

马玉, 廖世智, 李锐祥, 等. 夏季琼州海峡表层海水二氧化碳分压时空变化[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 110–118, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.12.012

Ma Yu, Liao Shizhi, Li Ruixiang, et al. Spatiotemporal variations of partial pressure of carbon dioxide in surface sea water in the Qiongzhou Strait in summer[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(12): 110–118, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.12.012

夏季琼州海峡表层海水二氧化碳分压时空变化

马玉^{1,2}, 廖世智^{1,2}, 李锐祥^{1,2}, 蔡钰灿^{1,2}, 曹永港^{1,2},
许春玲^{1,2}, 史华明^{1,2}, 王迪^{1,2}, 许欣^{1,2}

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510300; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 采用船载海-气 CO₂ 连续观测系统于 2011 年和 2014 年夏季在琼州海峡开展了现场观测, 分析了表层海水二氧化碳分压 (*p*CO₂) 时空变化及其影响因子。2011 年和 2014 年夏季 *p*CO₂ 分别为 (516±29) μatm 和 (533±15) μatm, 海-气 CO₂ 交换通量分别为 (8.4±1.7) mmol/(m²·d) 和 (4.5±0.4) mmol/(m²·d), 均是大气 CO₂ 的强源, 高于相邻及相似海域, 主要受控于东口海域上升流和海峡中部狭管效应。2011 年夏季东口上升流增大 *p*CO₂ 的同时也促进了浮游植物繁殖, 光合作用吸收水体 CO₂, 降低了 *p*CO₂, 而且受其影响, 西口口门附近叶绿素 *a* 和溶解氧含量陡增, *p*CO₂ 突降。2014 年夏季东口海域上升流较弱, 且观测海域垂直混合作用显著, *p*CO₂ 和溶解氧分布特征与 2001 年夏季明显不同。海峡中部狭管效应造成水体输运速率大、混合作用强, 浮游植物“来不及”生长, *p*CO₂ 较高。

关键词: 琼州海峡; 二氧化碳分压; 上升流; 狭管效应

中图分类号: P734.2²

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)12-0110-09

1 引言

占地球表面积 71% 的海洋是碳的主要贮存库, 是阻缓大气 CO₂ 上升的最大缓冲体系, 是维持全球大气和气候稳定的最主要因素之一。海洋是大气 CO₂ 的“汇”, 共吸收了工业革命以来人类排放 CO₂ 总量的 40% 左右, 从而减缓了大气 CO₂ 含量上升和气温升高。边缘海虽仅占全球海洋面积的 7%~8%, 却在全球海洋碳循环中发挥重要作用^[1-2]。首先, 边缘海的初级生产力占全球海洋的 15%~30%, 有机物埋藏占全球海洋的 80%^[3-4]; 其次, 近岸及陆架海域是海洋、大气、陆地生态系统及河流碳交换的“桥梁”^[5], 并向大洋输出大量有机碳; 另外, 全球 60% 的人口居住在距离海岸线 100 km 以内的沿岸地区, 人类活动向近海输入了大量营养物质和有机颗粒物^[6]。因此边缘海

碳循环受到全球学者关注^[7-9]。

南海, 特别是南海北部海-气 CO₂ 交换通量及碳循环备受关注^[10-13]。琼州海峡东接南海北部, 西连北部湾, 是南海北部与北部湾水交换和物质运输的重要通道。海峡东部的广东粤西沿岸流和珠江径流对北部湾水体有重要影响, 北部湾冷水团的生成也与琼州海峡水交换有着密切关系^[14]。然而, 有关琼州海峡海-气 CO₂ 交换通量的研究成果却鲜有报道, 本文在开展现场观测的基础上, 分析夏季琼州海峡 *p*CO₂ 和海-气 CO₂ 交换通量的时空变化, 探讨研究其影响因子。

2 材料与方法

2.1 研究区域

琼州海峡长约 80 km, 平均宽约 30 km, 位于 19°52'~20°31'N, 109°25'~110°41'E。结合以往研

收稿日期: 2020-03-17; 修订日期: 2020-07-24。

基金项目: 海洋观测预报与防灾减灾(2200128)。

作者简介: 马玉(1982—), 男, 安徽省亳州市人, 博士, 高级工程师, 从事海洋生物地球化学研究。E-mail: 362005949@qq.com

究成果和本文观测及分析结果,经向将琼州海峡大致分为3个区域,即西口(109.50°~110.00°E)、海峡中部(110.00°~110.65°E)和东口(110.65°~111.00°E)(图1)。近40年的海洋水文资料揭示琼州海峡水体输运方向终年向西,即由南海北部进入北部湾^[15],且被多次验证^[16-17]。虽然琼州海峡潮流和余流净通量均自东向西^[18-19],但琼州海峡涨落潮流速大,潮流作用强劲,一个完整的自西向东涨落潮周期足以将低盐北部湾水体自西口输送至东口。为求证观测期间潮流流向,本文建立了数学计算模型,模拟计算结果表明2011年和2014年8月(夏季)观测期间潮流流向均自东向西。

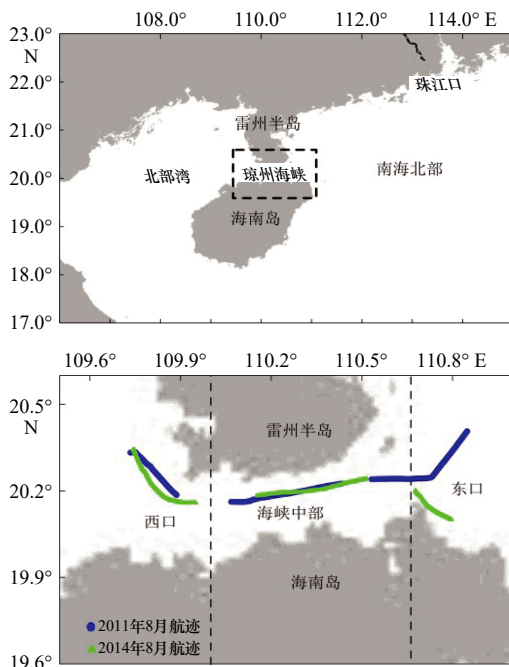


图1 琼州海峡位置与观测航迹

Fig. 1 Location of Qiongzhou Strait and ship-track for the continuous measurements

2.2 现场观测

2011年和2014年夏季采用船载海-气 CO_2 连续观测系统(GO8050)采集表层海水 $p\text{CO}_2$ 和大气 $p\text{CO}_2$ ($p\text{CO}_{2a}$)数据, CO_2 标准气体(中国气象科学研究所生产,确定度小于0.3%)校准观测系统。取水泵不间断从竖井抽取海水样品,高流量输送至实验室,观测系统水-汽平衡器内水温与原位水温差别小于 0.2°C 。大气采样位置设置在船顶层,远离船舶烟囱和人为活动等污染源。生态环境要素采用温盐传感器(SBE21)、溶解氧传感器(Oxygen Optode 3835)和多参数水质仪(YSI6600)同步观测,并开展互校。气象要素采用车载自动气象仪(XZC5-1)观测。

2.3 通量估算

水-汽平衡器 $p\text{CO}_2$ 采用Weiss和Price饱和水汽压公式计算^[20],温度效应校准公式为: $Np\text{CO}_2 = p\text{CO}_2 \times \exp\{0.0423(\text{SST}_{\text{mean}} - \text{SST})\}$, SST_{mean} 是航次表层水温平均值, $Np\text{CO}_2$ 是航次平均表层水温时的 $p\text{CO}_2$ 。海-气 CO_2 交换通量(F)估算公式为 $F = k \times s \times \Delta p\text{CO}_2$, $k = 0.27u^2 \times (Sc/660)^{-0.5}$ ^[21], k 是 CO_2 气体传输速率, u 为观测期间10 m平均风速, s 是 CO_2 在海水中的溶解度, Sc 是 CO_2 在某一温度下海水($S=35$)中的施密特常数^[22], $\Delta p\text{CO}_2$ 是海-气 CO_2 分压差,即 $p\text{CO}_2 - p\text{CO}_{2a}$ 。若通量 F 为负值,表示海洋从大气中吸收 CO_2 ;反之,则表示海洋向大气中释放 CO_2 。

3 结果与讨论

3.1 $p\text{CO}_2$ 和生态环境要素的时空变化

2011年夏季观测期间SST最小值为 27.36°C ,最大值为 31.42°C ,平均值为 $(29.46 \pm 1.26)^\circ\text{C}$;2014年夏季观测期间SST最小值为 28.85°C ,最大值为 31.44°C ,平均值为 $(30.56 \pm 0.69)^\circ\text{C}$ (表1)。两个航次SST均呈现自东口到西口逐渐升高的趋势(图2a,图2g),主要因为观测船舶均是早上8时前后从东口起航,穿过海峡中部,至下午15时前后在西口结束,整个观测过程中气温在逐渐升高,SST也随之升高。2011年夏季琼州海峡表层盐度(SSS)介于 $32.22 \sim 33.58$,平均值为 32.72 ± 0.48 ;2014年夏季SSS介于 $32.11 \sim 32.87$,平均值为 32.36 ± 0.21 (表1),两个航次SSS最大值均位于东口海域,呈现自东口向西口逐渐降低的趋势,且2011年夏季SSS整体大于2014年夏季(图2b,图2h)。

2011年夏季DO和叶绿素 a 含量范围分别为 $194.8 \sim 252.0 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.5 \sim 4.6 \mu\text{g/L}$,平均含量分别为 $(207.8 \pm 10.4) \mu\text{mol/L}$ 和 $(1.1 \pm 0.8) \mu\text{g/L}$ 。2014年夏季DO和叶绿素 a 含量范围分别为 $184.9 \sim 202.9 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.6 \sim 1.7 \mu\text{g/L}$,平均含量为 $(194.4 \pm 4.4) \mu\text{mol/L}$ 和 $(1.0 \pm 0.2) \mu\text{g/L}$ (表1)。2011年夏季东口和西口海域DO与叶绿素 a 含量较高,海峡中部较低(图2c,图2d)。

2011年夏季 $p\text{CO}_2$ 变化范围为 $436 \sim 549 \mu\text{atm}$,平均值为 $(516 \pm 29) \mu\text{atm}$, $p\text{CO}_{2a}$ 平均值为 $(378 \pm 4) \mu\text{atm}$, $\Delta p\text{CO}_2$ 为 $138 \mu\text{atm}$ 。2014年夏季 $p\text{CO}_2$ 变化范围为 $502 \sim 557 \mu\text{atm}$,平均值为 $(533 \pm 15) \mu\text{atm}$, $p\text{CO}_{2a}$ 平均值为 $(380 \pm 6) \mu\text{atm}$, $\Delta p\text{CO}_2$ 为 $153 \mu\text{atm}$ (表1)。2011年和2014年夏季琼州海峡东口和西口 $p\text{CO}_2$ 均呈现低值,海峡中部 $p\text{CO}_2$ 较高(图2e,图2f,图2k,图2l)。

3.2 海-气 CO_2 交换通量

2011年和2014年夏季琼州海峡海-气 CO_2 交换通量

表 1 2011 年和 2014 年夏季 $p\text{CO}_2$ 、 NpCO_2 、 $p\text{CO}_{2a}$ 、 $\Delta p\text{CO}_2$ 、SST、SSS、DO 含量、叶绿素 a 含量、平均风速和海-气 CO_2 交换通量的统计结果

Table 1 Summary of $p\text{CO}_2$, NpCO_2 , $p\text{CO}_{2a}$, SST, SSS, DO content, chlorophyll a content, average wind speed and sea-air CO_2 flux estimation in summer 2011 and 2014

观测时间	观测海域	$p\text{CO}_2$ / μatm	NpCO_2 / μatm	$p\text{CO}_{2a}$ / μatm	$\Delta p\text{CO}_2$ / μatm	SST/ $^{\circ}\text{C}$	SSS	DO 含量 / $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	叶绿素 a 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	平均风速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	海-气 CO_2 交换通量 / $\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
2011 年夏季	琼州海峡	436~549	411~575	378±4	138	27.36~31.42	32.22~33.58	194.8~252.0	0.5~4.6	5.3±1.9	8.4±1.7
		516±29	517±40			29.46±1.26	32.72±0.48	207.8±10.4	1.1±0.8		
	东口	436~527	458~575	380±6	113	27.36~28.43	33.27~33.58	195.0~235.6	0.7~3.4	3.7±1.6	6.7±1.8
		491±30	527±37			27.80±0.27	33.44±0.11	209.0±12.0	1.9±0.9		
	海峡中部	528~549	529~575	380±6	164	27.44~30.19	32.30~33.32	194.8~205.4	0.5~1.2	5.3±1.9	9.9±0.4
		542±5	547±12			29.26±0.71	32.69±0.28	200.6±2.6	0.6±0.1		
西口	441~522	411~496	380±6	123	30.57~31.42	32.22~33.29	209.0~252.0	0.6~4.6	5.3±1.9	7.5±1.0	
	501±16	472±18			30.89±0.17	32.26±0.02	216.4±8.6	1.3±0.8			
2014 年夏季	琼州海峡	502~557	489~589	380±6	153	28.85~31.44	32.11~32.87	184.9~202.9	0.6~1.7	3.7±1.6	4.5±0.4
		533±15	534±29			30.56±0.69	32.36±0.21	194.4±4.4	1.0±0.2		
	东口	539~557	569~589	380±6	169	28.85~29.98	32.51~32.87	184.9~192.4	1.0~1.7	3.7±1.6	5.0±0.2
		549±6	578±6			29.31±0.26	32.76±0.09	198.3±2.4	1.2±0.2		
	海峡中部	526~551	515~561	380±6	161	30.12~31.04	32.22~32.47	190.9~195.0	0.6~1.2	3.7±1.6	4.8±0.2
		541±7	542±13			30.52±0.26	32.35±0.07	192.2±1.0	0.9±0.2		
西口	502~525	489~510	380±6	137	30.05~31.44	32.11~32.25	196.2~202.9	0.6~1.7	3.7±1.6	4.1±0.2	
	517±6	503±6			31.17±0.07	32.19±0.04	199.4±1.8	1.0±0.3			

分别为 $(8.4\pm 1.7)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $(4.5\pm 0.4)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 均是大气 CO_2 强源, 高于南海北部 $(-0.6\pm 1.1)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和南海盆地 $0\sim 1.9\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ^[23], 也高于东海 $(-4.9\pm 1.7)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和南黄海 $(1.56\pm 0.37)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ^[24-25], 仅与南海南部海-气 CO_2 交换通量 $0.3\sim 5.5\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 相近^[26]。台湾海峡、英吉利海峡和直布罗陀海峡最大源强均明显低于琼州海峡, 分别为 $0.1\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $1.68\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $3\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ^[27-30]。

2011 年夏季琼州海峡中部 CO_2 源强为 $(9.9\pm 0.4)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 东口和西口海域分别为 $(6.7\pm 1.8)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $(7.5\pm 1.8)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。2014 年夏季东口海域 CO_2 源强最大, 为 $(5.0\pm 0.2)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 海峡中部和西口海域源强分别为 $(4.8\pm 0.2)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 和 $(4.1\pm 0.2)\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

3.3 东口海域上升流的影响

由 3.1 节和 3.2 节的分析结果可知, 琼州海峡 $p\text{CO}_2$ 和海-气 CO_2 交换通量显著高于相邻及相似海域。夏季琼州海峡东部是上升流控制区, 附近海域水体低温高盐, 且低温中心 SST 比周围海域低 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ ^[31-32]。两个航次观测期间琼州海峡东口海域均低温高盐, 且

2011 年夏季更为显著(图 2a, 图 2b)。上升流促使富含 CO_2 的底层水体向上涌升至表层, 增大水体 CO_2 含量, 使得表层 $p\text{CO}_2$ 升高^[33], 进而影响 $p\text{CO}_2$ 和海-气 CO_2 交换通量的分布。上升流除增大东口海域 $p\text{CO}_2$ 外, 富含 CO_2 的水体自东向西输运, 使得琼州海峡 $p\text{CO}_2$ 整体较高, 是琼州海峡 $p\text{CO}_2$ 显著高于相邻及相似海域的主要影响因子之一。

另一方面, 2011 年夏季东口海域 SSS 与 NpCO_2 呈显著负相关, 与 DO 含量呈显著正相关(图 3a, 图 3b), 而且 DO 含量与 NpCO_2 呈显著负相关、与叶绿素 a 含量呈显著正相关(图 3c, 图 3d)。水体叶绿素 a 和 DO 含量升高、 $p\text{CO}_2$ 降低的现象是浮游植物繁殖控制 $p\text{CO}_2$ 的标志之一^[34]。上升流在增大 $p\text{CO}_2$ 的同时, 其携带的营养物质促进了浮游植物繁殖, 浮游植物光合作用吸收水体 CO_2 、释放 O_2 , 消耗了少量的涌升水体携带的 CO_2 。2014 年夏季东口海域无叶绿素 a 和 DO 含量明显升高、 $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 也无明显降低现象(图 2k, 图 2l), 且 NpCO_2 与 SSS 和 DO 含量相关性弱(图 4a, 图 4c), 均与 2011 年夏季明显不同。主要是因为: (1) 2014 年夏季东口和海峡中部 SSS 均低于

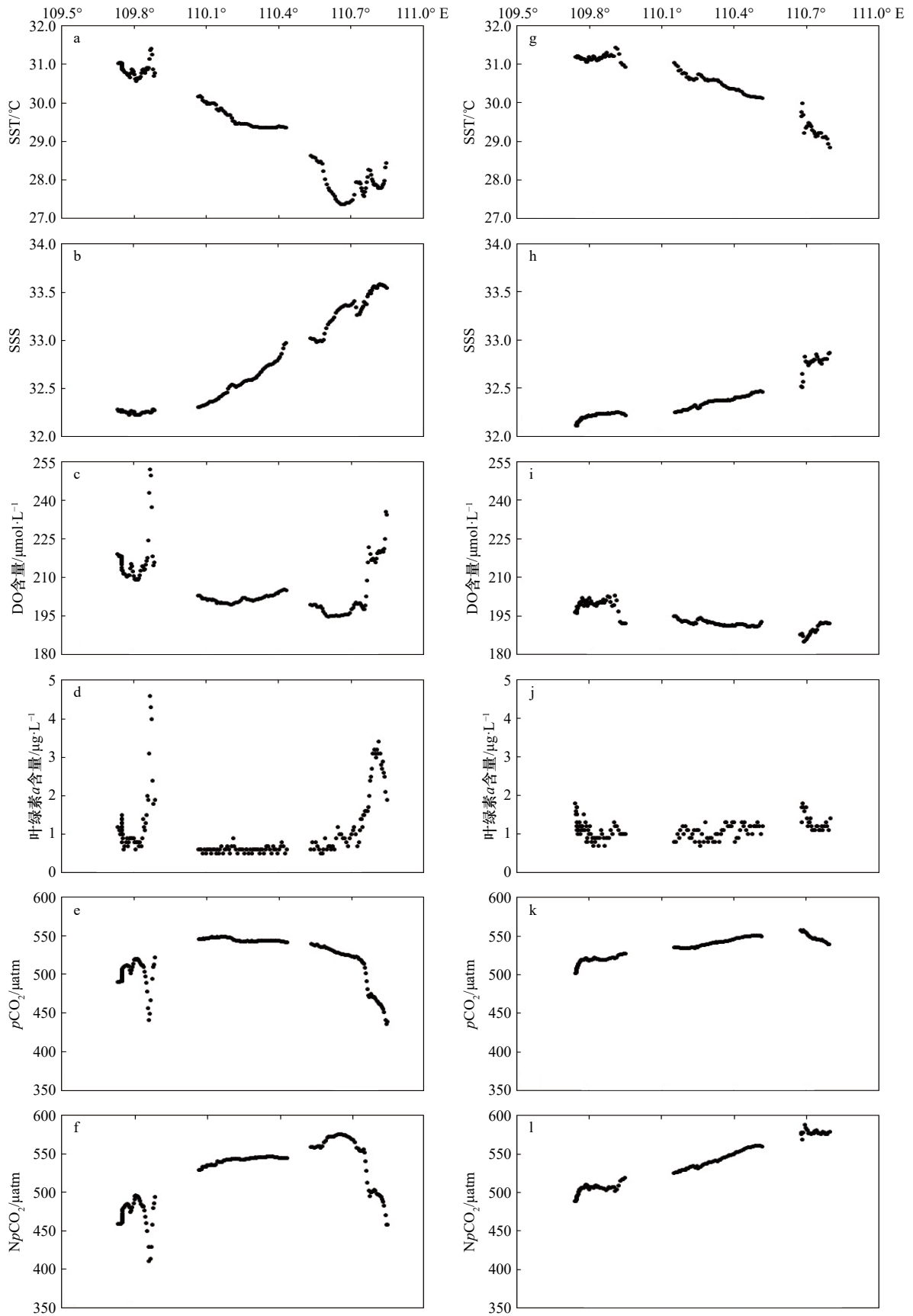


图2 $p\text{CO}_2$ 、 $Np\text{CO}_2$ 、SST、SSS、DO含量和叶绿素a含量的经向分布(a-f. 2011年夏季, g-l. 2014年夏季)

Fig. 2 Longitudinal variations in $p\text{CO}_2$, $Np\text{CO}_2$, SST, SSS, DO content and chlorophyll a content in surface sea water (a-f was in summer 2011 and g-l was in summer 2014)

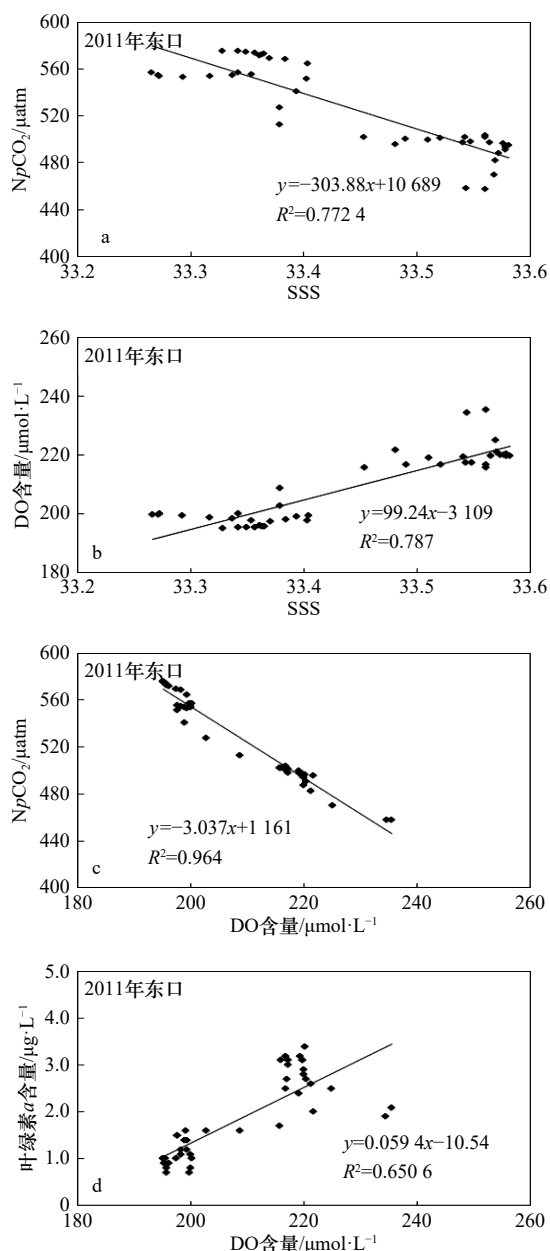


图3 2011年夏季东口海域观测要素关系

Fig. 3 Diagram of correlation between observation factors in the east mouth in summer 2011

2011年夏季(图2b, 图2h), 说明上升流较弱;(2)与2011年夏季不同, 东口海域观测航迹主要位于海南岛东北角附近(图1), 离上升流中心相对较远^[35], 上升流所引起的生态效应小;(3)海南岛东北角海域水体垂直混合作用显著^[36], 垂直混合破坏了上升流结构, 进一步削弱了上升流的生态效应。

2011年夏季 $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 在西口口门附近海域陡然降低、DO 和叶绿素 a 含量迅速升高, 随后 $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 又快速升高, 并沿西北方向缓慢降低(图2e, 图2f)。东口上升流海域水体携带的营养物质在穿过海峡中部时“来不及”消耗^[29], 到达西口口门时

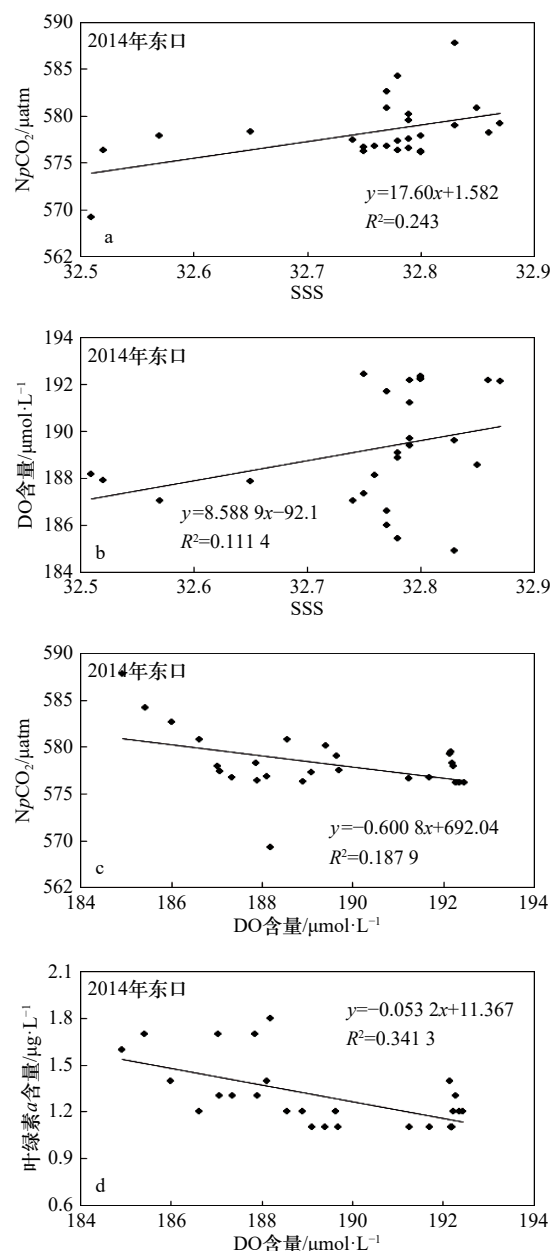


图4 2014年夏季东口海域观测要素关系

Fig. 4 Diagram of correlation between observation factors in the east mouth in summer 2014

潮流方向发散、流速下降, 水体中悬沙在口门附近沉淀堆积^[37], 水体透明度增加, 浮游植物得以快速繁殖, 致使在 $109.8^\circ \sim 109.9^\circ\text{E}$ 之间的小范围海域叶绿素 a 和 DO 含量陡增、 $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 突降, 且叶绿素 a 和 DO 含量与 $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 的分布趋势呈现显著镜像关系(图2c 至图2f), 说明西口口门附近海域 $p\text{CO}_2$ 受浮游植物光合作用影响同样显著。但由于水体携带的营养物质有限, 在西口口门被浮游植物生长快速消耗, 随后浮游植物生长受到营养物质限制, 叶绿素 a 和 DO 含量也随之降低, $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 再迅速升高; 水体在继续向西北方向运输的过程中营养物

质得到补充,透明度逐渐增大^[18],叶绿素 *a* 和 DO 含量逐渐增大, $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 缓慢降低(图 2c 至图 2f)。2014 年夏季西口口门无 $p\text{CO}_2$ 和 NpCO_2 突降、叶绿素 *a* 和 DO 含量陡增现象(图 2i 至图 2l),主要是由于 2014 年夏季东口海域上升流较 2011 年夏季弱,水体穿过海峡中部、到达西口时携带的营养物质的量少,不足以促进浮游植物快速繁殖。

3.4 海峡中部狭管效应

2011 年夏季琼州海峡中部 NpCO_2 变化范围为 458~575 μatm , 平均值为 (547±12) μatm , 高于东口和西口海域(表 1, 图 2f); 2014 年夏季琼州海峡中部 NpCO_2 变化范围为 515~561 μatm , 平均值为 (542±13) μatm , 低于东口海域、高于西口海域(表 1, 图 2l), 海峡中部 NpCO_2 整体较高。而且, NpCO_2 与 SSS 呈显著正相关(图 5a, 图 6a), 与 DO 含量呈负相关(图 5b, 图 6b)。主要是由于:(1)琼州海峡东口和西口均呈喇叭状, 水体穿过海峡中部时狭管效应显著, 潮流流速为南海之最, 实测最大涨潮流速 172 cm/s, 最大落

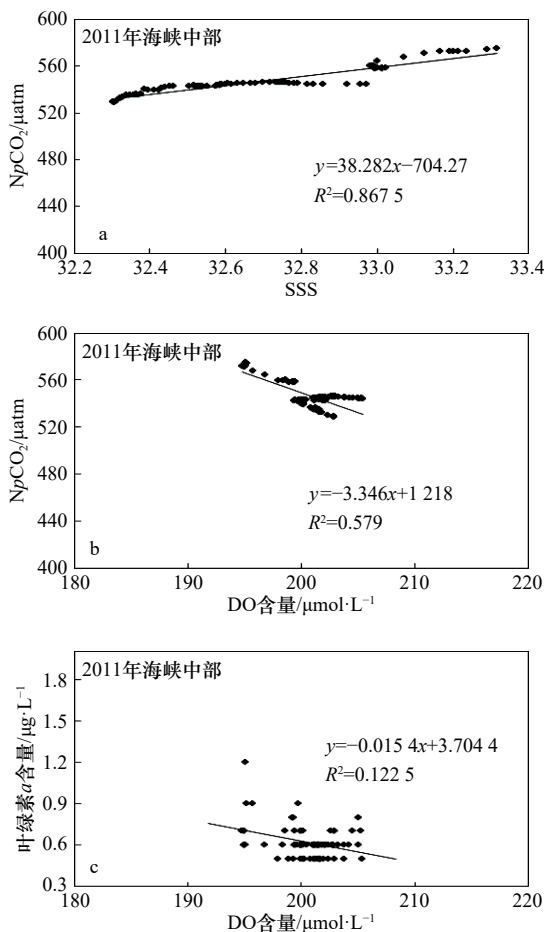


图 5 2011 年夏季海峡中部观测要素关系

Fig. 5 Diagram of correlation between observation factors in the middle of Qiongzhou Strait in summer 2011

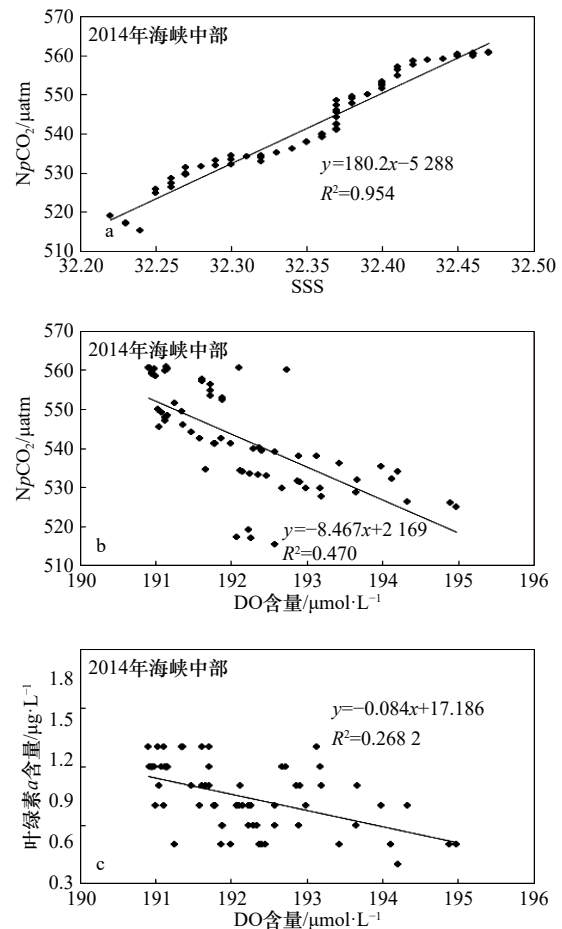


图 6 2014 年夏季海峡中部观测要素关系

Fig. 6 Diagram of correlation between observation factors in the middle of Qiongzhou Strait in summer 2014

潮流速为 142 cm/s^[17-18]。东口海域高 NpCO_2 、高 SSS 水体自东向西高速运输, 且过程中不断被“稀释”, 海峡中部 NpCO_2 与 SSS 均自东向西逐渐降低(图 2b, 图 2h); (2)海峡中部潮流强、水体剧烈混合, 下层低 DO 含量、高 CO_2 含量的水体不断补充表层, 2011 年和 2014 年夏季海峡中部呈现低 DO 含量、高 NpCO_2 现象, 即 NpCO_2 均与 DO 含量呈负相关(图 5b, 图 6b); (3)另外, 海峡中部水体高速运输, 浮游植物“来不及”繁殖^[30], 且水体混合作用强, 底床泥沙容易再悬浮^[38], 降低了浮游植物的光合作用效率^[39-40], 致使海峡中部叶绿素 *a* 含量低, 生物繁殖产生的 O_2 少, 消耗水体 CO_2 也较少, 且叶绿素 *a* 与 DO 相关性弱(图 5c, 图 6c)。以上因子都使得 2011 年和 2014 年夏季海峡中部 NpCO_2 均较高。

4 结论

(1)2011 年和 2014 年夏季琼州海峡 $p\text{CO}_2$ 分别为 (516±29) μatm 和 (533±15) μatm , 高于相邻及相似海

域,海-气 CO_2 交换通量分别是 $(8.4 \pm 1.7) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(4.5 \pm 0.4) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 均是大气 CO_2 的强源, 主要受控于东口海域上升流和海峡中部狭管效应。

(2) 东口海域上升流增大了琼州海峡整体 $p\text{CO}_2$, 同时也促进了东口海域浮游植物繁殖, 光合作用吸收水体 CO_2 、降低了 $p\text{CO}_2$ 。2011 年夏季, 受东口海域较

强上升流影响, 西口口门附近 $p\text{CO}_2$ 突降、叶绿素 a 和 DO 含量陡增。

(3) 海峡中部狭管效应显著, 水体输运速率大、混合作用强, 下层富含 CO_2 的水体不断补充表层水体, 且浮游植物“来不及”生长, 都使得海峡中部 $p\text{CO}_2$ 较高。

参考文献:

- [1] Jiao Nianzhi, Liang Yantao, Zhang Yongyu, et al. Carbon pools and fluxes in the China Seas and adjacent oceans[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(11): 1535–1563.
- [2] Sun Heng, Gao Zhongyong, Qi Di, et al. Surface seawater partial pressure of CO_2 variability and air-sea CO_2 fluxes in the Bering Sea in July 2010[J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 193: 104031.
- [3] Longhurst A, Sathyendranath S, Platt T, et al. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data[J]. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17(6): 1245–1271.
- [4] Gattuso J P, Frankignoulle M, Wollast R. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, 29: 405–434.
- [5] Chen Jiyu, Chen Shenliang. Estuarine and coastal challenges in China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2002, 20(2): 174–181.
- [6] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494–499.
- [7] Dai Minhan, Cao Zhimian, Guo Xianghui, et al. Why are some marginal seas sources of atmospheric CO_2 ?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(10): 2154–2158.
- [8] Lohrenz S E, Cai Weijun, Chakraborty S, et al. Satellite estimation of coastal $p\text{CO}_2$ and air-sea flux of carbon dioxide in the northern Gulf of Mexico[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 207: 71–83.
- [9] Wanninkhof R, Triñanes J, Park G H, et al. Large decadal changes in air-sea CO_2 fluxes in the Caribbean Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(10): 6960–6982.
- [10] Zhai Weidong, Dai Minhan, Cai Weijun. Coupling of surface $p\text{CO}_2$ and dissolved oxygen in the northern South China Sea: impacts of contrasting coastal processes[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(11): 2589–2598.
- [11] 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 Weidong. Sea surface partial pressure of CO_2 and its controls in the northern South China Sea in the non-bloom period in spring[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(6): 31–40.
- [12] 马玉, 高全洲, 李团结, 等. El Niño 影响下春季南海北部表层水体 CO_2 分压变化[J]. 环境科学学报, 2016, 36(10): 3581–3588.
Ma Yu, Gao Quanzhou, Li Tuanjie, et al. The changes of partial pressure of carbon dioxide in surface water in the northern South China Sea under the influence of El Niño in spring[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(10): 3581–3588.
- [13] Li Qian, Guo Xianghui, Zhai Weidong, et al. Partial pressure of CO_2 and air-sea CO_2 fluxes in the South China Sea: synthesis of an 18-year dataset[J]. *Progress in Oceanography*, 2020, 182: 102272.
- [14] 陈波, 严金辉, 王道儒, 等. 琼州海峡冬季水量输运计算[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(3): 357–364.
Chen Bo, Yan Jinhui, Wang Daoru, et al. The transport volume of water through the Qiongzhou Strait in the winter season[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(3): 357–364.
- [15] Shi Maochong, Chen Changsheng, Xu Qichun, et al. The role of Qiongzhou Strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(1): 103–121.
- [16] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 1–8.
Yang Shiyong, Bao Xianwen, Chen Changsheng, et al. Analysis on characteristics and mechanism of current system in west coast of Guangdong Province in the summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2003, 25(6): 1–8.
- [17] 陈达森, 陈波, 严金辉, 等. 琼州海峡余流场季节性变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2006(2): 12–17.
Chen Dase, Chen Bo, Yan Jinhui, et al. The seasonal variation characteristics of residual currents in the Qiongzhou Strait[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(2): 12–17.
- [18] 侍茂崇, 陈春华, 黄方, 等. 琼州海峡冬末春初潮流场特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 1–10.
Shi Maochong, Chen Chunhua, Huang Fang, et al. Characteristics of tidal current and residual current in the Qiongzhou Straits in period between end of winter and beginning of spring[J]. *Haiyang Xuebao*, 1998, 20(1): 1–10.
- [19] 严昌天, 陈波, 杨仕英, 等. 琼州海峡中间断面冬季水量输运计算[J]. 海洋湖沼通报, 2008(1): 1–9.
Yan Changtian, Chen Bo, Yang Shiyong, et al. The transportation volume of water through the Qiongzhou Strait in winter season[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008(1): 1–9.
- [20] Weiss R F, Price R A. Nitrous oxide solubility in water and seawater[J]. *Marine Chemistry*, 1980, 8(4): 347–359.

- [21] Sweeney C, Gloor E, Jacobson A R, et al. Constraining global air-sea gas exchange for CO₂ with recent bomb ¹⁴C measurements[J]. *Global Biogeochemistry Cycle*, 2007, 21(2): GB2015.
- [22] Weiss R F. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas[J]. *Marine Chemistry*, 1974, 2(3): 203–215.
- [23] Zhai Weidong, Dai Minhan, Chen Baoshan, et al. Seasonal variations of sea-air CO₂ fluxes in the largest tropical marginal sea (South China Sea) based on multiple-year underway measurements[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 7775–7791.
- [24] Zhai Weidong, Dai Minhan. On the seasonal variation of air-sea CO₂ fluxes in the outer Changjiang (Yangtze River) Estuary, East China Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2009, 117(1/4): 2–10.
- [25] Xue Liang, Zhang Longjun, Cai Weijun, et al. Air-sea CO₂ fluxes in the southern Yellow Sea: an examination of the continental shelf pump hypothesis[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(18): 1904–1914.
- [26] Rehder G, Suess E. Methane and pCO₂ in the Kuroshio and the South China Sea during maximum summer surface temperatures[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 75(1/2): 89–108.
- [27] 张远辉, 黄自强, 王伟强, 等. 台湾海峡二氧化碳研究[J]. *台湾海峡*, 2000, 19(2): 163–169.
Zhang Yuanhui, Huang Ziqiang, Wang Weiqiang, et al. A study of carbon dioxide in Taiwan Strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, 19(2): 163–169.
- [28] 王继纲, 蒋荣根, 陈文锋, 等. 春、秋季台湾海峡海-气CO₂通量及其影响因素[J]. *应用海洋学报*, 2018, 37(3): 313–320.
Wang Jigang, Jiang Ronggen, Chen Wenfeng, et al. Sea-air CO₂ flux and its environmental factors in the Taiwan Strait in spring and autumn[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(3): 313–320.
- [29] Padin X A, Vázquez-Rodríguez M, Ríos A F, et al. Surface CO₂ measurements in the English Channel and Southern Bight of North Sea using voluntary observing ships[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 66(1/4): 297–308.
- [30] De la Paz M, Gómez-Parra A, Forja J. Seasonal variability of surface fCO₂ in the Strait of Gibraltar[J]. *Aquatic Sciences*, 2009, 71(1): 55–64.
- [31] 杨士瑛, 陈波, 李培良. 用温盐资料研究夏季南海水通过琼州海峡进入北部湾的特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(1): 1–7.
Yang Shiyang, Chen Bo, Li Peiliang. A study of the characteristics of water transport from the South China Sea into Beibu Bay via the Qiongzhou Strait in summer in terms of temperature and salinity data[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(1): 1–7.
- [32] 谢玲玲, 张书文, 赵辉. 琼东上升流研究概述[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(4): 35–41.
Xie Lingling, Zhang Shuwen, Zhao Hui. Overview of studies on Qiongdong upwelling[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(4): 35–41.
- [33] Ianson D, Feely R A, Sabine C L, et al. Features of coastal upwelling regions that determine net air-sea CO₂ flux[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(5): 677–687.
- [34] Yin Kedong. Monsoonal influence on seasonal variations in nutrients and phytoplankton biomass in coastal waters of Hong Kong in the vicinity of the Pearl River estuary[J]. *Marine Ecology—Progress Series*, 2002, 245: 111–122.
- [35] 全长亮, 黎刚, 陈飞, 等. 海南岛东北部海域海砂资源特征及成因[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(1): 12–19.
Tong Changliang, Li Gang, Chen Fei, et al. Geological characteristics and origin of marine sands in the northeast sea off Hainan Island[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(1): 12–19.
- [36] 汪彧, 经志友, 齐义泉. 2013年夏季琼东海域上升流观测研究[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(2): 40–49.
Wang Yu, Jing Zhiyou, Qi Yiquan. Coastal upwelling off eastern Hainan Island observed in the summer of 2013[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35(2): 40–49.
- [37] 侍茂崇, 严金辉, 陈波, 等. 琼州海峡夏季三塘潮流谱分析和余流特征研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(11): 1–4.
Shi Maochong, Yan Jinhui, Chen Bo, et al. The spectrum analysis of tidal current and the study on residual current in summer near Santan in Qiongzhou Strait[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(11): 1–4.
- [38] 李占海, 柯贤坤, 王倩, 等. 琼州海峡水沙输运特征研究[J]. *地理研究*, 2003, 22(2): 151–159.
Li Zhanhai, Ke Xiankun, Wang Qian, et al. Characteristics of water and sediment transport in the Qiongzhou Strait[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 151–159.
- [39] Yin Kedong, Harrison P J. Nitrogen over enrichment in subtropical Pearl River estuarine coastal waters: possible causes and consequences[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1435–1442.
- [40] Zhou Weihua, Yin Kedong, Harrison P J, et al. The influence of late summer typhoons and high river discharge on water quality in Hong Kong waters[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 111: 35–47.

Spatiotemporal variations of partial pressure of carbon dioxide in surface sea water in the Qiongzhou Strait in summer

Ma Yu^{1,2}, Liao Shizhi^{1,2}, Li Ruixiang^{1,2}, Cai Yucan^{1,2}, Cao Yonggang^{1,2}, Xu Chunling^{1,2},
Shi Huaming^{1,2}, Wang Di^{1,2}, Xu Xin^{1,2}

(1. South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510300, China)

Abstract: The sea surface temperature(SST), salinity(SSS), dissolved oxygen (DO), chlorophyll *a*(Chl *a*) and surface partial pressure of carbon dioxide($p\text{CO}_2$) was determined by underway measurement system in the Qiongzhou Strait in summer 2011 and 2014, and the spatiotemporal variations of $p\text{CO}_2$ were analyzed and its control factors were explained. The averages of $p\text{CO}_2$ in surface sea water were (516 ± 29) μatm and (533 ± 15) μatm , sea-air CO_2 fluxes were (8.4 ± 1.7) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ and (4.5 ± 0.4) $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ in summer 2011 and 2014, the Qiongzhou Strait acted as strong atmospheric CO_2 source and was more higher than the adjacent and similar sea areas. The upwelling forced the CO_2 -enriched subsurface water to intrude the surface water and elevated $p\text{CO}_2$ in the east mouth, also promoted biological productivity and absorbed CO_2 from sea water, and also made the $p\text{CO}_2$ drop and DO rise sharply in the vicinity of west mouth in summer 2011. The upwelling was weak in east mouth and vertical mixing was strong along ship-track in summer 2014, the distributions of $p\text{CO}_2$ and DO were obviously different from that in summer 2011. Narrow channel effect was significant in the middle of Qiongzhou Strait, high water transportation speed with strong mixing resulted in weak photosynthetic activity, they altogether maintained high $p\text{CO}_2$ in summer 2011 and 2014.

Key words: the Qiongzhou Strait; partial pressure of carbon dioxide; upwelling; narrow channel effect