

基于南海北部开放航次观测的 2004—2005 年次 表层盐度异常特征与形成机制*

张 博^{1, 2, 4} 曾丽丽¹ 陈 举¹ 谢 强^{1, 3, 5①} 黄 科¹

(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. 中国科学院深海科学与工程研究所 三亚 572099; 4. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司 天津 300222; 5. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室 青岛 266237)

摘要 基于 2004—2013 年的南海北部开放航次数据和 1980—2010 年 Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 数据, 发现南海北部次表层水体盐度在 2004—2005 年间盐度显著增大, 相比于气候态均值分别增加了 0.1 和 0.14, 而且温盐特征曲线显示盐度增大的现象主要发生在 150m 以浅。2004 年净淡水通量仅略低于气候态均值, 2005 年净淡水通量则明显高于气候态均值, 因此净淡水通量不会是导致此高盐事件的有利因素。我们进一步通过块体简化盐度收支方程, 定量评估盐度收支方程里中平流输运项(包括跨海盆经吕宋海峡的平流输运项和南海海盆内部南北海盆之间的平流输运项)的贡献。发现在 2004 年, 通过吕宋海峡进入南海北部的盐含量输运显著大于气候态均值, 是导致南海北部上层水体盐度迅速增大的主要原因。为探究 2005 年南海北部盐度持续增强的原因, 我们进一步比较 2004 年和 2005 年的平流项演变, 发现相对于 2004 年, 虽然 2005 年吕宋海峡盐含量输运略低于气候态均值, 但南海内部南海南北海盆间(通过 18°N 断面进入南海北部)的盐含量输运增强, 即在 2005 年, 海盆内部经向平流盐输运的贡献是促使南海北部上层盐度继续增强的关键因素。

关键词 南海北部; 盐度异常; 盐度收支; 次表层; 吕宋海峡; 18°N 断面

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyh20170300048

南海位于我国大陆以南, 是西北太平洋最大的深水边缘海, 地理位置独特, 海底地形复杂多变。南海通过吕宋海峡、台湾海峡、马六甲海峡、巴拉巴克海峡等分别与太平洋、东海、和印度洋相连, 显示出与大洋相似的水文特征; 但是除了吕宋海峡的深度达到 2500m 外, 其他的海峡水深都比较浅, 而且宽度也比较窄, 形成了南海特有的半封闭贯通格局, 所以, 南海具有区域海洋和开阔大洋的综合水文演变特点。

南海是印度太平洋暖池的重要组成部分, 通过吕宋海峡西北太平洋与南海在各个深度层次上存在广泛

的水交换。吕宋海峡水交换所伴随的热通量和盐通量交换对南海水团的性质、构成和变异起到了决定性作用, 对南海环流也具有重要影响(Nitani, 1972; Shaw, 1991)。此外, 吕宋海峡水交换能够将在大洋产生的一些现象和信号(如黑潮变异、厄尔尼诺、拉尼娜等)通过大气桥和南海贯穿流传到南海, 进而对南海的海洋动力过程产生影响, 引起局地气候变化(Qu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006)。Yu 等(2015)发现吕宋海峡输运(上层 0—745m)具有显著年代际变率特征, 分析表明 PDO 正位相时阿留申低压向南入侵, 热带北太平洋的信风减

* 国家重点研发计划专项项目, 2016YFC1402603 号; 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)项目, XDA11010302 号; 国家自然科学基金项目, 41606030 号, 41776025 号; 广东省自然科学基金项目, 2016A030310015 号; 中国科学院海洋环流与波动重点实验室开放研究基金项目, KLOCW1604 号; 广州市科技计划“珠江科技新星专项”项目, 201610010148 号; 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)自主研究项目, LTOZZ1601 号。张 博, 硕士研究生, E-mail: zhangbo@scsio.ac.cn

① 通讯作者: 谢 强, 博士生导师, 研究员, E-mail: gordonxie@sidsse.ac.cn

收稿日期: 2017-03-08, 收修改稿日期: 2017-03-31

弱而且西风异常增强。北赤道流分叉点相应北移, 吕宋以东的黑潮减弱, 上层 0—745m 的吕宋海峡输运增强。

黑潮通过吕宋海峡入侵低温-高盐水(Dale, 1956; Wyrski, 1961; Nan *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2012; Zeng *et al.*, 2014)。南海中的盐度在不同的时间尺度上也表现出显著的变异性。Nan 等(2013)指出, 在过去二十年里, 南海北部次表层海洋的含盐量减少。Zeng 等(2016)指出, 南海北部次表层盐度具有显著的年代际变化特征。海洋盐度是水文循环的一个良好指示剂, 是描述海水性质的重要物理量, 有助于整体了解南海实际水文特征。然而, 由于盐度数据有限, 一般缺乏对盐度变异性尤其是极端变异事件的深入研究。本文拟利用南海北部海域的开放航次数据和 SODA 数据, 对南海北部次表层水体盐度异常事件进行分析。

1 数据和方法

1.1 数据

本文所使用的 CTD 数据来自中国科学院南海海洋研究所(SCSIO)2004—2013 年的南海北部开放航次

(Zeng *et al.*, 2015)。观测海域为南海北部 110°—120°E, 18°—23°N 之间。其中, 2004—2006、2009—2011 年观测时间为 9 月份, 2007—2008 年观测时间为 8 月份, 2012—2013 年观测时间为 10 月份。2004 年 9 月和 2005 年 9 月观测站位分布见图 1, 站位中有位于吕宋海峡的 120°E 断面, 亦有反映典型南海水体性质南海 18°N 断面等, 站位信息十分丰富。

SODA 海洋数据集由美国马里兰大学的全球简单海洋资料同化分析系统产生。本文采用的数据集 SODA2.2.4, 这套数据同化了包括 WOD09 与 COADS 2.5 等观测数据。它的空间分辨率是 0.5°×0.5°, 垂向 0—150m, 分辨率为不等间距共 12 层, 分别为 148.96、129.49、112.32、96.92、82.92、70.02、57.98、46.61、35.76、25.28、15.07、5.01m。时间跨度为 1980 年 1 月至 2010 年 1 月, 共 31 年。

月平均的净淡水通量计算所使用的数据是 Tropical Rainfall Measuring Mission satellite (TRMM) 3B43 的降水数据和 Objectively Analyzed air-sea Fluxes(OAFlux)的蒸发数据(Yu *et al.*, 2007)。

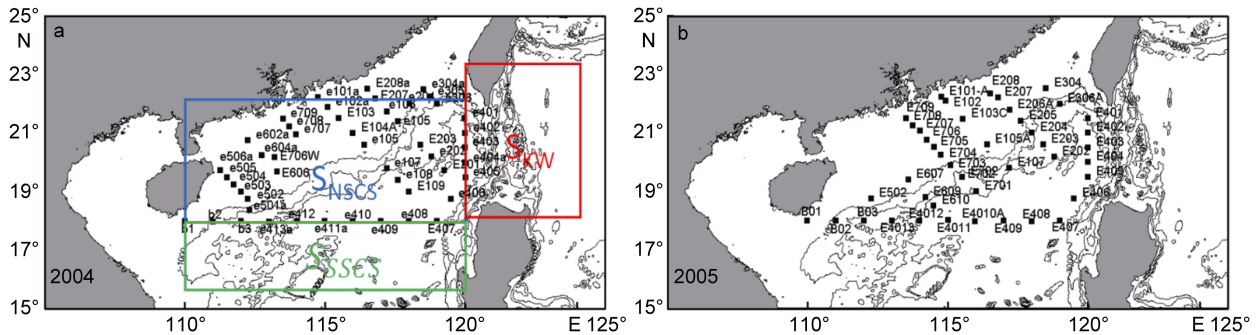


图 1 南海北部开放航次站位分布图

Fig. 1 The open cruises in the northern South China Sea(NSCS)

注: a 为 2004 年, b 为 2005 年。图 a 所标方框为本文盐度收支方程中所选定的水团范围, 蓝色方框为: 南海北部海水; 红色方框为: 黑潮海水; 绿色方框为: 南海南部海水

1.2 盐度收支方程

为了解决盐度年际平衡, 我们考虑了一种简化版的次表层盐度收支方程:

$$\frac{\partial S}{\partial T} = \frac{(E-P)S}{h_m} - \nu \cdot \nabla S + \varepsilon \quad (1)$$

这个方程, 从左到右每一项分别为, 次表层上部盐度变化趋势, 表层淡水通量, 水平平流和剩余项。剩余项是垂向夹卷所造成的盐度变化, 像水平耗散一样是个小量。 h_m 是次表层厚度 0—150m, 等式右端第一项中的 S 是表层盐度, 其余的 S 是次表层盐度, $(E-P)$ 是淡水通量, E 是蒸发, P 是降水, ν 是水平速度,

∇S 是水平盐度梯度(Nan *et al.*, 2013; Zeng *et al.*, 2014)。

水平平流项可以分成两部份计算, 一部分是通过吕宋海峡的输运量, 即吕宋海峡西部(110°—120°E, 18°—22°N)的南海北部海水(S_{NSCS})与吕宋海峡东部(120°—124°E, 18°—23°N)的黑潮水(S_{KW})之间的输运量, 另一部分则是通过 18°N 断面的经向输运量, 即南海北部(S_{NSCS})与南海南部(110°—120°E, 15.5°—18°N, S_{SSCS})之间的输运量。所选范围如图 1a 中方框所示。这部分采用 1980—2010 年 SODA (Carton *et al.*, 2008)的再分析数据。

$$\text{Advection} \approx \text{Adv}_{\text{LZ}} + \text{Adv}_{\text{SSCS}} \approx \frac{\text{LST}(S_{\text{KW}} - S_{\text{NSCS}})}{V_{\text{NSCS}}} + \frac{T_{18^\circ\text{N}}(S_{\text{SSCS}} - S_{\text{NSCS}})}{V_{\text{NSCS}}} \quad (2)$$

2 次表层高盐异常分析

2.1 观测证明

通过对比各年份的 T - S 点聚图, 可以看出南海北部次表层 2004 年和 2005 年为盐度比较大的年份。在

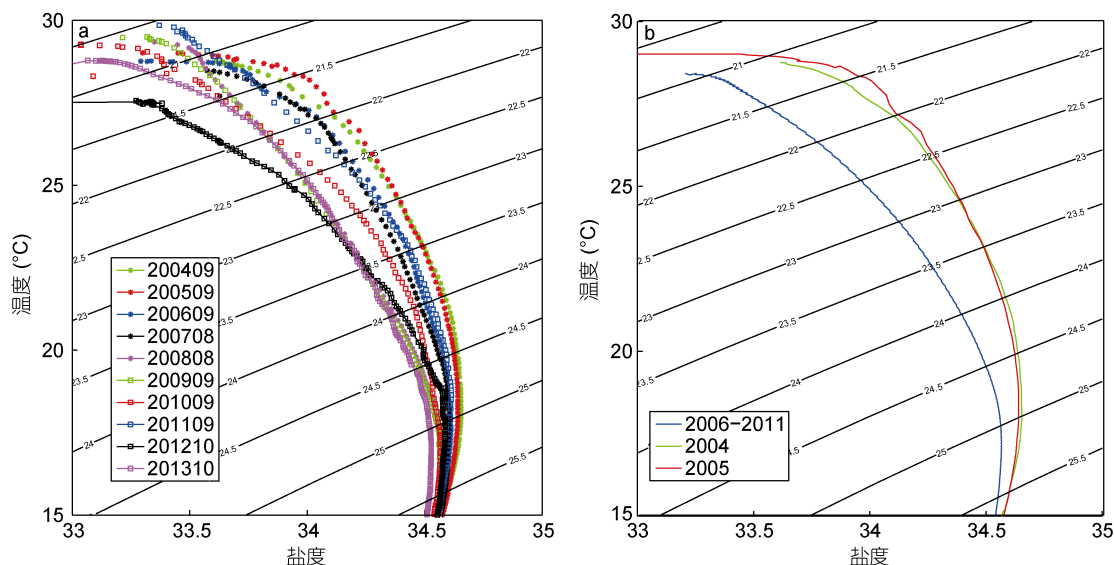


图 2 南海北部次表层温-盐(T - S)点聚图

Fig. 2 T - S plots of sub-surface layers in NSCS

注: a: 开放航次数据 2004—2013 年次表层 150m 以上年平均温-盐(T - S)点聚图; b: 2006—2013 年南海北部开放航次数据平均温-盐(T - S)(蓝色), 2004 年(绿色), 2005 年(红色)

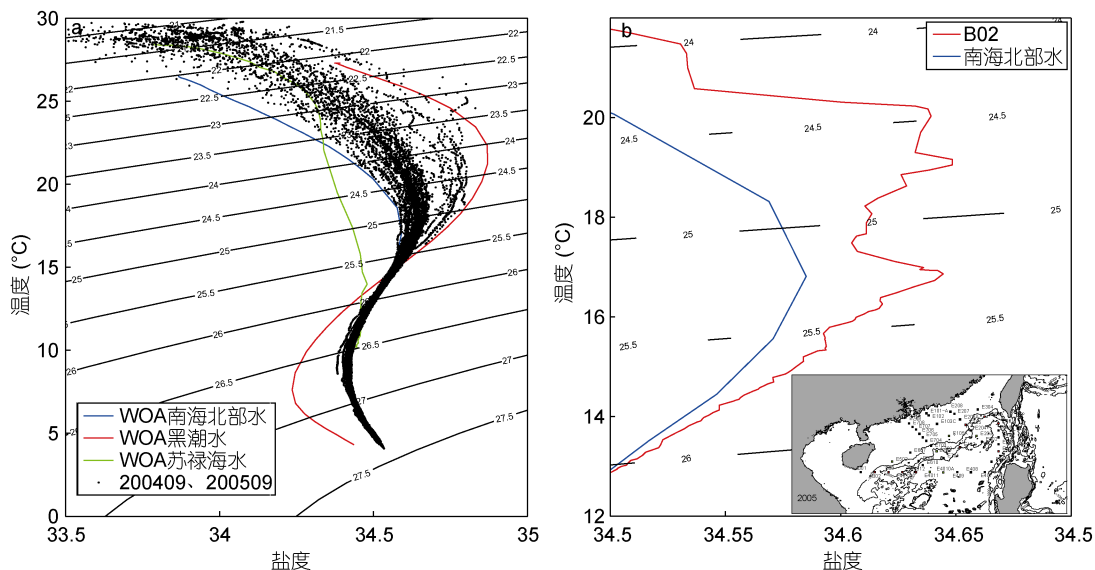


图 3 南海北部 T - S 点聚及其与邻区的比较

Fig. 3 T - S in the late summers of 2004—2005 (black dots) and those of NSCS (blue line), Kuroshio (red line), and Sulu Sea (green line) in the World Ocean Atlas (WOA) climatology (a); and the T - S curve in the B02 station in September 2005 (red line) and that of SCS in the WOA climatology (b)

注: a: 南海北部 2004—2005 年航次数据的 T - S 点聚(黑点)与 WOA 气候态下的南海北部水(蓝线)、黑潮水(红线)、苏禄海水(绿线)的比较; b: 2005 年 9 月 B02 站点 T - S 曲线(红线)和气候态下的南海北部水(蓝线)

$22\sigma_0$ (位势密度)层以上, 2004 年、2005 年与 2006—2013 年平均盐度相比, 随着深度的增加, 盐度差异逐渐增大。在 $22\sigma_0$ 层以下, 随着深度的增加, 2004 年、2005 年与 2006—2013 年平均盐度相比, 盐度差异逐渐减小。其中 2005 年, 在 $22\sigma_0$ 层盐度差异到达最大值, 比 2006—2013 年平均盐度值大 0.35。

为了更好的分析盐度增大的原因, 选取 2004 年 9 月和 2005 年 9 月的航次数据与(WOA 气候态下的)温盐数据进行对比。在气候态平均场下, 海水深度 1000m 以上, 可分为南海北部水和黑潮水, 前者范围 $18^\circ\text{—}21^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{—}119^\circ\text{E}$, 后者范围 $18^\circ\text{—}23^\circ\text{N}$ 、 $122^\circ\text{—}124^\circ\text{E}$ 。南海北部水, 在盐度极大的次表层, 平均盐度最大值为 34.59, 分布在 $25.2\sigma_0$ 层上, 而具有高温高盐的黑潮水, 盐度极大值在 $24.1\sigma_0$ 层上, 平均盐度最大值为 34.86。2005 年南海北部盐度极大值为 34.65, 其所在的次表层主要分布在 $24.8\sigma_0$ 层上, 位于气候态平均场下南海北部水次表层盐度极大值所在密度层的上方, 则黑潮水和南海北部水压力差减小, 从而在一定程度上抑制黑潮水的进入, 使南海北部次表层水体盐度增长放缓。

黑潮水的次表层盐度大、密度小, 在进入南海北部之后, 会在南海北部次表层的上部再形成一个盐度极大值层。图 3b 显示 2005 年南海北部盐度极大的次表层, 个别站点会出现分层现象, 次表层有两个盐度极大值, 形成类似于“3”的结构曲线。有的站点“3”结构曲线明显, 说明此站点附近的海水还没彻底混合, 在图 3b 小图中以红点显示其位置。有的站点次表层的两个盐度极大值很接近, 造成“3”结构曲线不明显, 说明此站点附近的海水混合充分, 在图 3b 小图中以绿点显示其位置。可以看出, 南海北部海水混合的范围主要是在大陆架以外, 这些高盐水在吕宋海峡 20°N 以北进入南海, 沿着 1000m 等深线深入南海内部, 这和李薇等(1998)报道的情形一致。

2.2 净淡水通量分析

2005 年降水相比 2004 年略多一些, 主要分布在吕宋岛和台湾岛两岛的东侧, 而 2004 年降水主要分布在吕宋岛东西两侧。图 4c、4d 分别显示出 2004 年南海北部降水少于气候态均值, 海南岛东部降水比气候态均值少 $6\text{—}8\text{cm/month}$, 2005 年南海北部降水大于气候态均值, 其中最大差值出现在吕宋岛西北部和台湾岛西南部, 此地降水比气候态多 $2\text{—}4\text{cm/month}$ 。2004 年南海北部净淡水通量整体表现为略高于气候态均值, 增加的净淡水通量主要分布在 20°N 。

2005 年南海北部净淡水通量也比气候态高, 主要集中在吕宋海峡西南部, 说明 2004—2005 年南海北部净淡水通量会抑制南海北部盐度增大, 不会造成高盐事件。

在 2004—2010 年, SODA 和开放航次数据在南海北部次表层盐度变化趋势上保持一致, 开放航次数据显示 2005 年南海北部次表层盐度达到 34.31, 在 2004 年到 2013 年这一期间为最大, 比 SODA 的平均盐度大了 0.1。SODA 数据同样显示出 2005 年南海北部次表层盐度达到 34.35, 为 1995 年到 2010 年期间的最大值, 比 SODA 的气候态平均盐度大了 0.14。从图 5 还可以看出, 1993—2001 年和 2005—2008 年南海北部次表层盐度逐渐减小, 1985—1993 年和 2001—2005 年南海北部盐度逐渐增大。其中 2011—2012 年, 南海北部海水有明显淡化现象, 2012 年盐度最小为 33.7。这与 Zeng 等(2014)利用观测和卫星资料证明 2012 年南海北部海水淡化的结果一致。

2.3 盐度特征分析

2004—2005 年盐度增大的现象主要发现在次表层 150m 以浅。盐度最大增量所在的深度为 50—80m。2004 年的盐度最大增量比 2005 年大: 2004 年盐度最大增量大约为 0.3, 而 2005 年大约为 0.2。

2004—2005 年净淡水通量(降水-蒸发)比气候态下要多, 对盐度的增长为负影响, Zeng 等(2014)发现南海北部表面的降水、蒸发、河流径流对南海北部次表层盐度的影响不大。把表层净淡水通量项和剩余项省略之后, 只保留平流项。为了与观测数据的时间相对应, 计算出的结果都是盐含量输运值减去气候态均值, 从 1980 年 1 月开始, 然后再积分到每年的 9 月份, 显示在图中的曲线斜率就可以表示盐度输运变化程度

盐度收支方程可简化为

$$S_1 = \int_0^T \left(\frac{\text{LST}(S_{\text{KW}} - S_{\text{NCS}})}{V_{\text{NCS}}} + \frac{T_{18^\circ\text{N}}(S_{\text{SSCS}} - S_{\text{NCS}})}{V_{\text{NCS}}} \right) dt. \quad (3)$$

而南海北部次表层盐度相对于气候态下平均盐度的变化累积量表示为

$$S_{\text{sum}} = \int_0^T \left[\frac{\text{LST}(S_{\text{KW}} - S_{\text{NCS}})}{V_{\text{NCS}}} - S_{\text{mlst}} \right] dt + \int_0^T \left[\frac{T_{18^\circ\text{N}}(S_{\text{SSCS}} - S_{\text{NCS}})}{V_{\text{NCS}}} - S_{\text{mt}18^\circ\text{N}} \right] dt = S_{\text{LST}} + S_{\text{T}18^\circ\text{N}} \quad (4)$$

其中 S_{mlst} 为通过吕宋海峡平均输入的盐含量, $S_{\text{mt}18^\circ\text{N}}$ 为经向通过 18°N 断面平均输入的盐含量, S_{LST} 为通过吕宋海峡盐含量输入的累积量, $S_{\text{T}18^\circ\text{N}}$ 为经向通过 18°N 断面盐含量输入的累积量。

2.4 盐度收支分析

2001—2004 年通过吕宋海峡进入南海北部次表

层的盐含量输入值均大于气候态均值, 造成 2001—2004 年南海北部次表层盐度快速增加, 虽 2005 年吕宋海峡盐输运减少, 略低于气候态均值, 但通过 18°N 断面进入南海北部次表层的盐含量输运增强, 大于气候平均值, 在二者的共同作用下, 2005 年南海北部次表层盐度继续增加, 随后 2006 年进入南海北

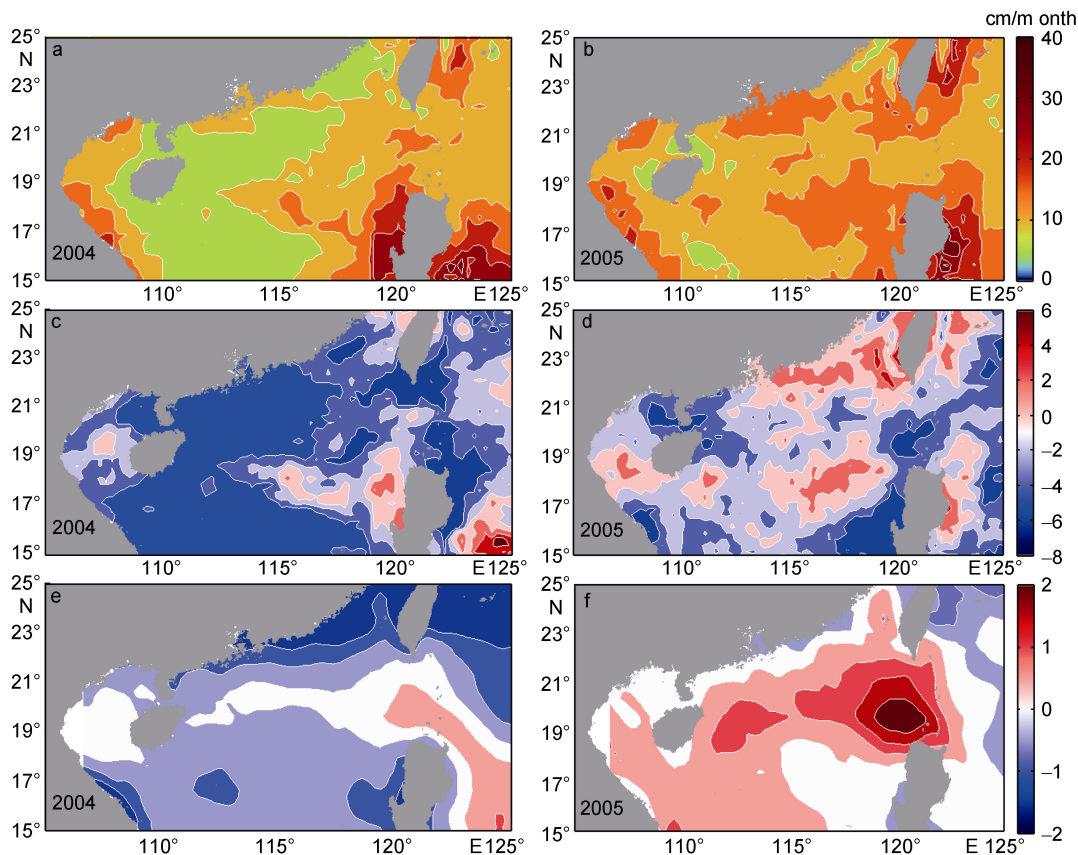


图 4 TRMM 的降水量(cm/month): 2004 年(a)和 2005 年(b); 2004 年(c)和 2005 年(d)的降水量与气候态均值的差异; 2004 年(e)和 2005 年(f)净淡水通量(降水量减去蒸发量)与气候态均值的差异 (单位: cm/month)

Fig. 4 The TRMM precipitation in 2004 (a) and 2005 (b); difference in precipitation in 2004 (c) and 2005 (d) from that of the climatology; difference of net freshwater flux (precipitation minus evaporation) in 2004 (e) and 2005 (f) from that of the climatology (unit: cm/month)

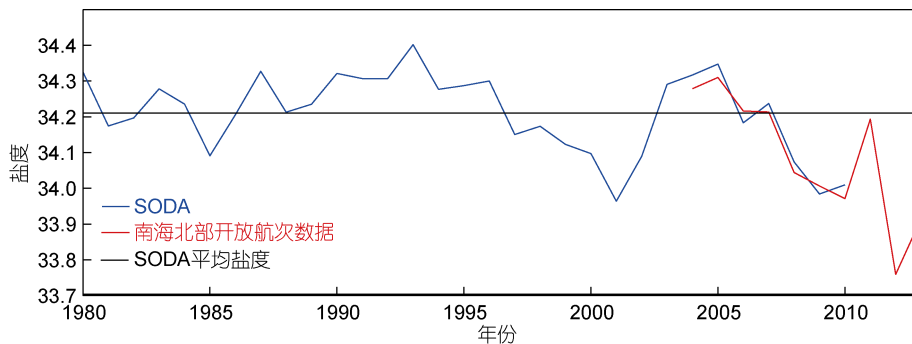


图 5 南海北部次表层盐度变化

Fig. 5 Changes in subsurface salinity over the NSCS

注: 蓝线: 1980—2010 每年 9 月的 SODA 数据; 红线: 2004—2013 年开放航次数据; 黑线: SODA 数据的平均盐度

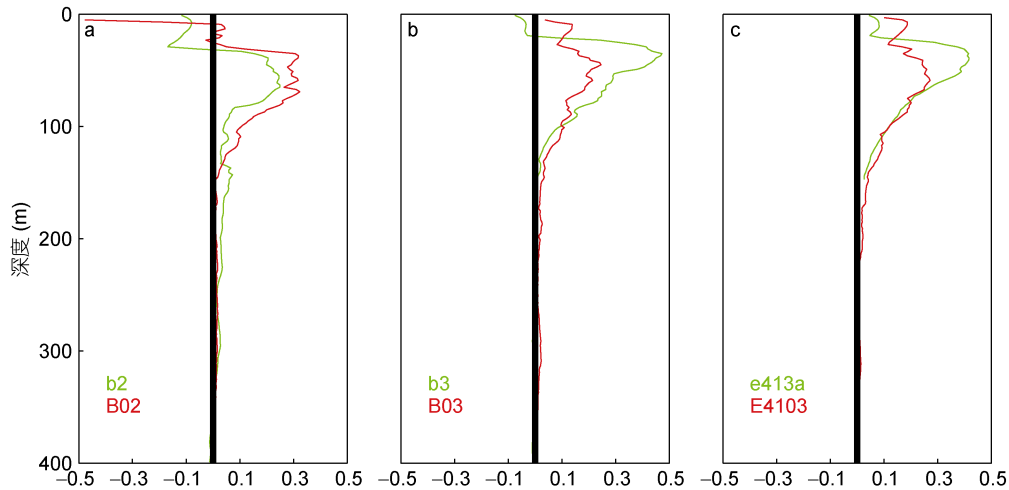


图 6 相同站位盐度随深度的变化与 WOA 气候态均值的差异

Fig.6 Difference of salinity between the observations and the WOA climatology of same stations during 2004 (green) and 2005 (red)
注: 绿色: 2004 年站位编号; 红色: 2005 年站位编号

部次表层的盐含量输入减少, 二者的总量小于气候态均值, 南海北部次表层盐度随之降低。南海北部次表层水平平流所引起的盐含量输入的变化累积量使 2005 年盐度达到最大, 为 0.09, 相比于 SODA 数据, 2005 年南海北部次表层盐度比气候态平均盐度大的 0.14 稍小了一点, 但与南海北部开放航次数据里的 2005 年南海北部次表层盐度比气候态平均

盐度大的 0.1 很接近, 表明水平平流是造成 2005 年盐度增加的主要原因, 相差那一部分盐度有可能是南海北部表面的降水、蒸发、河流径流等其他因素引起的。2001—2005 年进入南海北部次表层的盐含量运输的变化累积量逐渐增加, 这与图 5 中所显示的 2001—2005 年南海北部次表层盐度逐渐增加也是一致的。

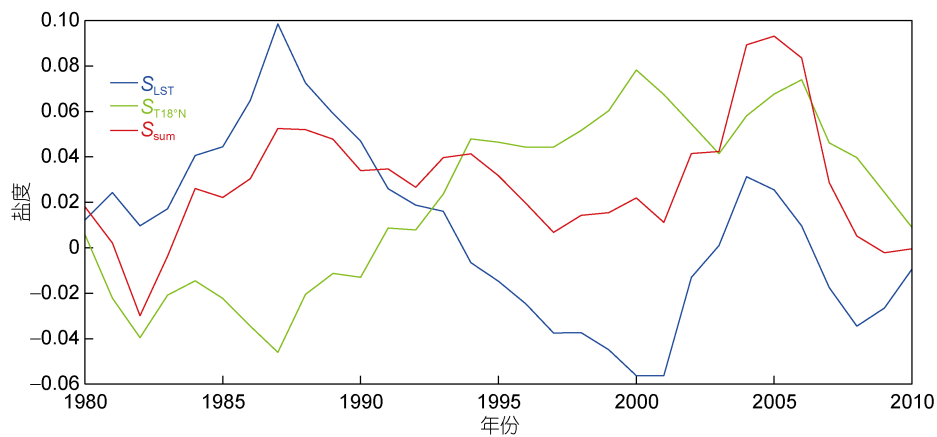


图 7 吕宋海峡盐含量运输值(蓝色), 18°N 断面盐含量运输值(绿色), 以及两者之和(红色)
Fig. 7 Salt content transport across the Luzon Strait(blue), 18°N Section(green), and their sum(red)

3 讨论

本文通过盐度收支方程, 分别计算了通过吕宋海峡和 18°N 断面对南海北部次表层的盐含量运输。研究表明, 2001—2004 年南海北部次表层盐度快速增加主要是由通过吕宋海峡的盐含量输入增强引起的, 2005 年的盐度比 2004 年略微增加是受到了通过 18°N

断面的盐含量输入增强的影响。南海南部通过巴拉巴克海峡与苏禄海联通, 由于苏禄海可形成比较浅薄的相对高盐水层, 则入侵的苏禄海水也是高盐水的来源之一(李秀珍等, 2011)。从 WOA 气候态下的 T - S 点聚图可以看出(图 3a), 黑潮水、南海北部水和苏禄海水, 三者之间具有明显的差异。次表层的黑潮水具

有高温高盐的特征, 次表层盐度为三者之间最大值, 而黑潮水的中层盐度要小于南海北部水。苏禄海水的温盐曲线并没有南海北部水和黑潮水的那种反向“S”型曲线。苏禄表层海水盐度小于黑潮水, 大于南海北部水, $22-26\sigma_0$ 密度层之间苏禄海水的盐度随着深度的增加缓慢增大, $23.5-26\sigma_0$ 密度层之间苏禄海水的盐度为三者之间最小盐度, 中层苏禄海水盐度与南海北部水大体保持一致。2004—2005 年开放航次的温盐特征曲线显示, 南海北部次表层水温盐特征介于黑潮水和南海北部水之间, 中层水与南海北部水保持一致, 在一定程度上表明 2005 年南海北部次表层盐度达到极大值主要还是由黑潮水入侵引起的。

4 结论

本文利用中国科学院南海海洋研究所在 2004—2013 年开放航次对南海北部大面积的 CTD 观测数据和 1980—2010 年 SODA 数据, 针对 2005 年南海北部次表层水体盐度出现最大值的事件进行了分析。温盐特征曲线显示, 盐度增大的现象主要发生在 150m 以浅。

2004—2005 年净淡水通量大于气候平均态, 表明净淡水通量不利于次表层水体的盐度增大。采用简化的盐度收支方程定量分析了平流对南海北部次表层盐度的影响, 研究表明, 2001—2004 年通过吕宋海峡进入南海北部次表层的盐量输入均大于气候态均值, 其中 2002 年、2004 年增量较大, 使南海北部次表层盐度迅速增大。2005 年吕宋海峡盐输入减少, 但通过 18°N 断面进入南海北部次表层的经向含盐量输入增加, 在二者的共同作用下, 使南海北部次表层水体盐度在 2005 年有略微增加, 达到极大值。平流使 2005 年南海北部次表层水体盐度比气候态均值增加了 0.09。

研究还表明, 吕宋海峡盐输运与 18°N 断面的盐输运大体呈负相关, 1980—1987 年、2001—2005 年通过吕宋海峡进入南海北部次表层的含盐量输入一般都大于气候态均值, 而通过 18°N 断面的一般都小于气候态均值; 1998—2000 年正好相反, 通过 18°N 断面进入南海北部次表层的经向含盐量输入一般都大于气候平均态, 而通过吕宋海峡的一般都小于气候平均态, 而且通过 18°N 断面的经向盐量输入变化程度一般小于通过吕宋海峡的盐量输入变化程度。后续将进一步分析盐度的时空分布特点, 以及盐度在水循环、海洋环流和全球热输运中的作用。

参 考 文 献

- 李 薇, 李 立, 刘秦玉, 1998. 吕宋海峡及南海北部海域的水团分析. 台湾海峡, 17(2): 207—213
- 李秀珍, 梁 卫, 温之平等, 2011. 南海盐度对南海夏季风响应的初步分析. 热带海洋学报, 30(1): 29—34
- Carton J A, Giese B S, 2008. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). Monthly Weather Review, 136(8): 2999—3017
- Chen G X, Hou Y J, Chu X Q, 2011. Water exchange and circulation structure near the Luzon Strait in early summer. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 29(2): 470—481
- Dale W L, 1956. Wind and drift currents in the South China Sea. Malay Trop Geogr, 8: 1—31
- Nan F, Xue H J, Chai F *et al*, 2011. Identification of different types of Kuroshio intrusion into the South China Sea. Ocean Dynamics, 61(9): 1291—1304
- Nan F, Xue H J, Chai F *et al*, 2013. Weakening of the Kuroshio intrusion into the South China Sea over the past two decades. Journal of Climate, 2013, 26(20): 8097—8110
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio. In: Stommel H, Yoshida K, eds. Kuroshio, Its Physical Aspects. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972: 129—163
- Qu T D, 2002. Evidence for water exchange between the South China Sea and the Pacific Ocean through the Luzon Strait. Acta Oceanologica Sinica, 21(2): 175—185
- Qu T D, Kim Y Y, Yaremchuk M *et al*, 2004. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? Journal of Climate, 17(18): 3644—3657
- Shaw P T, 1991. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea water into the South China Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 96(C1): 821—827
- Wang C Z, Wang W Q, Wang D X *et al*, 2006. Interannual variability of the South China Sea associated with El Niño. Journal of Geophysical Research: Oceans, 111(C3): C03023
- Wyrtki K, 1961. Scientific Results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959—1961. San Diego, USA: University of California, 164—169
- You Y Z, Chern C S, Yang Y *et al*, 2005. The South China Sea, a *cul-de-sac* of North Pacific intermediate water. Journal of Oceanography, 61(3): 509—527
- Yu K, Qu T D, Dong C M *et al*, 2015. Effect of subtropical mode water on the decadal variability of the subsurface transport through the Luzon Strait in the western Pacific Ocean. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120(10): 6829—6842
- Yu L S, Weller R A, 2007. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981—2005). Bulletin of the American Meteorological Society, 88(4): 527—539
- Zeng L L, Liu W T, Xue H J *et al*, 2014. Freshening in the South China Sea during 2012 revealed by Aquarius and in situ data. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(12): 8296—8314, doi: 10.1002/2014JC010108
- Zeng L L, Wang Q, Xie Q *et al*, 2015. Hydrographic field investigations in the Northern South China Sea by open

- cruises during 2004—2013. *Science Bulletin*, 60(6): 607—615
- Zeng L L, Wang D X, Chen J *et al*, 2016a. SCSPD14, a South China Sea physical oceanographic dataset derived from in situ measurements during 1919—2014. *Scientific Data*, 3: 160029
- Zeng L L, Wang D X, Xiu P *et al*, 2016b. Decadal variation and trends in subsurface salinity from 1960 to 2012 in the northern South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 43(23): 12181—12189

ABNORMAL HIGH SALINITY IN SUBSURFACE OF THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA OBSERVED IN THE OPEN CRUISES 2004—2005: CHARACTERISTICS AND FORMATION MECHANISM

ZHANG Bo^{1, 2, 4}, ZENG Li-Li¹, CHEN Ju¹, XIE Qiang^{1, 3, 5}, HUANG Ke¹

(1. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572099, China*; 4. *CCCC First Harbor Consultants CO., LTD, Tianjin 300222, China*; 5. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*)

Abstract Observation in the northern South China Sea (NSCS) Open Cruises during 2004 to 2013 revealed abnormal subsurface salinity in the NSCS that increased by 0.1—0.14 in 2004 and 2005 after compared with the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) data. The temperature-salinity (*T-S*) profiles show that the phenomenon occurred mostly at 150 m below surface. The net freshwater fluxes in 2004 and 2005 were higher than the climatological mean values, and they were not responsible for the salty events. In 2004, the net freshwater flux was slightly greater than the climatological mean value, while the salinity at the subsurface water that came from the Luzon Strait (LS) was significant higher than the climatological value. Therefore, we believe that salt content transported through the LS was the main reason for the abnormal high salinity at the subsurface. In addition, the salinity of the LS in 2005 was slightly lower than that in 2004, while that of the subsurface water in the NSCS was enhanced in the 18°N Transection, for which meridional salt advection should be responsible.

Key words North South China Sea; salinity anomaly; salinity budget; subsurface; Luzon Strait; 18°N transection