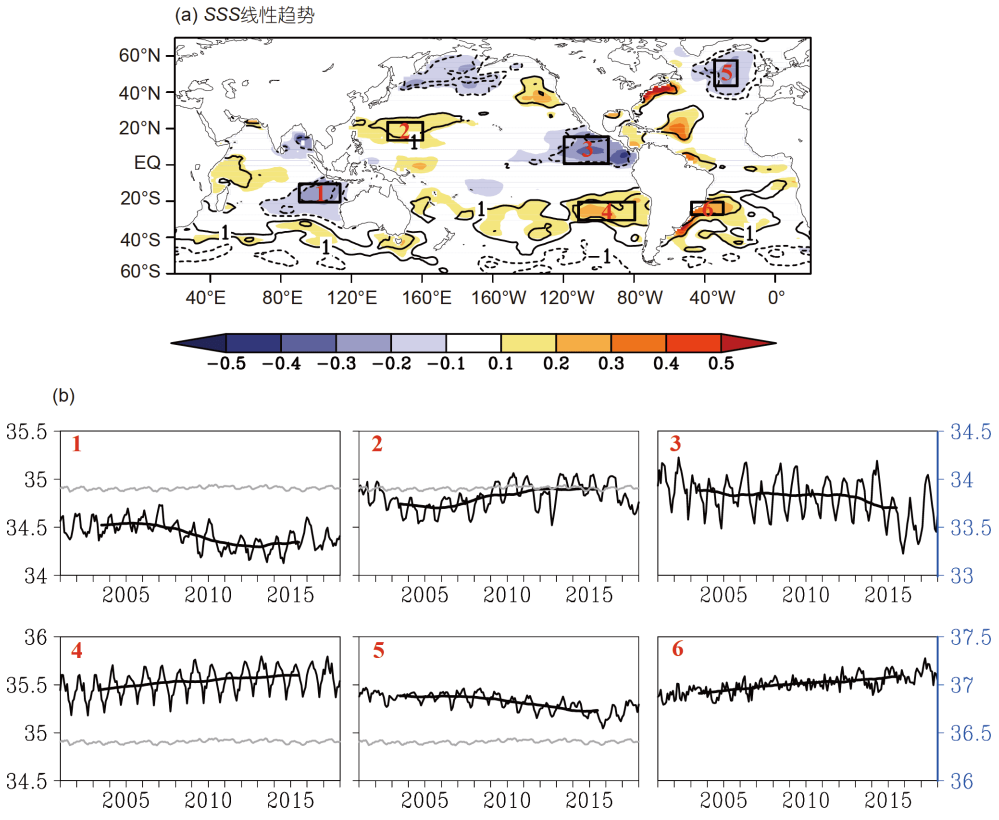

图 4　Argo *SSS* 2001~2017年的线性趋势和线性趋势与年际变率的比值, 以及热带东南印度洋、热带西北太平洋、赤道东印度洋、东南太平洋、北大西洋和西南大西洋6个主要大值区平均的时间序列

Argo *SSS* (填色, 单位: psu). (a)中黑线表示线性趋势与年际变率的比值; (1)~(6)中黑色粗实线为5年滑动平均的值; (1), (2), (4)和(5)中叠加的灰色线为全球平均的时间序列

区, 海表盐度呈现降低趋势, 显示受到来自大西洋越洋盆气流的影响(Gordon和Giulivi, 2008; Schmitt, 2008).

对于海表盐度变化的来源, 按照海洋动力学的调整方式, 异常盐度变化可以来自表层, 也可以来自次表层, 或者来自其他海区. 对于热带海区, 信号来自次表层的依据主要源于赤道海域为上升流区, 来自温跃层的影响从理论上可以起到很重要的作用. 但对于热带印太海区, 分析结果显示几乎所有的强信号都局限于混合层, 这意味着这些变化主要是海气耦合过程的结果(Du等, 2015).

在印太暖池区, 长期变化的贡献与年际变化的比率显示趋势项比较显著, 但时间序列揭示年代际低频变化比观测时段内的趋势项更为重要. 这意味着, 对于较短时间的观测, 在很多区域全球变暖导致的单调变化会被年代际变化所掩盖(图4). 而在东南太平洋副热带海区, 盐度呈现稳定升高趋势, 更多地显示了全球变暖的贡献(图4).

值得注意的是, 对于印太暖池区, 经验正交函数分解(EOF)分析发现西太平洋和东南印度洋两个海区海表盐度的变化紧密相关. 两个海域并非相互独立, 而是通过跨洋盆的动力过程联系在一起, 最近的很多工作揭示了这一点(Merrifield, 2011; Feng等, 2010; 王天宇等, 2015; Zhang等, 2018).

在印太暖池区, 观测时段内的趋势项变化以及年代际低频变化的原因是什么? 最近的研究表明, 这和Walker环流变化有关(England等, 2014; Du等, 2015). 降雨、风场和气压趋势所体现的变化表明20世纪90年代中期以来Walker环流表现为加强, 这与全球变暖状态下的情况相反. IPCC第五次评估报告(AR5)有一个确定性的结论: 即水汽增加6~7%, 降雨指数增加2~3%, 两者的不匹配导致大气垂向环流减弱, 即Walker环流减弱(Vecchi和Soden, 2007). 但在全球变暖停滞期, Walker环流加强(图5), 这意味着近20年的变化很大程度上不是直接由全球变暖所导致.

另外一个原因则与海洋环流有关. England等(2014)研究结果表明, 海洋环流输送会使该变化在西太平洋加强. 热带太平洋沿赤道方向在百米深度上存在浅的垂向环流, 即使蒸发减降水占到主导作用, 海洋环流仍会使得表面盐度变化的信号向西偏移. 趋势项与年代际低频变化的对比显示后者非常重要, 越来越多的研究表明年代际变化是全球变暖停滞出现的原因(Chen和Tung, 2014).

目前年代际变化的许多问题仍未解决, 其预测预报都是难题, 核心问题在于年代际变化的海气耦合理论并不清楚. 对于地球系统, 有很多确定性的力, 比如太阳和月球的引力, 相应的地球自转及围绕太阳的周期以及月亮围绕地球的周期性等都是确定的. 有确定性的力及周期, 海洋响应过程的周期性就非常明确, 如海洋存在显著的日变化、年变化等. 但海气耦合并没有一个确定性的力, 它依赖于海气之间交互性的作

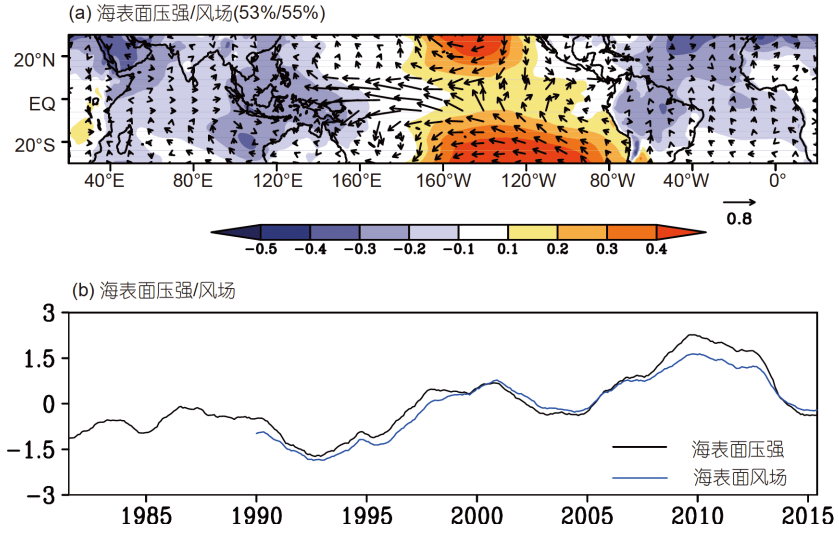

图 5　ERA-interim海表面压强和CCMP风场低频变化的EOF第一模态

(a) 空间分布; (b) 时间序列. 低频变化数据为原始月分辨率数据去掉季节循环后做5年滑动平均. 压强, 单位: hPa; 风场, 单位: m s^{-1}

用, 这导致了海气耦合的多样性和不确定性.

5　热带印-太海区年代际气候变化与盐度响应

对于西太平洋和东南印度洋这两个区域, 海面盐度的变化相对来说很强, 把这两个区域的CTD资料全部拿出来对比和重构, 利用20世纪70年代之后的数据可以研究年代际的问题. 最近的研究表明, 在这两个海区确实存在很强的年代际变化的信号, 这印证了基于2000年之后Argo所观测到的结果(图6).

从降水或者盐度的分布来看, 南海-海洋大陆-东南印度洋和西太平洋中部存在一种类似偶极子的分布. 其时间系列不但存在着年际变化, 准十年的变化, 还存在多年代际的变化, 所有的尺度相互作用在90年代中期达到一个极值. 虽然这包含了多尺度过程, 但其中主导因素可能取决于大约10~20年的年代际的振荡过程, 它的归因还在于大气Walker环流的变化. 降雨、风场以及海面气压的数据都指示Walker环流的年代际振荡是造成热带气候系统变化的原因(Du等, 2015).

哪一个海区主导了这种年代际变化? 相关分析发现太平洋的过程起到主导作用, 并且最近20年和太平洋年代际振荡(PDO)的联系非常紧密, 而印度洋内部的过程对Walker环流的变化影响较弱(Kosaka和Xie, 2013). 由于海洋大陆的联通性, 从海洋环流或者海洋动力学的角度, 东南印度洋和西太通过跨海盆尺度的相互作用紧密联系在一起(Merrifield, 2011; Feng等, 2010; 王天宇等, 2015). 而且, 印太的海洋环流联系属于全球大洋环流输运带的一部分. 印度尼西亚贯穿流把来自西太平洋的低盐水直接输送到东南印度洋.

热带东南印度洋表面温度变化很小, 但是表面盐度变化很大, 并且和南海-海洋大陆的海表盐度变化形成一体, 印尼贯穿流联通了两块海区. 在印尼贯穿流的主要通道处, Arnold Gordon等在望加锡海峡做了多年连续的观测(Gordon等, 2003, 2008). 观测发现从20世纪90年代末期到2011年, 印尼贯穿流的强度由9~10Sv (1Sv=1×10^{6}m^3/s)增强到大约16Sv(Hu和Sprintall, 2017; Li等, 2018). 这意味着从太平洋通过印度尼西亚海及南海到印度洋输送的水体增加. 印度尼西亚海及南海的水比南印度洋的盐度要低, 印尼贯穿流增强也导致

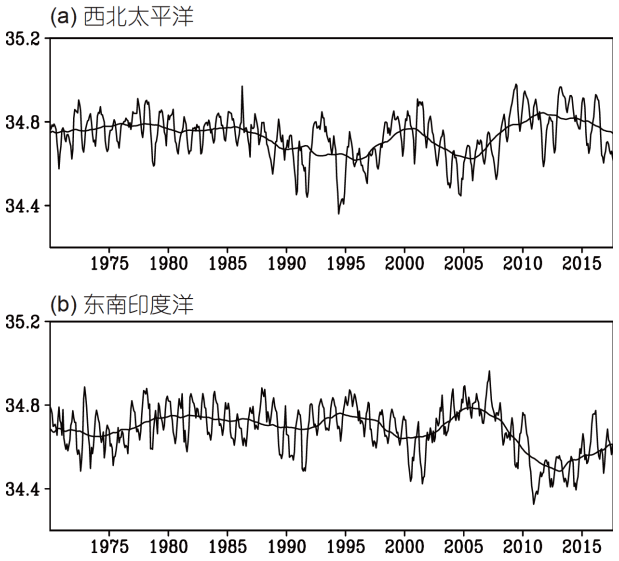

图 6　EN4 *SSS*区域平均的时间序列

(a) 西北太平洋; (b) 东南印度洋, 分别对应图4(a)中的区域2和1. 黑色粗实线为5年滑动平均的值. 单位: psu

淡水输入增加. 但印尼贯穿流的低盐水输入主要在15°~5°S, 这不能解释为什么盐度信号扩张到20°~30°S.

原因在于海洋波动调整的作用. 大尺度的海洋波动主要通过调整温跃层对上层海洋产生作用. 西太平洋千公里到数千公里尺度的Rossby波能够缓慢地到达西边界, 然后以开尔文波的形式穿越印度尼西亚海, 到达澳大利亚西北沿岸, 然后继续沿边界向南, 传播过程中激发出Rossby波, 脱离海岸向西传播, 同时在海洋高阶尺度动力过程作用下耗散(Wijffels和Meyers, 2004). 低频的Rossby波动过程在年代际时间尺度上控制了上层海洋的辐合辐散. 印尼贯穿流输入的低盐水到南印度洋后, 受到上层海洋辐合辐散的调制并富集在偏南的海区, 这体现了大尺度低频海洋波动动力学的调整作用(Zhang等, 2018).

海洋波动过程对应的内部温跃层的调整很难直接观测, 但热带海区海面高度能够表征这种低频的Rossby波动过程. 图7显示过去20年间西太海域存在着显著的波动调整, 而且该过程直接影响了东南印度洋. 进一步的归因研究发现, 在年代际变化尺度上, 这种海洋内部的调整不仅取决于赤道风场的变化, 很大程度上还取决于近赤道风场的变化. 太平洋南北纬15°附近风场的变化会引起海洋内部温跃层的调整, 且该调整信号会传递到东南印度洋(王天宇等, 2015). 理解该区域海

洋学现象, 必须从整个海洋大气的动力学角度考虑.

从盐度的视角来看, 印度洋区域的海洋过程非常特殊, 北部阿拉伯海和孟加拉湾两个海盆分别具有热带海区最高和最低的盐度(图1), 两个海盆之间的水交换表征着高、低盐水的快速混合, 动力学上十分活跃. 此外, 来自印度尼西亚海、南海、西太平洋的低盐水控制着热带南印度洋的水体特征. 与其他大洋都不同, 印度洋赤道风场的平均态为西风, 西风会使阿拉伯海高盐水往东输送. 在南印度洋的中纬度, 高蒸发和潜沉导致表层具有高盐水, 该过程为副热带过程, 与北太平洋副热带高压所控制的海域相似. 所以整个印度洋海域会呈现东西推进-南北交错的复杂扭曲结构(图1). 这种分布在全球范围内都很独特, 它既是全球热盐环流输运的一部分, 又隐含着其海域本身的特征, 其分布是多种气候动力过程的结果.

因而印度洋海表盐度分布几乎反映了热带海洋环流的所有基本特征. 围绕这个过程, 从它与季风气候和热带年际气候模态之间的关系, 从海洋动力学的角度, 已经有一些值得关注的工作(Qiu等, 2012; Zhang等, 2013, 2016; Li等, 2016; Li等, 2017). SMOS和Aquarius盐度卫星数据也应用在印度洋的研究中. 通过与Argo和世界海洋图集(WOA)的CTD资料的对比验证, 发现盐度卫星数据可以用来解释一些从季节到年际的海洋和气候变化过程(Durand等, 2013; Nyadjro和Subrahmanyam, 2014; Du和Zhang, 2015).

6 盐度模式模拟和观测的发展及展望

受观测手段的限制, 盐度观测资料十分缺乏, 致使早期关于盐度的工作仅限于气候态和个别断面观测的研究. 模式的发展为盐度的研究工作提供了一种有效的手段. 在太平洋, 前期的模式结果揭示了海水盐度与ENSO的关系(例如, Maes等, 2002; Bo等, 2008; Gao等, 2014), 探讨了淡水通量对ENSO发展的影响(Zhang和Busalacchi, 2009; Collins等, 2010; Zhu等, 2014; Zhang等, 2015). 在大西洋, 模式结果揭示了副热带辐合区最大盐度形成机理(Qu等, 2011, 2013), 探索了盐度对深层翻转流的影响(Mignot和Frankignoul, 2010; Qu等, 2013). 在印度洋, 早期的模式结果揭示淡水通量对赤道流的影响((Masson等, 2002, 2003), 指出盐度层化现象会对海气耦合系统产生显著的影响(Masson等, 2004; Thompson等, 2006).

随着观测技术的发展, 盐度在气候系统中的重要性日渐显现. 越来越多的模式研究关注了盐度变化所表征的淡水通量变化对气候系统的影响(例如, Zhang和Wu, 2012). 虽然目前海气耦合模式对海水盐度的模拟能力有待进一步的加强, 但已有研究发现, 同化盐度对模式模拟的上层海洋层结有显著的改善(Köhl等, 2014; Chakraborty等, 2014). 可以预见, 未来更多、更精确的盐度观测资料积累, 将对模式模拟能力的发展产生显著的影响.

2000年之后Argo的实施和卫星海表盐度观测的发展为盐度的研究积累了观测基础. 已有的研究揭示Argo观测能够很好的用来研究次海盆尺度过程. 在开阔海区, 卫星盐度观测能够弥补Argo在时间和空间观测分辨率方面的不足. 在近岸, 两者都会受到一定的限制. 譬如在南海, Argo的数量极其有限, 获得的观测数据不多. 而对于卫星盐度观测, 由欧洲航天局研发的SMOS卫星于2009年11月发射升空(Jackson等, 2004). SMOS卫星上搭载了综合孔径微波成像辐射计(MIRAS), 用于观测用来反演土壤湿度和海洋盐度的亮温. MIRAS的中心频率为1.413GHz, 分辨率为30~50km, 幅宽为900km. 重返周期为3~7天. Aquarius卫星主要由美国国家航天局(NASA)和阿根廷航天局主持开展的观测项目, 于2011年6月发生升空, 用于观测全球海表面盐度变化. Aquarius卫星采用L频段微波辐射计和L频段微波散射计联合探测盐度. L频段微波辐射计中心工作频率为1.413GHz, 分辨率为100km, 幅宽为400km, 采用实孔径推扫体制, 能够获得高精度的亮温数据. L频段微波散射计中心工作频率为1.26GHz, 内波束分辨率为62km×68km, 外波束分辨率为75km×100km, 幅宽约为390km, 观测的海表粗糙度数据用于修正海面亮温. 这种联合探测方式能够较好地提高海表盐度的观测精度.

Aquarius卫星的数据相对较好, 月平均数据产品在大洋中的精度为100km分辨率下是0.2psu. 但数据时段非常短, 目前只有2011年8月至2015年5月的数据. SMOS盐度有效数据时段较长, 从2010年到目前都有数据, 但SMOS卫星资料在近海受人类辐射干扰显著. SMOS工作组建议近岸500km的数据使用要极为谨慎. SMOS数据的有效分辨率和精度也较低, 最新版本的数据的全球月平均盐度测量精度在100km分辨率下仅

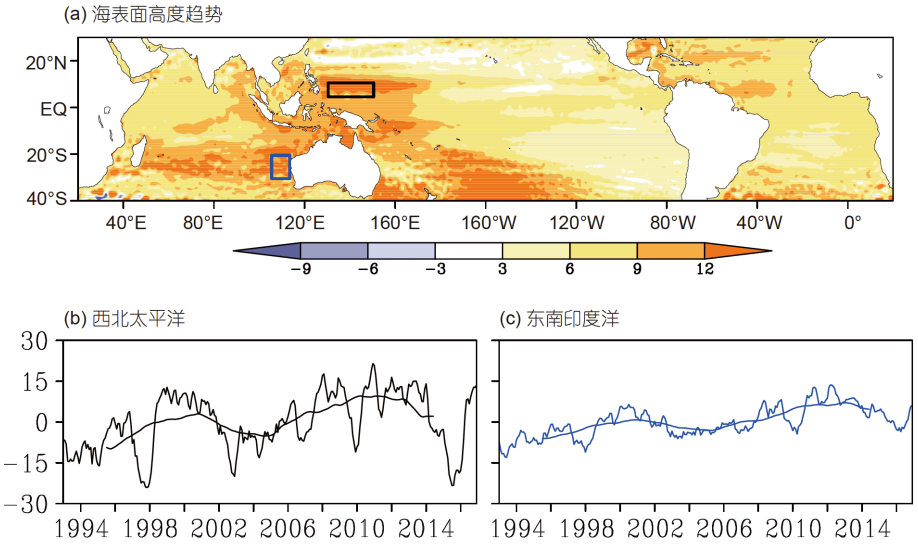

图 7　AVISO海表面高度异常在1993~2016年的线性趋势及热带西北太平洋和东南印度洋区域平均的海表面高度异常时间序列

(a)中的矩形框标注(b)和(c)的区域; (b)和(c)中粗实线为5年滑动平均的值. 单位: cm

为0.4psu左右, 在中低纬大洋海区也仅达到0.25psu. 像中尺度涡和热带季节内振荡(MJO)过程, 在大部分海区还不能有效分辨. 而有效分辨率对于研究中尺度及更高阶海洋动力过程非常重要. 目前能够有效捕捉海洋中尺度过程的卫星资料包括海表面高度计资料、水色遥感资料以及一些较高分辨率的海表面温度资料等. 目前由AVISO提供的海表面高度计资料的空间分辨率为0.125°. 水色遥感的精度更高, 可达4km. 国内卫星遥感相关方面的研究总结了目前国际上的盐度卫星的发展情况, 也对未来盐度卫星的发展提出了意见和建议(例如, 唐治华, 2013; 殷小军等, 2016). 海洋中的现象是多尺度共同作用的结果. 其中, 中尺度海洋动力过程是目前海洋动力学研究的一个重点, 也是目前模式研究和预报研究的瓶颈所在, 而正确的模式模拟和预报建立在对海洋内在机制清楚的基础之上. 中尺度过程不但跟气候密切相关, 而且还跟生态和地球生物化学循环等领域紧密结结合在一起. 目前来看, 盐度卫星目前的瓶颈也是如何改善对海洋中尺度过程的观测. 提高卫星盐度观测的时空分辨率, 会在根本上加深对中尺度海洋动力过程的认识, 并改善模式的模拟和预报.

另外一方面, 区域海洋学是物理海洋学的核心之一. 随着盐度卫星技术的发展, 卫星盐度的应用可以在很多方面获得突破. 下面是一些具体的科学问题:

太平洋和大西洋两个海盆之间通过跨洋盆的大气环流输运存在很强的水汽交换(Schmitt, 2008; Gordon和Giulivi, 2008), 致使北太平洋海表盐度远远低于北大西洋, 盐度/水循环卫星可以更直接的监测海表盐度的变化、气候的异常和影响. 对于最强的年际气候模态ENSO过程, 有研究发现南半球风场所诱生的盐度变化很重要, 它可以通过高盐水侵入赤道, 阻止一些弱的厄尔尼诺发生, 这也与厄尔尼诺造成的全球水循环变化有关联(Qu和Yu, 2014; Qu和Gao, 2017). 北大西洋是全球深层水的主要来源, 表层低盐水通过影响经向环流对全球热盐的分配有很大影响. 前人针对这个问题做了很多研究, 比如研究淡水增加是否会造成子午环流的减弱, 进而影响向极的热量输运(Yashayaev和Clarke, 2008). 对于太平洋的热带辐合带, 从盐度来说, 体现的是水汽输运和大气环流的变化, 目前已经有研究用卫星盐度进行了分析(Yu, 2014). 关于卫星盐度对开阔海洋动力过程的观测和监测, 有研究尝试分析MJO伴随的海表盐度传播信号(Grunseich等, 2013; Li等, 2015)、南印度洋的涡旋和波动过程(Menezes等, 2014)、以及热带太平洋热带不稳定波(TIW)过程(Yin等, 2014); 但受到数据分辨率影响, 有些过程反映的还不是很清晰. 在近岸, 径流输入海洋会产生重要的生态效应, 淡水在海面也会形成淡水羽; 有研究在大西洋对比了不同卫星观测, 发现Aquarius卫星的资

料更可信, 因为它跟环流过程和物质的输送能很好的匹配到一起(Guerrero等, 2014); 在中国的南海和东海, 在海表盐度季节变化和年际变化方面也有一些相关的研究(Zeng等, 2014; Kim等, 2014). 相当一部分研究在做卫星盐度的验证工作, 例如夏威夷的HOT连续观测站, 从50年代起就开始进行连续观测,可以被用来做卫星盐度的定标(Lukas和Santiago-Mandujano, 2008).

盐度的研究还可以应用到气候变化研究方面. 盐度不同于温度, 在气候系统中, 温度作为一个物理参数, 既可以直接表征为气候变化的结果, 也可以表征为气候变化的原因, 而盐度是一个保守的物理量, 往往用来指示气候变化的过程. 在很多情况下, 盐度是通过对温度的影响来反馈到气候系统中. 已有的研究发现, 在以ENSO为代表的年际时间尺度上, 盐度变化对气候系统的贡献可以达到20%(Zhang等, 2012; Zheng和Zhang, 2012, 2015). 在年代际的时间尺度上, 盐度变化如何影响海洋的热力结构, 并反馈到气候系统中, 尚无研究进行评估. 卫星盐度的观测无疑可以促进这方面的研究.

总之, 盐度卫星观测将在中尺度动力学、区域海洋学和气候变化等研究方面有着广阔的前景.

致谢 感谢全球水循环观测卫星(WCOM)卫星科学团队及孙启伟博士提供的帮助. Argo盐度数据来自(http://www.argo.ucsd.edu), EN4盐度数据来自(http://hadobs.metoffice.com/en4/index.html), CCMP风场数据来自RSS (http://www.remss.com), SSH海面高度数据来自AVISO (https://www.aviso.altimetry.fr), GPCP降雨来自NASA/GSFC(http://precip.gsfc.nasa.gov), 蒸发数据来自OAFlux (http://oaflux.whoi.edu), 海表面气压数据来自ECMWF的ERA Interim(http://apps.ecmwf.int/datasets).

参考文献

唐治华. 2013. 国外海洋盐度与土壤湿度探测卫星的发展. 航天器工程, 22: 83–89

王天宇, 杜岩, 庄伟, Wang J. 2015. 热带西太平洋和南印度洋近20年来的海面高度变化及其动力联系. 中国科学: 地球科学, 45: 665–675

殷小军, 张庆君, 王睿, 张欢. 2016. 海洋盐度探测卫星的现状分析和未来趋势. 航天器工程, 25: 119–123

Adler R F, Huffman G J, Chang A, Ferraro R, Xie P P, Janowiak J, Rudolf B, Schneider U, Curtis S, Bolvin D, Gruber A, Susskind J, Arkin P, Nelkin E. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). J Hydrometeorol, 4: 1147–1167

Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, Leidner S M, Jusem J C, Smith D K, Gombos D. 2011. A cross-calibrated, multiplatform ocean surface wind velocity product for meteorological and oceanographic applications. Bull Amer Meteorol Soc, 92: 157–174

Boyer T P, Levitus S, Antonov J I, Locarnini R A, Garcia H E. 2005. Linear trends in salinity for the World Ocean, 1955–1998. Geophys Res Lett, 32: L01604

Bo Y Y, Yeh S W, Noh Y, Moon B K, Park Y G. 2008. Sea surface salinity variability and its relation to El Niño in a CGCM. Asia-Pac J Atmos Sci, 44: 173–189

Chakraborty A, Sharma R, Kumar R, Basu S. 2014. A SEEK filter assimilation of sea surface salinity from Aquarius in an OGCM: Implication for surface dynamics and thermohaline structure. J Geophys Res-Oceans, 119: 4777–4796

Chen X Y, Tung K K. 2014. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. Science, 345: 897–903

Collins M, An S I, Cai W, Ganachaud A, Guilyardi E, Jin F F, Jochum M, Lengaigne M, Power S, Timmermann A, Vecchi G, Wittenberg A. 2010. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. Nat Geosci, 3: 391–397

Cravatte S, Delcroix T, Zhang D, McPhaden M, Leloup J. 2009. Observed freshening and warming of the western Pacific warm pool. Clim Dyn, 33: 565–589

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda M A, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars A C M, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer A J, Haimberger L, Healy S B, Hersbach H, Hólm E V, Isaksen L, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally A P, Monge-Sanz B M, Morcrette J J, Park B K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J N, Vitart F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Q J R Meteorol Soc, 137: 553–597

Delcroix T, Alory G, Cravatte S, Corrège T, McPhaden M J. 2011. A gridded sea surface salinity data set for the tropical Pacific with sample applications (1950–2008). Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 58: 38–48

Delcroix T, Cravatte S, McPhaden M J. 2007. Decadal variations and trends in tropical Pacific sea surface salinity since 1970. J Geophys Res, 112: C03012

Delcroix T, Hénin C. 1991. Seasonal and interannual variations of sea surface salinity in the tropical Pacific Ocean. J Geophys Res, 96: 22135–22150

Du Y, Zhang Y H. 2015. Satellite and Argo observed surface salinity

variations in the tropical Indian Ocean and their association with the Indian Ocean dipole mode. J Clim, 28: 695–713

Du Y, Zhang Y H, Feng M, Wang T Y, Zhang N, Wijffels S. 2015. Decadal trends of the upper ocean salinity in the tropical Indo-Pacific since mid-1990s. Sci Rep, 5: 16050

Durack P. 2015. Ocean salinity and the global water cycle. Oceanography, 28: 20–31

Durack P J, Wijffels S E, Matear R J. 2012. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. Science, 336: 455–458

Durand F, Alory G, Dussin R, Reul N. 2013. Smos reveals the signature of Indian Ocean dipole events. Ocean Dyn, 63: 1203–1212

England M H, McGregor S, Spence P, Meehl G A, Timmermann A, Cai W, Gupta A S, McPhaden M J, Purich A, Santoso A. 2014. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. Nat Clim Change, 4: 222–227

Feng M, McPhaden M J, Lee T. 2010. Decadal variability of the Pacific subtropical cells and their influence on the southeast Indian Ocean. Geophys Res Lett, 37: L09606

Gao S, Qu T, Nie X. 2014. Mixed layer salinity budget in the tropical Pacific Ocean estimated by a global GCM. J Geophys Res-Oceans, 119: 8255–8270

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 Geophys Res-Oceans, 118: 6704–6716

Gordon A, Giulivi C. 2008. Sea surface salinity trends over fifty years within the subtropical North Atlantic. Oceanography, 21: 20–29

Gordon A L, Susanto R D, Vranes K. 2003. Cool Indonesian Throughflow as a consequence of restricted surface layer flow. Nature, 425: 824–828

Gordon A L, Susanto R D, Ffield A, Huber B A, Pranowo W, Wirasantosa S. 2008. Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006. Geophys Res Lett, 35: L24605

Grunseich G, Subrahmanyam B, Wang B. 2013. The Madden-Julian oscillation detected in Aquarius salinity observations. Geophys Res Lett, 40: 5461–5466

Guerrero R A, Piola A R, Fenco H, Matano R P, Combes V, Chao Y, James C, Palma E D, Saraceno M, Strub P T. 2014. The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the Southwestern Atlantic Ocean: Satellite observations. J Geophys Res-Oceans, 119: 7794–7810

Hartmann J, West A J, Renforth P, Köhler P, De La Rocha C L, Wolf-Gladrow D A, Dürr H H, Scheffran J. 2013. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. Rev Geophys, 51: 113–149

Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. J Clim, 19: 5686–5699

Hosoda S, Ohira T, Nakamura T. 2008. A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations. JAMSTEC-R, 8: 47–59

Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, Gu G. 2009. Improving the global precipitation record: GPCP version 2.1. Geophys Res Lett, 36: L17808

Hu S, Sprintall J. 2017. Observed strengthening of interbasin exchange via the Indonesian Seas due to rainfall intensification. Geophys Res Lett, 44: 1448–1456

IPCC. 2014. Climate Change 2014. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx J C, eds. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press

Jackson T J, Hsu A Y, Van de Griend A, Eagleman J R. 2004. Skylab L-band microwave radiometer observations of soil moisture revisited. Int J Remote Sens, 25: 2585–2606

Kim S, Lee J H, de Matthaeis P, Yueh S, Hong C S, Lee J H, Lagerloef G. 2014. Sea surface salinity variability in the East China Sea observed by the Aquarius instrument. J Geophys Res-Oceans, 119: 7016–7028

Köhl A, Sena Martins M, Stammer D. 2014. Impact of assimilating surface salinity from SMOS on ocean circulation estimates. J Geophys Res-Oceans, 119: 5449–5464

Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. Nature, 501: 403–407

Lagerloef G, Wentz F, Yueh S, Kao H Y, Johnson G C, Lyman J M. 2012. Aquarius satellitemission provides new, detailed view of sea surface salinity. Bull Amer Meteorol Soc, 93: S70–S71

Li J, Liang C, Tang Y, Dong C, Chen D, Liu X, Jin W. 2016. A new dipole index of the salinity anomalies of the tropical Indian Ocean. Sci Rep, 6: 24260

Li M, Gordon A L, Wei J, Gruenburg L K, Jiang G. 2018. Multi-decadal timeseries of the Indonesian Throughflow. Dyn Atmos Oceans, 81: 84–95

Li Y, Han W, Lee T. 2015. Intraseasonal sea surface salinity variability in the equatorial Indo-Pacific Ocean induced by Madden-Julian oscillations. J Geophys Res-Oceans, 120: 2233–2258

Li Y, Han W, Wang W, Ravichandran M, Lee T, Shinoda T. 2017. Bay of Bengal salinity stratification and Indian summer monsoon intraseasonal oscillation: 2. Impact on SST and convection. J

Geophys Res-Oceans, 122: 4312–4328

Lukas R, Santiago-Mandujano F. 2008. Interannual to interdecadal salinity variations observed near hawaii: Local and remote forcing by surface freshwater fluxes. Oceanography, 21: 46–55

Maes C, Picaut J, Belamari S. 2002. Salinity barrier layer and onset of El Niño in a Pacific coupled model. Geophys Res Lett, 29: 59-1–59-4

Masson S, Delecluse P, Boulanger J P, Menkes C. 2002. A model study of the seasonal variability and formation mechanisms of the barrier layer in the eastern equatorial Indian Ocean. J Geophys Res, 107: SRF 18-1–SRF 18-20

Masson S, Menkes C, Delecluse P, Boulanger J P. 2003. Impacts of salinity on the eastern Indian Ocean during the termination of the fall Wyrtki Jet. J Geophys Res, 108: 3067

Masson S, Boulanger J P, Menkes C, Delecluse P, Yamagata T. 2004. Impact of salinity on the 1997 Indian Ocean dipole event in a numerical experiment. J Geophys Res, 109: C02002

Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, Hu A, Trenberth K E. 2011. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. Nat Clim Change, 1: 360–364

Menezes V V, Vianna M L, Phillips H E. 2014. Aquarius sea surface salinity in the South Indian Ocean: Revealing annual-period planetary waves. J Geophys Res-Oceans, 119: 3883–3908

Merrifield M A. 2011. A shift in western tropical Pacific sea level trends during the 1990s. J Clim, 24: 4126–4138

Mignot J, Frankignoul C. 2010. Local and remote impacts of a tropical Atlantic salinity anomaly. Clim Dyn, 35: 1133–1147

Nyadjro E S, Subrahmanyam B. 2014. SMOS mission reveals the salinity structure of the Indian Ocean dipole. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 11: 1564–1568

Qiu B, Lukas R. 1996. Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, the Mindanao Current, and the Kuroshio along the Pacific western boundary. J Geophys Res, 101: 12315–12330

Qiu Y, Cai W, Li L, Guo X. 2012. Argo profiles variability of barrier layer in the tropical Indian Ocean and its relationship with the Indian Ocean Dipole. Geophys Res Lett, 39: L08605

Qu T, Gao S, Fukumori I. 2011. What governs the North Atlantic salinity maximum in a global GCM? Geophys Res Lett, 38: L07602

Qu T, Gao S, Fukumori I. 2013. Formation of salinity maximum water and its contribution to the overturning circulation in the North Atlantic as revealed by a global general circulation model. J Geophys Res-Oceans, 118: 1982–1994

Qu T, Gao S. 2017. Resurfacing of South Pacific tropical water in the Equatorial Pacific and its variability associated with ENSO. J Phys Oceanogr, 47: 1095–1106

Qu T, Song Y T, Maes C. 2014. Sea surface salinity and barrier layer variability in the equatorial Pacific as seen from Aquarius and Argo. J Geophys Res-Oceans, 119: 15–29

Qu T, Yu J Y. 2014. ENSO indices from sea surface salinity observed by Aquarius and Argo. J Oceanogr, 70: 367–375

Schmitt R W. 2008. Salinity and the global water cycle. Oceanography, 21: 12–19

Skliris N, Marsh R, Josey S A, Good S A, Liu C, Allan R P. 2014. Salinity changes in the world ocean since 1950 in relation to changing surface freshwater fluxes. Clim Dyn, 43: 709–736

Thompson B, Gnanaseelan C, Salvekar P S. 2006. Variability in the Indian Ocean circulation and salinity and its impact on SST anomalies during dipole events. J Mar Res, 64: 853–880

Thorpe R B, Gregory J M, Johns T C, Wood R A, Mitchell J F B. 2001. Mechanisms determining the Atlantic thermohaline circulation response to greenhouse gas forcing in a non-flux-adjusted coupled climate model. J Clim, 14: 3102–3116

Trenberth K E, Smith L, Qian T, Dai A, Fasullo J. 2007. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. J Hydrometeorol, 8: 758–769

Vecchi G A, Soden B J. 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation. J Clim, 20: 4316–4340

Vellinga M, Wu P. 2004. Low-latitude freshwater influence on centennial variability of the Atlantic thermohaline circulation. J Clim, 17: 4498–4511

Wang C, Dong S, Munoz E. 2010. Seawater density variations in the North Atlantic and the Atlantic meridional overturning circulation. Clim Dyn, 34: 953–968

Wijffels S, Meyers G. 2004. An intersection of oceanic waveguides: Variability in the Indonesian Throughflow region. J Phys Oceanogr, 34: 1232–1253

Xie P, Boyer T, Bayler E, Xue Y, Byrne D, Reagan J, Locarnini R, Sun F, Joyce R, Kumar A. 2014. An *in situ*-satellite blended analysis of global sea surface salinity. J Geophys Res-Oceans, 119: 6140–6160

Xie S P, Kosaka Y, Du Y, Hu K, Chowdary J S, Huang G. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. Adv Atmos Sci, 33: 411–432

Yashayaev I, Clarke A. 2008. Evolution of north Atlantic water masses inferred from Labrador Sea salinity series. Oceanography, 21: 30–45

Yin X, Boutin J, Reverdin G, Lee T, Arnault S, Martin N. 2014. SMOSSea surface salinity signals of tropical instability waves. J Geophys Res-Oceans, 119: 7811–7826

Yu L. 2011. A global relationship between the ocean water cycle and near-surface salinity. J Geophys Res, 116: C10025

Yu L. 2014. Coherent evidence from Aquarius and Argo for the existence of a shallow low-salinity convergence zone beneath the

Pacific ITCZ. J Geophys Res-Oceans, 119: 7625–7644

Yu L, Weller R A. 2007. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005). Bull Amer Meteorol Soc, 88: 527–540

Zeng L, Timothy Liu W, Xue H, Xiu P, Wang D. 2014. Freshening in the South China Sea during 2012 revealed by Aquarius and *in situ* data. J Geophys Res-Oceans, 119: 8296–8314

Zhang L, Wu L. 2012. Can oceanic freshwater flux amplify global warming? J Clim, 25: 3417–3430

Zhang R H, Busalacchi A J. 2009. Freshwater flux (FWF)-induced oceanic feedback in a hybrid coupled model of the tropical pacific. J Clim, 22: 853–879

Zhang R H, Zheng F, Zhu J, Pei Y, Zheng Q, Wang Z. 2012. Modulation of El Niño-southern oscillation by freshwater flux and salinity variability in the tropical pacific. Adv Atmos Sci, 29: 647–660

Zhang R H, Gao C, Kang X, Zhi H, Wang Z, Feng L. 2015. ENSO modulations due to interannual variability of freshwater forcing and ocean biology-induced heating in the tropical Pacific. Sci Rep, 5: 18506

Zhang Y H, Du Y, Feng M. 2018. Multiple time scale variability of the sea surface salinity dipole mode in the tropical Indian Ocean. J Clim, 31: 283–296

Zhang Y H, Du Y, Zheng S J, Yang Y L, Cheng X H. 2013. Impact of Indian Ocean dipole on the salinity budget in the equatorial Indian Ocean. J Geophys Res-Oceans, 118: 4911–4923

Zhang Y H, Du Y, Qu T. 2016. A sea surface salinity dipole mode in the tropical Indian Ocean. Clim Dyn, 47: 2573–2585

Zheng F, Zhang R H. 2012. Effects of interannual salinity variability and freshwater flux forcing on the development of the 2007/08 La Niña event diagnosed from Argo and satellite data. Dyn Atmos Oceans, 57: 45–57

Zheng F, Zhang R H. 2015. Interannually varying salinity effects on ENSO in the tropical pacific: A diagnostic analysis from Argo. Ocean Dyn, 65: 691–705

Zhu J, Huang B, Zhang R H, Hu Z Z, Kumar A, Balmaseda M A, Marx L, Kinter III J L. 2014. Salinity anomaly as a trigger for ENSO events. Sci Rep, 4: 6821

(责任编委: 吴立新)