

文章编号: 1674-5566(2017)05-0757-09

DOI:10.12024/jso.20170101942

2015 年冬季南黄海水文特征及海-气 CO₂ 通量分析

黄菊¹, 高郭平^{1,2}, 程天宇^{1,2}, 胡登辉^{1,2}, 孙丹丹¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 大洋渔业资源可持续利用省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 基于 2015 年冬季在南黄海海域现场观测获得的 CTD 和 CO₂ 等数据, 分析了该海域海-气 CO₂ 通量, 探讨了该海域冬季温、盐度和表层 CO₂ 分压($p\text{CO}_2$)等要素的分布特征及其影响因素。结果表明: 冬季南黄海西侧海域受黄海沿岸流的影响, 呈现低温、低盐的特征, 南黄海中部受黄海暖流影响, 呈高温高盐特征; 南黄海靠近沿岸海域水体垂直混合强烈, 温盐垂直分布较为均匀。南黄海海域表层 $p\text{CO}_2$ 平均值为 $(385.34 \pm 43.62) \mu\text{atm}$ 。表层 $p\text{CO}_2$ 分布具有明显的区域差异, 海区中部 $p\text{CO}_2$ 整体上大于近岸, 因受长江冲淡水与黄海沿岸流的水平及垂直混合作用, 长江口北部局部区域最高通量达 $27.81 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 但总体表现为大气碳汇, 平均通量达 $(-2.47 \pm 3.91) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 山东半岛东南部海域较高的 $p\text{CO}_2$ 受控于温度, 同时与黄海沿岸流带来的高碳酸盐等水体的混合有关, 表现为大气碳源, 平均通量为 $(0.11 \pm 0.80) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。整个调查海域平均通量为 $(-2.24 \pm 3.74) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 表现为大气 CO₂ 的碳汇。

关键词: 南黄海; 冬季; 水文特征; 表层 $p\text{CO}_2$; 海-气 CO₂ 通量

中图分类号: P 714 **文献标志码:** A

南黄海是位于我国东部大陆和朝鲜半岛之间的半封闭海域, 受季风影响, 季节变化明显。冬季南黄海最显著的海洋特征是沿着黄海水槽一直延伸至渤海的黄海暖流, 携带高温、高盐的海水向北运输^[1]。以往研究表明, 黄海外海区受表层温度的影响显著, 在不同的季节温度与海水 $p\text{CO}_2$ 有着不同的相关关系^[2]; 张龙军等^[3]在对冬季北黄海的研究中得出表层海水 $p\text{CO}_2$ 主要受控于温度、碳酸盐体系平衡和生物活动, 胡登辉等^[4]观测表明温度和沿岸流营养物是造成黄海南部春季为大气碳汇的原因, 而秋季因温度降低及季风加强等因素成为大气碳源。可见, 南黄海海洋碳源和碳汇的分布格局季节差异显著, 水文特征的变化对其具有重要影响。海水 $p\text{CO}_2$ 也受到其他因素的作用, SHIM 等^[5]认为在近岸区长江口北部海水表层 $p\text{CO}_2$ 主要受海水混合及上升流的影响, 宋美琴等^[6]通过对黄海区域春季 $p\text{CO}_2$ 分布特征的研究, 认为海水强烈的垂直混合作用

是造成黄海成为大气 CO₂ 源区的主要原因。由于对冬季南黄海水表层 $p\text{CO}_2$ 的现场观测还较为缺乏, 对该海区 CO₂ 的源、汇问题仍认识不足。本研究通过开展该海域冬季的相关观测, 有助于分析冬季南黄海水文特征及其与海-气二氧化碳通量分布间关系, 揭示该海域的“碳汇”^[7]等特征, 同时为海洋酸化^[8]等环境问题提供参考。

1 资料来源与计算方法

1.1 研究区域划分与资料来源

本文研究资料来自于 2016 年 1 月 14 日—1 月 31 日期间, 中国海洋大学“东方红 2 号”执行的国家自然科学基金委 2015 年度冬季渤海海洋学综合科学考察实验研究项目获得的现场 CTD 及其他海洋和大气要素观测资料。该航次主要观测站位如图 1 所示, 覆盖南黄海大部分海域。本航次利用船载观测系统, 走航观测了海水表层温、盐度, 以及基于 Picarro (G2311、G2401)

收稿日期: 2017-01-11 修回日期: 2017-05-12

基金项目: 上海市科委重点支撑项目(13230502000)

作者简介: 黄菊(1995—), 男, 研究方向为物理海洋学。E-mail: 1195885452@qq.com

通信作者: 高郭平, E-mail: gpgao@shou.edu.cn

分析仪采集的海表及大气 CO_2 、 CH_4 等数据。以下研究将调查海域划分为山东半岛东南部及近岸海域 (I 区域, 范围: $36^\circ 30' \sim 37^\circ 12' \text{ N}$, $122^\circ 00' \sim 124^\circ 00' \text{ E}$)、南黄海中部海域 (II 区域, 范围: $33^\circ 00' \sim 36^\circ 30' \text{ N}$, $120^\circ 00' \sim 124^\circ 00' \text{ E}$)、长江口北部海域 (III 区域, 范围: $32^\circ 00' \sim 33^\circ 00' \text{ N}$, $122^\circ 00' \sim 123^\circ 00' \text{ E}$) 三块区域, 分别计算各个区域的海-气 CO_2 通量。

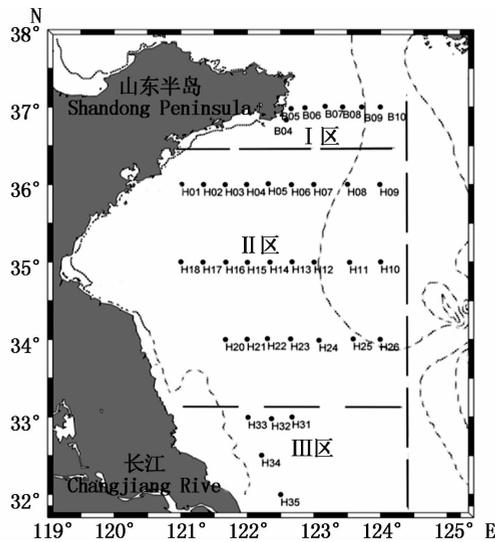


图 1 南黄海调查海区与站位分布

Fig. 1 The location of observation stations in the Southern Yellow Sea with isobaths

虚线表示等深线, 分别为 10m, 60m, 下同
the dotted lines denote the isobaths, respectively 10m and 60m, the same below

1.2 观测数据的测量精度及其质量控制

本航次水体温度和电导率剖面观测采用美国海鸟公司的 SBE911 温盐深测量仪 (船载 CTD), 测量精度分别为 $\pm 0.001^\circ \text{C}$ 和 ± 0.001 。大气和海表 $p\text{CO}_2$ 观测分别采用美国 Picarro G2311-f CO_2 CH_4 H_2O 涡动相关分析仪和 G2401 CO_2 CH_4 H_2O 分析仪。这两台仪器具有自动化程度高、响应速度快、精度高、无需干燥和数据处理等特点。海表 $p\text{CO}_2$ 观测系统主要通过水泵将海水抽进喷淋式平衡器中, 从平衡器抽出的气体经过干燥处理进入 Picarro 分析仪中来测定气体的含量, 然后使海水进入 A7CT 温盐数据采集系统来获得走航温盐数据, 该系统是由密闭水箱和两支小型自容式温盐仪 (A7CT-USB) 组成, 其水温、电导率传感器的测量精度分别为 0.001°C 和 0.001 mS/cm 。大气 $p\text{CO}_2$ 观测系统由 G2311

采集系统和 AirMar 气象站组成, 气象站安装在海面约 10 m 高度处, 该系统除了观测走航过程中大气的 CO_2 等气体浓度外, 还可以实时记录船位经纬度、大气压、大气温度、风速、风向等气象要素, 其中风速、大气压强测量精度分别为 0.1 m/s 和 $\pm 1 \text{ hPa}$ 。在航次期间, 为使观测数据具有良好的精度, 每隔 24 h 对海表和大气 $p\text{CO}_2$ 观测系统进行标定校正, 保证实测 CO_2 数据的不确定度在 $\pm 1\%$ 以内。所用的标准气体钢瓶是由中国计量科学研究院气体检测中心制备, 标准气体的浓度有 3 种, 分别为纯氮气、 0.202% 及 0.662% CO_2 气体。本航次观测校正及原始数据的转化计算过程参考翟惟东^[9]中所用的方法, 并交互验证, 细节在此不做赘述。

1.3 计算方法

海-气界面 CO_2 通量的计算, 通常利用下列公式^[10]:

$$F = 0.24 \times k \times \alpha \times \Delta p\text{CO}_2 \quad (1)$$

式中: F 为海-气 CO_2 通量 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], k 为气体交换系数 (cm/h), α 为海水中 CO_2 的溶解度 [$\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$], 是温度与盐度的函数, 温度和盐度由船载走航温盐仪提供; $\Delta p\text{CO}_2$ 为海-气界面 CO_2 的分压差 [$\Delta p\text{CO}_2 = p\text{CO}_{(2, \text{sea})} - p\text{CO}_{(2, \text{air})}$]。溶解度 α 计算公式如下^[10]:

$$\ln \alpha = A_1 + A_2 \times (100/T) + A_3 \times \ln(T/100) + S\% \times [B_1 + B_2 \times (T/100) + B_3 \times (T/100)^2] \quad (2)$$

式中: $T = t + 273.15$, t 为海表温度; S 为海表盐度, 当 α 的单位为 $\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{atm})$ 时, 常数 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ 的取值见表 1。

表 1 溶解度 α 计算公式的各项系数

Tab. 1 The coefficients of solubility α calculation formula

| A_1 | A_2 | A_3 | B_1 | B_2 | B_3 |
|-----------|----------|----------|-----------|------------|-------------|
| -58.093 1 | 90.506 9 | 22.294 0 | 0.027 766 | -0.025 888 | 0.005 057 8 |

气体交换系数 k 采用 WANNINKHOF 1992 年推断出的气体交换系数估算方法^[11]。

$$k = 0.31 \times U_{10}^2 \times \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-0.5} \quad (3)$$

式中: U_{10} 为海平面 10 米处的风速 (m/s), 风速数据由随船气象站测得; Sc 为 Schmidt 系数, 是温度的函数, $Sc = 2073.1 - 125.62t + 3.6276t^2 - 0.043219t^3$ (t 单位为 $^\circ \text{C}$)。由于大气压的变动范

围小,随船气象站采集的大气压强的平均值 1.028×10^3 hPa 作为整个海域的大气压值。

2 水文要素、表层 pCO₂ 的分布特征

2.1 温、盐度分布

研究区域表层温度和盐度分布如图 2 所示,表层温度(图 2a)范围为 2.90 ~ 11.76 °C,总体呈现出北低南高和近岸低外海高的特征,最低温度为 2.90 °C,出现在山东半岛南部海域,此区域受到黄海沿岸流的影响,水温低于其他区域;最高

为 11.76 °C,出现在南黄海中部的 H26 站(34 °N, 124 °E)附近;沿岸温度范围为 2.90 ~ 9.89 °C,中央区域温度普遍较高。在山东半岛的成山角沿岸海域,受到冬季偏北风作用的黄海沿岸流作用呈低温冷舌特征,温度在 3.00 °C 左右,其等值线沿岸平行向南弯曲,绕过海角,温度由北向南逐渐增大。冬季南黄海中央区域受到高温高盐的黄海暖流影响,中央呈显著的由南向北侵入的高温暖舌特征,水温总体在 8.00 °C 以上,最高值达到 11.76 °C。

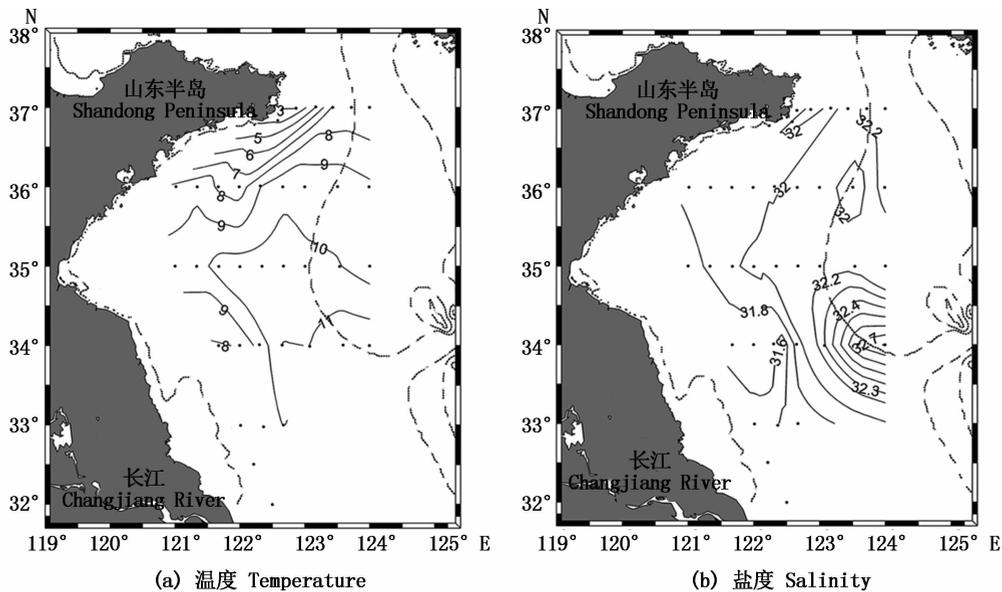


图 2 冬季表层温、盐度分布

Fig. 2 Distribution of temperature and salinity of the surface water in winter

表层盐度的分布如图 2(b),冬季研究区域盐度值在 31.41 ~ 32.81 之间,呈现沿岸低海域中部高,北部低和南部高的特征。在南黄海北部,受山东半岛的黄海沿岸流的低盐水影响,近岸区等盐线呈现与沿岸平行态势,盐度较中央水区低。受高盐黄海暖流控制,中部区域盐度值在 32.00 以上,最高达 32.81,高盐核心区域位于 34°N, 124°E 周围区域。在长江口北部苏北沿岸区域,受长江冲淡水的影响,也出现一个自南向北的低盐水舌(图 2b),最低盐度值为 31.41。

对该海域温度和盐度的垂直分布状况分析,选取 4 个纬向断面绘制温盐断面图,如图 3 所示。图 3a、c、e 和 g 分别为 34°N、35°N、36°N 和 37°N 的温度断面。各个断面垂直方向温度分布较为

均匀,呈现很好的垂直混合,而且在近岸的浅水区域水平方向温度差异也较小。在 36°N 断面, H03 站,呈现温度显著低于近岸和外海的特征,这是黄海沿岸流向外延伸的结果。图 3b、d、f 和 h 是对应的 4 个纬度上的盐度断面分布,总体特征也体现了垂直方向上的良好混合特征,但是由于不同流系及水团的差异,在该海域水平混合也很显著,如 37°N 断面。

从温盐平面分布和断面分布可以看出,研究海域冬季总体垂直混合较为显著,达到的深度超过 50 m,但是由于多个不同来源流系水体的侵袭和交互影响,从沿岸向外海呈现多个锋面的情况。

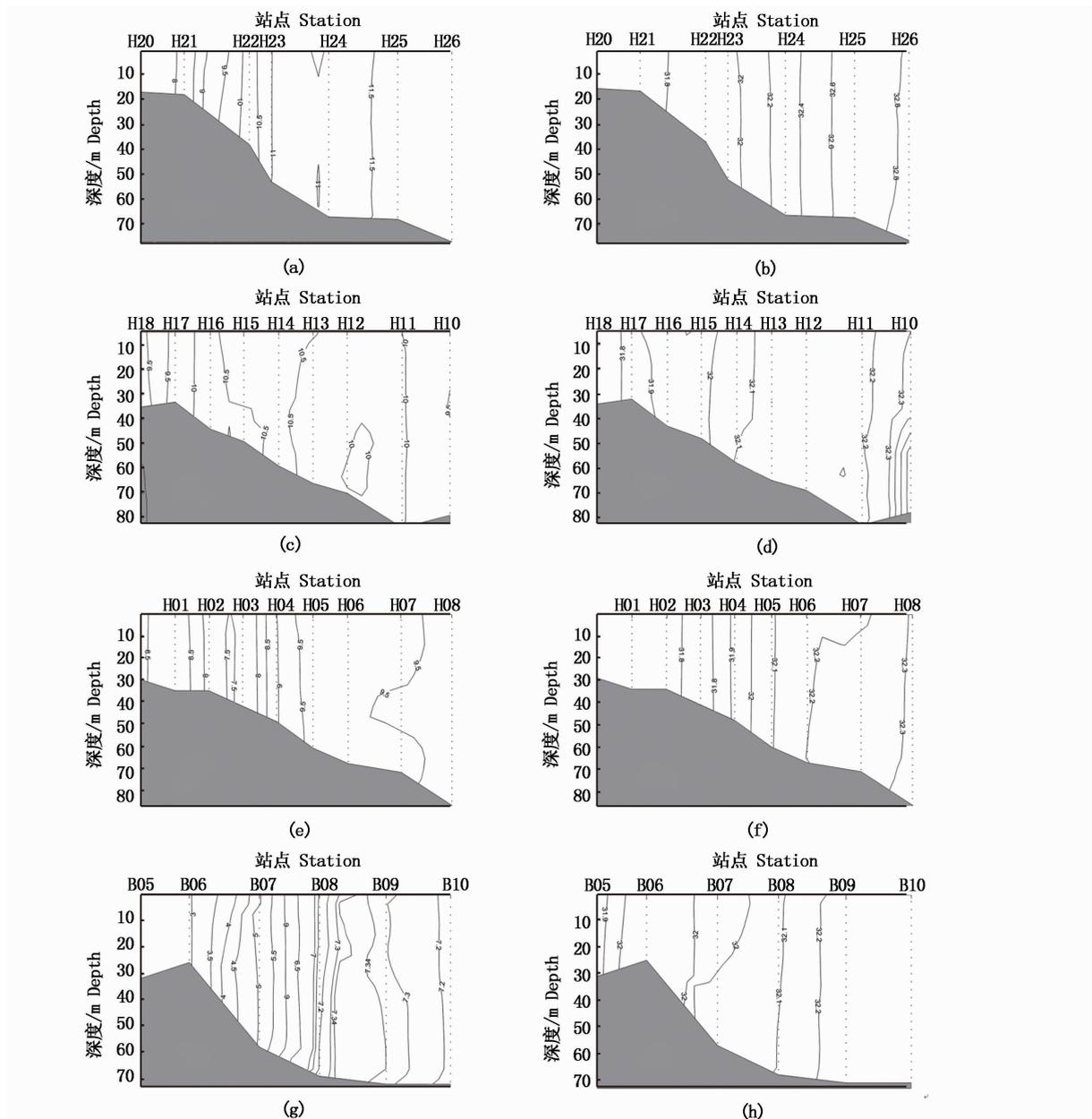


图3 断面温度盐度分布

Fig. 3 Distribution of Temperature and Salinity of Each Section

a, c, e, g 分别是 34°N、35°N、36°N 和 37°N 断面温度; b, d, f, h 分别是 34°N、35°N、36°N 和 37°N 断面盐度

a, c, e and g are temperature of 34°N, 35°N, 36°N and 37°N sections, b, d, f and h are salinity of 34°N, 35°N, 36°N and 37°N section, respectively

2.2 表层 CO₂ 源/汇分布

对冬季南黄海表层 CO₂ 分压计算结果见图 4。根据观测, 研究区域大气 pCO₂ 的平均值为 419.81 μatm, 海表 pCO₂ 在 200.10 ~ 881.72 μatm 之间, 平均值为 (385.34 ± 43.62) μatm。由图 4 可以看出, 研究海域整体表现为近岸海区温度低, 分压低; 离岸海区温度高, 分压较高。分别对 3 个区域的温度、盐度、海表 pCO₂ 及通量进行计

算和分析(表 2)。在纬度 33.5° ~ 36° 之间, 除部分区域海表 pCO₂ 较高外, 大致在 400 μatm 左右, 且随着纬度的增大, pCO₂ 有着增大的趋势。冬季南黄海海域通量范围为 (-28.31 ~ 28.41) mmol/(m² · d), 平均通量为 (-2.24 ± 3.74) mmol/(m² · d), 表现为大气弱汇。局部区域具有显著的差异, I 区域 pCO₂ 在 400 ~ 560 μatm 之间, 其中大部分区域都高于大气 CO₂ 分压, 为显

著的碳源。Ⅲ区域部分区域的高 $p\text{CO}_2$, 很大程度上与长江冲淡水及苏北沿岸流并入到黄海沿岸流形成的混合区有关^[12]。冬季长江口北部混合区水体能带来大量的有机物和无机盐, 加之冬季偏北风的作用且风向具有不确定性, 部分区域底层海水被带入到海表, 海表 $p\text{CO}_2$ 甚至达到 800 μatm 之上, 最高通量达到 27.81 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 江春波等^[13] 研究也有类似的结果, 其他区域 $p\text{CO}_2$ 在 380~400 μatm , 低于大气 $p\text{CO}_2$ 。Ⅲ区域整体表现为大气碳汇, 除了大气 CO₂ 浓度较高外, 也不排除该区域营养盐丰富, 温度较高, 浮游植物对碳吸收较大的因素, 需要进一步探究。Ⅱ区域主要受黄海暖流的作用, 近岸海水上下混合状态及温、盐度与离岸海域有着显著区别, 海表 $p\text{CO}_2$ 在 360~800 μatm 之间, 离岸表层 $p\text{CO}_2$ 较近岸高, 除部分区域 $p\text{CO}_2$ 超过 420 μatm 外, 其他区域分压在 420 μatm 之下, 离岸高 $p\text{CO}_2$ 区域与海水混合有关。图 3(c) 断面可知在 123°E 以外区域温度较低, 推测该区域存在垂直混合, 海表高 $p\text{CO}_2$ 由底层高碳酸盐水体到达表层引起。近

岸部分高 $p\text{CO}_2$ 与海水垂直混合有关。在王峰等^[14] 研究中, 认为由于生物、化学、和物理的综合作用, 南黄海表层 $p\text{CO}_2$ 的分布存在较大的不均匀性。

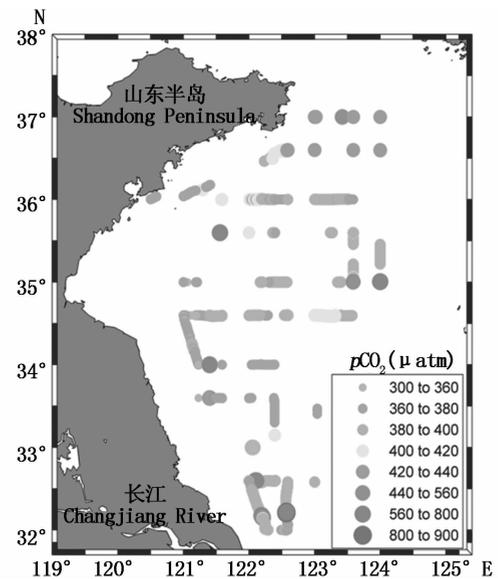


图 4 冬季南黄海表层 CO₂ 分压分布

Fig. 4 Distribution of $p\text{CO}_2$ in the Southern Yellow Sea surface water in winter

表 2 冬季 3 个海域水文要素及海-气 CO₂ 通量

Tab. 2 Hydrological elements and sea-air CO₂ fluxes in three sea areas

| 调查区域 Survey area | 温度/°C Temperature | 盐度 Salinity | $p\text{CO}_2$ / μatm | $F\text{CO}_2$ / $[\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ | 平均 $p\text{CO}_2$ / μatm Average | 平均通量 / $[\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ Average flux |
|------------------------|----------------------|----------------|-------------------------------------|---|---|---|
| 山东半岛东南部 及近岸海域 (I 区) | 7.15 ± 0.27 | 32.06 ± 0.04 | 400.65 ~ 457.74 | -2.98 ~ 4.20 | 420.30 ± 10.49 | 0.11 ± 0.80 |
| 南黄海近岸 及中部海域 (II 区) | 8.62 ± 2.30 | 31.51 ± 1.09 | 200.10 ~ 881.72 | -28.31 ~ 28.41 | 381.74 ± 37.73 | -2.30 ± 3.74 |
| 长江口北部海域 (III 区) | 9.91 ± 1.38 | 28.16 ± 1.19 | 366.99 ~ 827.63 | -15.75 ~ 27.81 | 390.38 ± 58.41 | -2.47 ± 3.91 |

3 讨论

3.1 $p\text{CO}_2$ 与温度的关系

南黄海海-气 CO₂ 的源、汇分布有着明显的季节差异, 与温度、盐度、河流输入、季风及生物活动等有着紧密的关联^[15]。海水表层 $p\text{CO}_2$ 分布的控制因素一般为物理过程、化学过程和生物过程。由于冬季水体温度低, 且水体透明度低, 浮游植物对碳的吸收弱^[16], 本研究将生物作用对表层海水 $p\text{CO}_2$ 的影响忽略, 着重探讨温度、

盐度及水体垂直混合等对海水表层 $p\text{CO}_2$ 的影响。

研究表明, 山东半岛东南部及近岸海域 (I 区域) 海表 $p\text{CO}_2$ 与温度具有强烈的正相关性, 相关系数 $r=0.84$ (图 5a)。对于南黄海近岸及中部海域 (II 区域), 该区域海表 $p\text{CO}_2$ 与温度呈正相关, 相关系数 r 仅为 0.14, 说明 II 区域海表 $p\text{CO}_2$ 与温度只是弱相关, 并不是影响源汇分布的主要因素。由于 II 区域海水与大洋水交换更加紧密, 又是黄海暖流主要作用区域, 相对于其他区域更

具有大洋水的特性。胡登辉等^[4]在对黄海南部海域的研究中利用由西北方向延伸到东南方向上的断面,得出在秋季偏北风加强的情况下,障碍层厚度薄,混合层深度较容易到达底部,生物呼吸产生的高 CO_2 海水上涌,表层 $p\text{CO}_2$ 升高,其断面表层 $p\text{CO}_2$ 在 $200 \sim 400 \mu\text{atm}$ 之间,认为垂直混合是黄海南部海域源汇分布的重要因素,本次冬季南黄海特征与该文中秋季海域特征正好相似,但在垂直方向上基本混合完全,南北温差较大,表层分压值在 $380 \sim 560 \mu\text{atm}$ 之间,与秋季相比有所增大。II 区域由于存在低温高 $p\text{CO}_2$ 的情况,温度会影响该区域,但底层高碳酸盐水体具有关键性作用。底层高 CO_2 海水持续到达表层,海水混合作为重要因素影响冬季 II 区域的源汇分布。这验证了胡登辉等^[4]对冬季情况的预测,

并且认为春季黄海南部主要受温度升高和浮游植物活动加强,表现为大气碳汇;夏季温度达到全年最高,与春季分布基本一致,由于垂直混合和上升流的作用,底层海水达到表层,整个海域表现为大气碳源。对于本研究提到同一区域在不同年份由碳源向碳汇转变的原因则在 3.3 节中重点讨论。长江口北部海域(III 区域)受到来自长江冲淡水、黄海沿岸流及台湾暖流的作用,海流活动较活跃,水动力也较为复杂。由图 5(a)得出,III 区域海表 $p\text{CO}_2$ 与温度呈现弱的负相关(相关系数 $r = -0.12$)。从热力学的角度来看,温度与 $p\text{CO}_2$ 应该呈现正相关性。所以该区域温度并不是影响该区域 $p\text{CO}_2$ 分布的主控因素,而是由其他因素导致的。

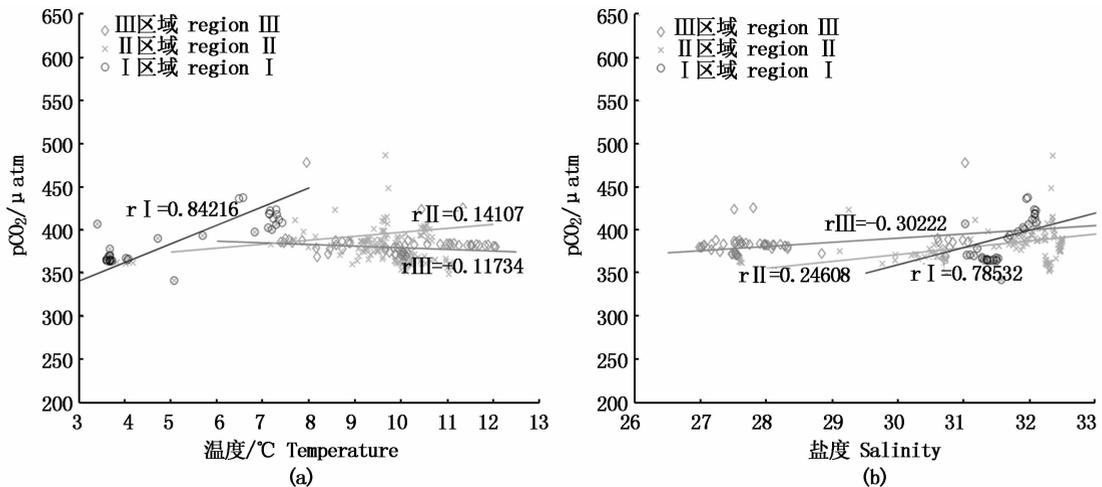


图 5 $p\text{CO}_2$ 与温度、盐度的关系

Fig. 5 Correlation between $p\text{CO}_2$, temperature and salinity

3.2 $p\text{CO}_2$ 与盐度的关系

山东半岛东南部及近岸海域(I 区域)海表 $p\text{CO}_2$ 与盐度也具有强烈的正相关性($r = 0.79$) (图 5b),一般说盐度应该与海表 $p\text{CO}_2$ 呈负相关,同时此区域盐度的波动不大(表 2),所以很大程度上温度的效应起到重要作用。以往研究表明海表 $p\text{CO}_2$ 与黄海沿岸流和黄海暖流分支交汇混合有关^[12],受偏北风的影响黄海沿岸流将莱州湾带有高碳酸盐等物质的水体输送到 I 区海域。薛亮与张龙军^[17]指出鲁北沿岸高 $p\text{CO}_2$ 主要由于底层水涌升及混合引起高碳酸盐含量的黄河泥沙再悬浮的作用。因此黄海沿岸流与北上的黄

海暖流的混合对于 I 区域的高 $p\text{CO}_2$ 分布具有重要的影响。南黄海近岸及中部海域(II 区域)与盐度表现为正相关,相关系数 $r = 0.25$ (图 5b),海表 $p\text{CO}_2$ 与盐度只是弱相关,也不是主要控制因素。结合图 3 盐度断面分布,盐度在垂直方向上除较深区域混合不充分外,其他区域都是呈现均一化的状态。胡登辉等^[4]提到黄海南部盐度季节变化不大,对源汇分布的影响并不是关键性的。III 区域海表 $p\text{CO}_2$ 与盐度表现为弱的正相关性,相关系数为 0.30 (图 5b),这说明盐度也不是主导因素。江春波等^[13]指出在长江口北部海域存在着若干个陆架锋区,陆架锋区存在着强烈的

涌升流现象,而本文观测到受冬季的强烈垂直混合作用,Ⅲ区域海水上下呈现均一化状态,长江冲淡水带来的陆源物质中含有高碳酸盐等物质,随混合从底部海水到达海面,这也表明Ⅲ区域中部分区域表现为大气显著的碳源(图4)。

综合温度、盐度与表层 CO₂ 分压关系的探究,南黄海表层 pCO₂ 分布主要受到温度、海水垂直混合影响。

3.3 大气 CO₂ 浓度对海域碳源/汇的影响

从 3.1 和 3.2 得到南黄海各个区域海表 pCO₂ 与温度、盐度的关系,但是不能解释为什么 2015 年冬季南黄海研究海域表现为大气弱汇。以往研究表明冬季南黄海为大气碳源。由于近年全球气候变暖,大气 CO₂ 浓度从 1740 年到 2000 年上升了 0.105‰。世界气象组织 2016 年 10 月 24 日在日内瓦发布公报称,2015 年全球二氧化碳平均浓度首次达到 405.76 μatm^[18]。

表 3 近年来相关海域海表及大气 pCO₂ 情况统计

Tab. 3 Analysis of sea surface and atmospheric pCO₂ of related sea area in recent years

| 来源 Source | 调查时间 Survey time | 调查区域 Survey area | 大气 pCO ₂ /μatm Air | 海水 CO ₂ /μatm Sea water |
|--------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| [19] | 2006/1 | 29.5-32.5° N 122.3-124.3° E | 384 ± 4 | 347 ± 14 |
| [20] | 2007/1 | 北黄海 | 380 | 408 |
| [21] | 2008/1 | 25-32° N 120-127° E | 388 ± 12 | 342 |
| [22] | 2009/2 | 31.5-34° N 124-127.5° E | 384.7 ± 3.1 | 335 |
| [2] | 2010/11 | 南黄海 | / | 393 |
| 本研究 | 2016/1 | 南黄海 | 419.81 | 385.34 ± 43.62 |

本研究测得 2016 年南黄海 1 月份大气二氧化碳分压在 419.81 μatm,受我国冬季北方大量燃烧化石燃料的影响,在冬季强烈的偏北风作用下,近海大气 CO₂ 与全球大气平均 CO₂ 浓度相比较。近年来大气和海表 pCO₂ 分压情况如表 3 所示,王婧婧^[20] 对北黄海的研究中利用 2007 年 1 月的数据指出大气 pCO₂ 约为 380 μatm,海表平均 pCO₂ 为 408 μatm。曲宝晓^[2] 指出南黄海 11 月份海表 pCO₂ 平均为 393 μatm。由表 3 看出海表 pCO₂ 的大小基本维持在一定的范围,大气 CO₂ 浓度上升却是迅速的,其中大气 CO₂ 浓度对海水 pCO₂ 的理化性质改变情况需要进一步研究。长江口北部虽然海表 pCO₂ 主要受到海水混合的影响,但是大气 pCO₂ 比海表分压要高的多,仍表现为大气碳汇。整个研究海域大气 pCO₂ 普遍高于海表 pCO₂,因此大气 CO₂ 浓度的上升是造成 2015 年冬季南黄海是碳汇的主要原因。

4 小结

利用冬季南黄海海域走航观测的海表及大气 CO₂ 数据,结合船载 CTD 获取的温度、盐度等实测数据,对该海域温度、盐度及 pCO₂ 分布情况

进行了分析,计算出海-气 CO₂ 通量,探讨了影响碳源/汇分布的因素。结果表明,冬季南黄海近岸受到低温、低盐的黄海沿岸流影响,海域温度、盐度低;中部海区受到黄海暖流的影响,温盐等值线由南向北弯曲。除水深较深区域外,其余海域水体垂直方向上呈现均一化状态。海表 pCO₂ 整体呈现出中部海域高于近岸的分布特征。冬季表层 pCO₂ 分布具有明显的区域差异,山东半岛东南部及近岸海域(Ⅰ区域)海表 pCO₂ 受控于温度及黄海沿岸流与黄海暖流的混合,表现为大气弱源,平均通量大小为(0.11 ± 0.80) mmol/(m² · d)。南黄海近岸及中部海域(Ⅱ区域)海表 pCO₂ 不受控于温度与盐度,受控于海水的垂直混合,表现为大气碳汇,平均通量为(-2.30 ± 3.74) mmol/(m² · d)。长江口北部海域(Ⅲ区域)海表 pCO₂ 主要受控于长江冲淡水与黄海沿岸流水体水平及垂直方向上的海水混合,表现为大气碳汇,平均通量为(-2.47 ± 3.91) mmol/(m² · d)。冬季南黄海海-气 CO₂ 平均通量为(-2.24 ± 3.74) mmol/(m² · d),受温度及海水混合等多种因素的共同作用。不同年份同一区域冬季由碳源向碳汇转变的主要原因与大气 CO₂

浓度的上升使得大气 $p\text{CO}_2$ 高于海表 $p\text{CO}_2$ 有关, 表现为大气碳汇。

本文所用数据是搭载中国海洋大学“东方红 2”科考船执行国家自然科学基金委员会 2015 年冬季黄渤海开放共享航次获得, 对全体船员和考察队员的支持和帮助表示感谢, 国家海洋局第二研究所许建平研究员对本文研究提出大量宝贵建议, 在此谨表谢忱! 本研究得到上海市海洋科学高原学科本科生进实验室计划的支持。

参考文献:

- [1] 刁新源. 黄海暖流、黄海冷水团及其春季演变过程研究 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
DIAO X Y. The study of Yellow Sea warm current, Yellow Sea cold water mass and their evolution process in spring [D]. Qingdao: Chinese Academy of Sciences (Institute of oceanology), 2015.
- [2] 曲宝晓. 黄东海碳源汇的季节与区域变化特征及控制因素解析 [D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
QU B X. Carbon chemistry parameters and air-sea CO_2 flux in the Yellow Sea and the East China Sea: variations and controls [D]. Qingdao: Chinese Academy of Sciences (Institute of oceanology), 2015.
- [3] 张龙军, 王婧婧, 张云, 等. 冬季北黄海表层海水 $p\text{CO}_2$ 分布及其影响因素探讨[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(6): 955-960.
ZHANG L J, WANG Q Q, ZHANG Y, et al. Distribution and controlling factors of surface seawater partial pressure of CO_2 in the Northern Yellow Sea during winter[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(6): 955-960.
- [4] 胡登辉, 高郭平, 翟惟东, 等. 东海及黄海南部海域走航海-气 CO_2 通量季节性变化[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(4): 474-485.
HU D H, GAO G P, ZHAI W D, et al. Seasonal variability of shipboard air-sea CO_2 flux in the East China Sea and South Yellow Sea[J]. Advances In Marine Science, 2016, 34(4): 474-485.
- [5] SHIM J, KIM D, KANG Y C, et al. Seasonal variations in $p\text{CO}_2$ and its controlling factors in surface seawater of the northern East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(20): 2623-2636.
- [6] 宋美芹, 张龙军, 江春波. 初春(3月)黄海水体垂直混合和生物活动对水-气界面 $p\text{CO}_2$ 分布的控制作用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(s1): 67-72.
SONG M Q, ZHANG L J, JIANG C B. The distribution of partial pressure of CO_2 and its maintaining mechanism: vertical mixing versus biological activity in the Yellow Sea in early spring [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(s1): 67-72.
- [7] 徐小锋, 宋长春. 全球碳循环研究中“碳失汇”研究进展 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(2): 145-152.
XU X F, SONG C C. Advances of the research on missing sink in global carbon cycling [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2004, 21(2): 145-152.
- [8] 汪思茹, 殷克东, 蔡卫君, 等. 海洋酸化生态学研究进展 [J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5859-5869.
WANG S R, YIN K D, CAI W J, et al. Advances in studies of ecological effects of ocean acidification [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5859-5869.
- [9] 翟惟东. 南海北部春季非水华期的 CO_2 分压及其调控 [J]. 海洋学报, 2015, 37(6): 31-40.
ZHAI W D. Sea surface partial pressure of CO_2 and its controls in the northern South China Sea in the non-bloom period in spring [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(6): 31-40.
- [10] WEISS R F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas [J]. Marine Chemistry, 1974, 2(3): 203-215.
- [11] WANNINKHOF R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1992, 97(C5): 7373-7382.
- [12] 孙湘平. 中国近海区域海洋 [M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
SUN X P. China Coastal Area [M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.
- [13] 江春波, 张龙军, 王峰. 南黄海夏季海水 $p\text{CO}_2$ 研究 II-下层海水涌升和长江冲淡水对海-气界面 CO_2 通量的贡献 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(s1): 147-152.
JIANG C B, ZHANG L J, WANG F. A study of partial pressure of CO_2 in the surface water of the Southern Yellow Sea in summer II: the respective contribution of the upwelling and the Yangtze river diluted water to the air-sea of CO_2 flux [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(s1): 147-152.
- [14] 王峰, 张龙军, 张经. 南黄海夏季表层海水中 $p\text{CO}_2$ 分布的初步探讨 [J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2002, 32(6): 1007-1011.
WANG F, ZHANG L J, ZHANG J. A preliminary study of partial pressure of CO_2 in the surface water of the Southern Yellow Sea in summer [J]. Periodical of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(6): 1007-1011.
- [15] BAI Y, CAI W J, HE X, et al. A mechanistic semi-analytical method for remotely sensing sea surface $p\text{CO}_2$ in river-dominated coastal oceans: a case study from the East China Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(3): 2331-2349.
- [16] GONG G C, WEN Y H, WANG B W, et al. Seasonal variation of chlorophyll a concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies In

- Oceanography, 2003, 50(6/7): 1219-1236.
- [17] 薛亮,张龙军. 北黄海夏季 $p\text{CO}_2$ 分布及海-气 CO_2 通量 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2011, 41(12): 22-29.
- XUE L,ZHANG L J. Surface $p\text{CO}_2$ and sea-air CO_2 flux in the Northern Yellow Sea during summer [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(12):22-29.
- [18] 佚名. 2015 年全球二氧化碳平均浓度创新高[J]. 低温与特气, 2016(5): 52-52.
- Anonymous . the average global concentration of carbon dioxide high [J]. Low Temperature And Special Gas , 2016 (5):52-52.
- [19] ZHAI W D,DAI M H. On the seasonal variation of air-sea CO_2 fluxes in the outer Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea [J]. Marine Chemistry, 2009, 117(1/4): 2-10.
- [20] 王婧婧. 冬季北黄海表层海水 $p\text{CO}_2$ 分布及其控制机制探讨 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- WANG Q Q. Distribution and controlling factors of surface seawater partial pressure of CO_2 in the Northern Yellow Sea during winter [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [21] CHOU W C,GONG G C, TSENG C M, et al. The carbonate system in the East China Sea in winter [J]. Marine Chemistry, 2011, 123(1/4): 44-55.
- [22] KIM D,CHOI S H, SHIM J H, et al. Revisiting the seasonal variations of sea-air CO_2 fluxes in the Northern East China Sea [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2013, 24(3): 409-419.

Hydrological features and air-sea CO₂ fluxes of the Southern Yellow Sea in the winter of 2015

HUANG Ju¹, GAO Guoping^{1,2}, CHENG Tianyu^{1,2}, HU Denghui^{1,2}, SUN Dandan¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper summarized the characteristics of the temperature, salinity, surface CO_2 partial pressure ($p\text{CO}_2$) and sea-air CO_2 flux based on the in-situ CTD, CO_2 and others data in the South Yellow Sea during the winter of 2015. The results indicated that the west coast of the Yellow Sea was low temperature and low salt, affected by Yellow Sea Coastal Current. The central part of the southern Yellow Sea was high temperature and high salt, affected by the Yellow Sea Warm Current. In the coast, it was well mixed with generalized temperature and salinity in vertical. The average value of surface $p\text{CO}_2$ was $(385.34 \pm 43.62) \mu\text{atm}$. The distribution of surface $p\text{CO}_2$ had obvious regional differences. In the central sea, the $p\text{CO}_2$ was larger than that of the nearshore. Due to horizontal and vertical mixture of the Yangtze River water and the Yellow Sea Coastal Current, the northern part of the Changjiang River Estuary was atmospheric carbon sink where the maximum flux was $27.81 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. However, overall regional average flux was $(-2.47 \pm 3.91) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. The higher $p\text{CO}_2$ in the southeastern of Shandong Peninsula controlled by the cold water, correlated to mixture of the high carbonate water brought by the Yellow Sea Coastal Current and the average flux was $(0.11 \pm 0.80) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. The winter mean flux in the Southern Yellow Sea was $(-2.24 \pm 3.74) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, which was carbon sink of the atmospheric CO_2 .

Key words: Southern Yellow Sea; winter; hydrological features; surface $p\text{CO}_2$; air-sea CO_2 flux