

黑潮主流径海域海水中的无机碳及其 对东海陆架区的影响*

卢 汐^{1,2} 宋金明^{1,3} 袁华茂^{1,3} 李 宁^{1,3}
李学刚^{1,3} 段丽琴^{1,3} 曲宝晓^{1,3}

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 青岛海洋国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237)

摘要 基于 2014 年 5—6 月对黑潮主流径及毗邻东海陆架海区的调查,研究了该区域水体中无机碳体系参数(pH、总碱度 TAlk、溶解无机碳 DIC 及 DIC/TAlk)的垂直与水平分布,在此基础上定量评估了黑潮输入对东海陆架海区无机碳收支的影响。结果表明,黑潮水体中 DIC、TAlk 与 DIC/TAlk 总体而言随水深增加而升高, pH 降低,综合体现了浮游植物生产、海-气界面交换、有机物降解及 CaCO₃ 溶解等过程的影响;上升流中心站位无机碳参数均受较深层水体上涌影响,与黑潮主流径其它站位略有不同。东海陆架海区外侧站位表层、30m 层无机碳主要受台湾海峡暖流影响,高 pH、低 DIC/TAlk 的黑潮表层水影响区域局限于东南部;而在底层,低 pH、高 DIC/TAlk 的黑潮入侵流离开黑潮主流径向正北方延伸并抬升至钱塘江口附近;上升流对无机碳的影响持续至表层,其携带的黑潮中层水因此也可能进入陆架海区。水量模型估算黑潮水在 5—10 月间跨域陆架边缘向东海陆架区输入溶解无机碳总计 58798.9×10⁹mol,净输入达 37382.9×10⁹mol,而东海向外输出的无机碳绝大部分经由对马海峡进入日本海。

关键词 溶解无机碳;黑潮;东海;分布;影响

中图分类号 P734.2⁺5 doi: 10.11693/hyhz20150300089

海洋作为全球最大的碳库,在全球碳循环过程中的重要性毋庸置疑。海洋中碳的存在形态大体可以分为无机碳与有机碳,又以无机碳中的溶解无机碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)占绝大多数,可占海水中总碳含量的 95%以上(宋金明等, 2004)。海洋无机碳循环体系中,开放大洋因其面积广阔成为主力,而陆架边缘海生物地球化学过程活跃,作用亦不可忽视,两者之间有着显著的性质差异,往往依靠陆架边界流进行物质与能量的交换(Wollast, 1998)。我国东海陆架区(East China Sea Shelf)作为全球面积最宽广、生物生产最旺盛的陆架区之一,其无机碳体系

在受到西侧黄河、长江、钱塘江等陆源径流输入影响的同时,也受到东侧黑潮海流的强烈影响(Wong *et al.*, 2000; Hung *et al.*, 2003)。

作为北太平洋西边界流,黑潮起源于菲律宾以东海域,北上流经台湾岛东岸后,沿陆架边缘流向东北,至九州岛西南向东经吐噶喇海峡进入日本以南海域,后于 141°E, 35°N 附近作为黑潮延伸体汇入北太平洋暖流(刘在科, 2007; 马超, 2009)。在台湾东北,黑潮通过表层水涡旋、入侵与表层以下水体上涌等形式进入东海陆架区,使陆架水得以与西北太平洋水体进行物质、能量交换(Chen *et al.*, 1995; Hsueh, 2000;

* 中国科学院战略性先导科技专项项目, XDA11020102 号; 国家基金委山东省联合基金项目, U1406403 号; 青岛海洋国家实验室“鳌山人才”项目专项资助。卢汐, 硕士研究生, E-mail: Luxi_19900209@hotmail.com

通讯作者: 宋金明, 博士生导师, 研究员, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2015-03-24, 收修改稿日期: 2015-07-15

Wong *et al.*, 2000), 并对东海陆架区的无机碳格局产生影响(Chen *et al.*, 1999; Wong *et al.*, 2000)。

虽然自 1893 年起即有日本学者通过漂流瓶对日本东、南部黑潮进行研究(管秉贤, 1978), 20 世纪中期起又有“黑潮及其临近水域合作调查”、“中日黑潮合作调查”、“黑潮边缘交换过程”等众多研究聚焦黑潮与其毗邻陆架海域间的水交换与物质运输过程(管秉贤, 1979a, 1979b, 1983; Wong *et al.*, 2000; 陈荣发, 2000; 刘在科, 2007), 但迄今为止大多研究仍集中于物理海洋领域, 对黑潮主流径海区及其与毗邻陆架海域间无机碳分布、交换过程涉及甚少。Chou 等(2007)与 Sheu 等(2009)调查研究了由南海、西菲律宾海经台湾以东黑潮流经西侧至台湾东北海域的 DIC 分布与输送, 认为南海高 $\text{CO}_2(\text{T})$ (游离 CO_2 , 为 H_2CO_3 与溶解 CO_2 的通称)含量的次表层水汇入黑潮中层水西侧, 并通过黑潮水流的输送, 降低东海陆架区的碳汇能力。然而鲜少有研究分析、对比台湾以东黑潮主流径海区以及毗邻东海陆架海区的无机碳垂直、水平分布特征与影响因素。

本文基于 2014 年春季(5—6 月)对台湾以东黑潮主流径以及东海陆架海区的调查, 研究了该区域海水中 pH 值、总碱度(Total Alkalinity, TAlk)与溶解无机碳(DIC)等无机碳参数的垂直、水平分布特征及影响因素, 初步评估了黑潮对东海陆架无机碳交换的影响, 可为阐明黑潮对东中国海生态环境影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 调查站位

2014 年 5 月 18 日—6 月 13 日随“科学一号 2014 年东海春季调查航次”对台湾以东黑潮主流径及 100m 等深线内东海陆架区大部共 67 个站位进行考察。站位分布如图 1 所示。调查项目包括温度(Temperature)、盐度(Salinity)、密度(σ_t)、pH、总碱度(TAlk)、溶解无机碳(DIC)、总悬浮颗粒物(TSM)、叶绿素 *a*(Chl *a*)等。

1.2 样品采集、分析及数据处理

水体温度、盐度、密度(σ_t)由 SBE 911 - Plus CTD 进行现场测量, 位温(位势温度, $T_{\text{pot-0}}$)与位密(σ_θ) (即将水样从某一深度以绝热方式提升到海面时所具有的温度与密度)由 Matlab 软件计算得到。各层水样由 CTD 控制的 Niskin 采水器采集。未过滤水样以 Thermo Orion 5-star pH 计(相对精度: ± 0.001 , 分辨率:

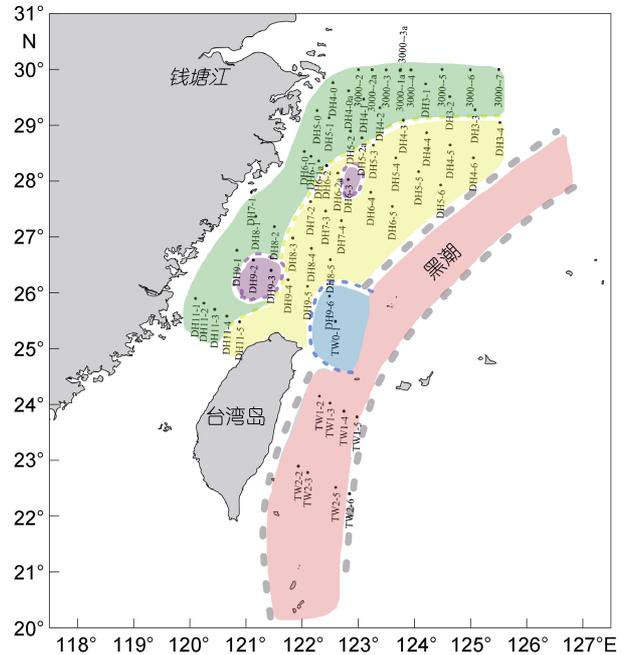


图 1 2014 年春季调查站位与水团分布示意图

Fig.1 Stations and water types in study area in spring 2014 绿色部分代表中国近岸水, 黄色部分代表台湾暖流水, 紫色部分代表陆架垂直混合区, 蓝色部分代表黑潮上升流, 粉色部分代表黑潮主流径

0.001)配置雷磁 E-201-D 电极(所用仪器精度条件下, 测量精度达 0.001)在 25°C 下进行测定, 使用总氢离子浓度标度, 每 24h 左右以三羟甲基氨基甲烷(Tris, $\text{pH}=8.089$, $S=35$)和二氨基吡啶-盐酸标准缓冲溶液($\text{pH}=6.786$, $S=35$)对电极进行校正, 精度可达 ± 0.002 pH 单位。另取未过滤水样于 125mL 磨口玻璃瓶中(经实测验证, 在密封良好的情况下, 该容器在短期内对碱度的测定无影响), 加入 1—2 滴饱和 HgCl_2 溶液固定保存, 以备实验室测定 TAlk。以 Whatman GF/F 0.7 μm 孔径滤膜(450°C 下预先灼烧 4h 并称量恒重)过滤 600—5000 mL 水样, 滤膜保存于 -20°C 以备实验室测定 TSM。以 0.45 μm 孔径醋酸纤维滤膜加 10g/L MgCO_3 悬浊液后过滤 200—500mL 水样, 滤膜对折后以铝箔包好, 保存于 -20°C 以备实验室测定 Chl *a*。

实验室 TAlk 测定按照 Dickson 等(2007)设计的开放单元滴定法(Open-cell Titration)进行。水样在精确称重($\pm 0.01\text{g}$)后恒温至 25.0°C , 以预先标定并测定密度的盐酸溶液在 Metrohm 905 Titrando 自动滴定仪操作下进行滴定。取 $\text{pH}=3.0$ — 3.5 范围内加酸体积与相应 pH 数据以 gran 作图法算得 TAlk。测定结果以 Dickson 教授的标准海水(BATCH #134)进行校准, 测

量精密密度约为 $0.001(\pm 2\mu\text{mol}/\text{kg})$, 精确度约 $0.0025(\pm 5\mu\text{mol}/\text{kg})$ 。

TSM 由烘干后膜重与空膜重之差除以滤水体积求得。Chl *a* 样品加入 10.00mL N,N-二甲基甲酰胺(DMF)萃取剂避光放置 0.5h 以上, 以 F-4600 型荧光分光光度计采用常规荧光法测定。DIC 利用 CO₂Sys EXCEL Macro 程序(Lewis *et al.*, 1998)由温度、盐度、pH 与 Talk 等参数计算得到。计算中, 海水 CO₂ 解离常数 K_1 、 K_2 采用 Mehrbach 等(1973)提出并由 Dickson 等(1987)修正的方法计算。

2 结果与讨论

2.1 研究海域的水文环境特征

2.1.1 黑潮主流径海域的水文环境 黑潮主流径以高盐(>34)为特征, 在温盐关系图(图 2)中呈右侧反 S 形分布, 同一断面各站水文特征相似。黑潮水体垂向又可细分为四层: 黑潮表层水(Kuroshio Surface Water, KSW)、黑潮次表层热带水(Kuroshio Tropical Water, KTW)、黑潮中层水(Kuroshio Intermediate Water, KIW)、黑潮深层水(Kuroshio Deep Water, KDW), 各层水体分割界面位于温盐变化梯度最大的 30—50m、300—400m 以及 800—1000m 水深。黑潮各层水体温盐特征有所不同。本次调查中黑潮主流径(TW1、TW2 断面)各水层水文特征随纬度变化幅度小,

分布如表 1 所示。黑潮各水层温度由表至深逐渐降低, 在 1000m 以深的深层水中区域恒定。黑潮各水层盐度在次表层热带水中达到最高(平均值约 34.73), 而在其下的中层水中达到最低(平均值约 34.33)。TW0-1 站位处于台湾东北部黑潮上升流核心区域, 受热带水与中层水涌升影响, 该站位温度、盐度、密度(σ_t)分布均有别于黑潮主流径的 TW1、TW2 断面站位(表 2), 温度、盐度低于同深度黑潮主流径海区, 而密度大于同深度黑潮主流径海区。

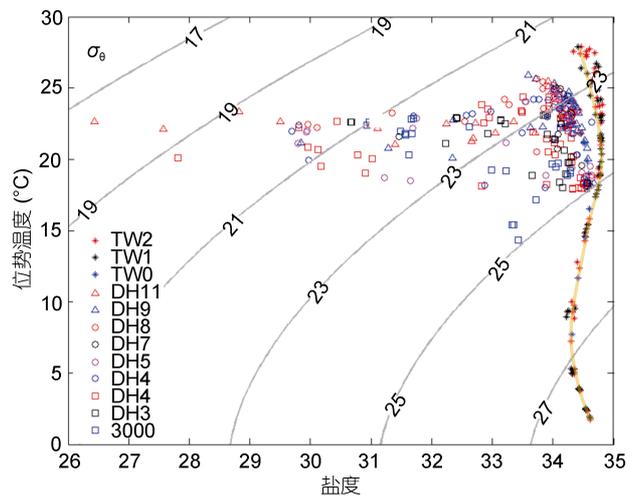


图 2 调查海域各断面温盐-位密图

Fig.2 T-S diagram for waters of different transects in study area 灰色弧线为位密等值线, 右侧黄线代表黑潮特征 T-S 曲线

表 1 2014 年春季黑潮主流径各水层水文特征

Tab.1 Hydrographic characteristics of waters in Kuroshio in spring 2014

水层	水深范围(m)	盐度范围	盐度平均值	温度范围(°C)	温度平均值(°C)	σ_t 范围(kg/m^3)	σ_t 平均值(kg/m^3)
表层水	0—30	34.34—34.81	34.59 \pm 0.14	24.24—27.89	26.81 \pm 1.11	22.00—23.41	22.46 \pm 0.42
热带水	50—300	34.53—34.82	34.73 \pm 0.09	14.35—26.39	20.66 \pm 3.40	22.68—25.74	24.33 \pm 0.87
中层水	400—800	34.23—34.44	34.33 \pm 0.05	4.99—12.83	7.87 \pm 2.62	25.97—27.16	26.73 \pm 0.39
深层水	1000 以深	34.42—34.62	34.53 \pm 0.07	1.89—4.02	2.86 \pm 0.84	27.33—27.68	27.52 \pm 0.14

表 2 2014 年春季黑潮上升流中心(TW0-1)各水层水文特征

Tab.2 Hydrographic characteristics of waters in Kuroshio upwelling center (TW0-1) in spring 2014

水层	水深范围(m)	盐度范围	盐度平均值	温度范围(°C)	温度平均值(°C)	σ_t 范围(kg/m^3)	σ_t 平均值 (kg/m^3)
表层水	0—30	34.33—34.52	34.44 \pm 0.10	21.22—23.65	22.23 \pm 1.27	23.24—24.06	23.72 \pm 0.43
热带水	50—300	34.42—34.61	34.54 \pm 0.07	11.68—21.14	17.14 \pm 3.57	24.09—26.19	25.08 \pm 0.80
中层水	500	34.31	—	7.78	—	26.76	—

2.1.2 东海陆架区的水文环境 东海陆架区同时受陆源淡水输入以及外海台湾暖流高温高盐水的影响, 显示出较大的温度、盐度变化范围(图 2)。内陆架站位为中国近岸水(China Coastal Water, CCW)。受低温、低盐淡水输入的影响, CCW 区表层温度低于外

陆架海区, 盐度低于 33。随着水深增加, CCW 盐度升高, 温度略有下降; 一些 CCW 区沿岸站位 10—30m 次表层出现温度最小值与盐度跃层, 体现出高温高盐外海水的近岸顶升(倪婷婷等, 2014)。外陆架站位普遍受台湾暖流(Taiwan Current Warm Water, TCWW)

影响, 表层温度较高, 盐度大于 33。TCWW 垂向盐度变化远小于 CCW, 而在 50—80m 间有明显温跃层, 水温在水深 80m 左右达到最小。根据研究(王兆毅, 2012), 这种现象是由于 TCWW 上层来自较暖的台湾海峡水流, 下层来自较冷的黑潮水向岸入侵。DH9-3、DH6-3 站位处于 60m 等深线附近地形变化处, 温度、盐度垂向分布均一, 为陆架垂直混合剧烈的区域, 呈现出台湾海峡水流的温盐特征, 暂时标记为陆架垂直混合水(Shelf Vertical Mixed Water, SVMW)中心。DH9-6 站位则受临近 TW0-1 黑潮上升流(Kuroshio Upwelling Water, KUW)的影响, 盐度较高, 水温整体较低且无明显温跃层。

2.2 黑潮主流径水体中无机碳的分布及影响因素

2.2.1 黑潮各水层中无机碳参数的分布特征

黑潮主流径各站位 pH、TAIk、DIC 三个无机碳参数垂直分布特征如图 3 所示, 所得结果与前人对周边海域的研究成果有可比性(Chen *et al.*, 1995; Chen *et al.*,

1999; Chou *et al.*, 2007; Sheu *et al.*, 2009)。黑潮主流径调查站位 pH 整体分布范围为 7.544—8.204, 平均值为 7.922。总体而言, 表层水 pH 最高, 分布范围为 8.076—8.204, 平均值达 8.168; 次表层热带水到中层水中 pH 随水深增加而急剧下降, 分布范围为 7.544—8.187, 热带水与中层水中 pH 平均值分别为 8.071 与 7.685; pH 在 800m 水层达到最小值后, 在深层水中相对均一又随水深增加略有回升, 范围为 7.544—7.741, 平均值为 7.607。

黑潮主流径调查站位 TAIk 整体分布范围为 2259.58—2451.63 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2321.8 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。总体而言, 黑潮表层水 TAIk 最低, 0—30m 水层中 TAIk 随水深增加而增加, 分布范围在 2259.58—2312.83 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2285.0 $\mu\text{mol}/\text{kg}$; 热带水中 TAIk 含量较为均一, 随水深增加略有下降, 分布范围为 2275.95—2320.56 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2295.2 $\mu\text{mol}/\text{kg}$; 中层水中, TAIk 含量随水深增加而显

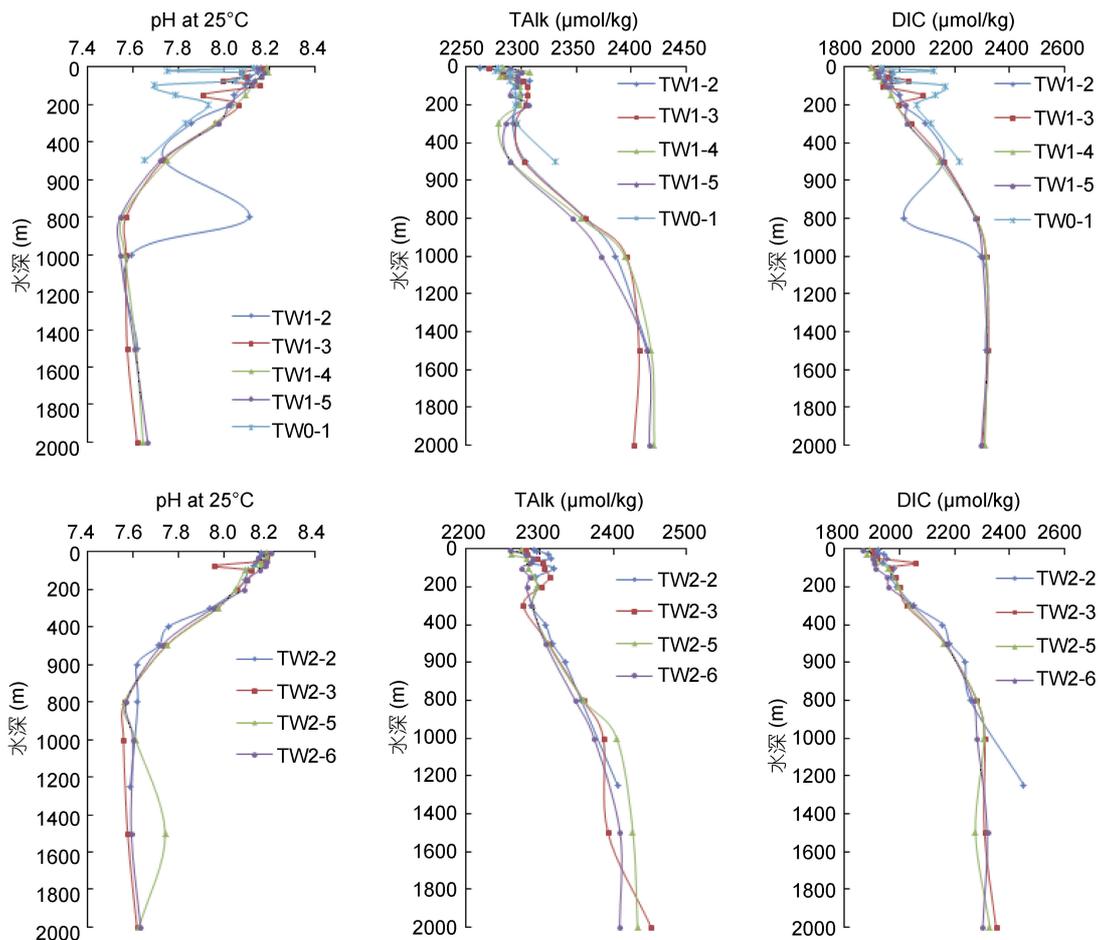


图 3 黑潮主流径无机碳参数垂直分布

Fig.3 Vertical distributions of inorganic parameters in Kuroshio main stream

著升高, 分布范围为 2290.52—2360.05 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2329.0 $\mu\text{mol}/\text{kg}$; TAlk 在黑潮深层水中垂直变化梯度最小, 含量最高, 分布范围在 2373.01—2451.63 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2406.4 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。

黑潮主流径各站位 DIC 分布范围在 1867.63—2451.34 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2078.1 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。黑潮表层水中 DIC 含量最低, 从表层水至中层水中, DIC 含量总体随水深增加而升高, 分布范围为 1867.63—2280.90 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 黑潮表层水、热带水和中层水中 DIC 平均浓度分别约为 1913.2、1980.2 和 2201.6 $\mu\text{mol}/\text{kg}$; 黑潮深层水中 DIC 含量最高, 分布相对均一, 平均值约为 2315.7 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。

处于上升流中心的 TW0-1 站位各无机碳参数分布趋势近似于临近的 TW1 断面各站位, 但整体数值略有不同。在上升流的影响下, TW0-1 站位底层(500m 水深)水体中各无机碳参数与台湾以东黑潮主流径各站位中层水整体平均值相近, 表层与次表层热带水中各无机碳参数平均值则有别于黑潮主流径各站位相应水层平均值, 体现出其下方水层的影响。TW0-1 站位各层水体中 pH 整体小于 TW1、TW2 断面各站位相应水深, 分布范围在 7.652—8.130, 平均值为 7.898, 其表层水、热带水和中层水的 pH 平均值分别为 7.987、7.894 与 7.652; TW0-1 站位水体中的 TAlk 则与台湾以东黑潮主流径断面各站位相差不大, 分

布范围在 2276.73—2330.77 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2293.7 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 其表层水、热带水和中层水中 TAlk 含量平均值分别为 2282.0、2293.4 与 2330.8 $\mu\text{mol}/\text{kg}$; TW0-1 站位各层水 DIC 整体大于 TW1、TW2 断面站位, 总体分布范围为 1934.94—2219.85 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2069.4 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 其表层水、热带水与中层水中 DIC 含量平均值分别约为 2012.0、2073.1 与 2219.9 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。

2.2.2 影响黑潮水体无机碳分布的因素解析 海水中无机碳体系组成复杂, 各参数的分布同时受到碳酸盐体系各分量浓度比值、生物利用、物理混合交换以及 CaCO_3 生成—溶解平衡等因素的影响。

根据海水中二氧化碳逸度 $f\text{CO}_2$ 计算公式 $f\text{CO}_2 = [\text{K}_2 \times (2 - \text{TAlk}/\text{DIC})^2] / [\text{K}_0 \times \text{K}_1 \times (\text{TAlk}/\text{DIC} - 1)]$ (Chou *et al.*, 2009), $f\text{CO}_2$ 与 DIC/TAlk 正相关, 即 DIC/TAlk 比值可指示水体中溶解 CO_2 的含量, 比值越高则说明水体中溶解的 CO_2 含量越高。黑潮主流径水体中 DIC/TAlk 分布趋势类似于 DIC 分布趋势(图 4), 黑潮表层水中 DIC/TAlk 比值最低, 从表层水至中层水中, DIC/TAlk 比值总体随水深增加而升高, 又以中层水中变化幅度最大, 多在 800m 水层出现 DIC/TAlk 最高值, 黑潮深层水中 DIC/TAlk 比值相对均一, 且随水深增加而略有回落。受上升流与较高 DIC 含量影响, TW0-1 站位水体中 DIC/TAlk 比值整体亦大于 TW1、TW2 断面各站位。

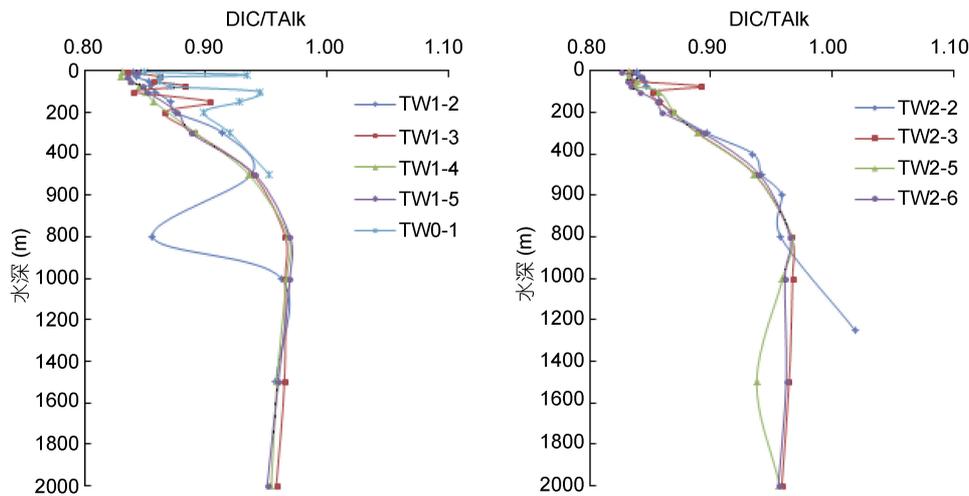


图 4 黑潮主流径各站 DIC/TAlk 比值垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of DIC/TAlk ratio in Kuroshio mainstream

在黑潮表层水中有着较低的 DIC/TAlk 比值、TAlk 与 DIC 含量以及较高的 pH 值, DIC/TAlk 比值随水深增加的上升趋势伴随着水体中 pH 的下降与

DIC、TAlk 含量的增加。由于黑潮表层水中浮游植物活动相对活跃(在图 5 中表现为 Chl *a* 高值), 因此这一分布特征体现了浮游植物生产过程中吸收 CO_2 以及

其中钙质生物生成 CaCO_3 壳体造成的影响。然而黑潮表层水中 Chl *a* 与各无机碳参数相关性并不十分强(图 5), 因此光合作用产物的原位分解再循环、呼吸作用以及海—气界面交换等过程也对表层水中 CO_2 浓度以及其余各无机碳参数分布产生了影响。此外, 根据相关性分析, 黑潮表层水中各无机碳参数与海

水盐度相关性总体低于与海水温度的相关性, 且其低盐端表现出的高 pH、低 TAlk、DIC 含量以及 DIC/TAlk 比值与附近东海水体无机碳分布情况不符(图 6), 说明在黑潮 0—30m 水层中, 东海陆架水输出导致的盐度下降对无机碳体系影响不大, 较高的海温则有利于生物生长以及 CO_2 移除。

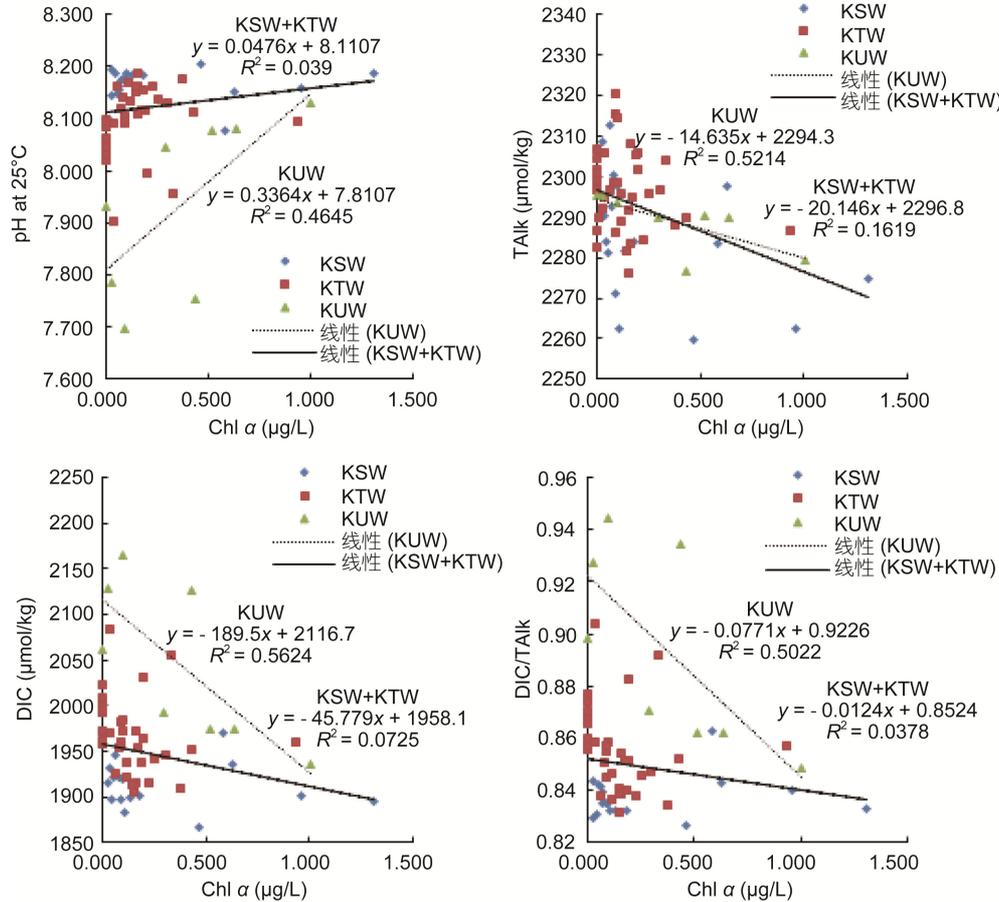


图 5 黑潮主流径无机碳参数与 Chl *a* 关系

Fig.5 Relationships between inorganic parameters and Chl *a* in Kuroshio mainstream

黑潮次表层热带水中, DIC/TAlk 比值随水深增加的上升趋势同样伴随着水体中 pH 的下降与 DIC 含量的升高, 而 TAlk 含量则相对均一, 甚至略有下降。海水碳酸盐体系各分量中游离 CO_2 含量对 pH、DIC 值有影响, 而对 TAlk 影响不大。由此可以判断, 在黑潮热带水中, 随水深增加游离 CO_2 含量增加, 而 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 含量相对恒定。在 100—150m 水层中浮游植物活动逐渐减弱, 至 200m 水深处, 黑潮主流径各站位 Chl *a* 含量均低于检测限, 各无机碳参数与 Chl *a* 相关性亦不十分强(图 5), 因此浮游植物生产对黑潮热带水(尤其 150m 以深部分)中各无机碳参数分布的影响已不显著。根据 Sheu 等(1996)研究, 台湾东

北黑潮水体 100—500m 中, 溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)含量随水深不断下降, 因此, 有机物分解是黑潮热带水中游离 CO_2 增加的主要来源。黑潮热带水中, pH、DIC 以及 DIC/TAlk 比值与水体温度、盐度均有较为明显的相关性, 这是因为在向低温低盐中层水的过渡过程中, 水体中有机物不断降解生成游离 CO_2 , 导致 pH 的下降以及 DIC 含量、DIC/TAlk 比值的上升。此外, 根据 Chen 等(1982)等研究, 海水中有有机物分解生成的酸性物质将导致 TAlk 略有下降, $\Delta\text{TAlk}:\Delta\text{DIC}\approx -17:106$, 由此也解释了黑潮热带水中 TAlk 随水深增加的略微下降。

总体而言, 黑潮中层水中 DIC/TAlk 比值随水深

增加而明显升高,同时水体中 pH 明显下降, TAlk、DIC 含量则明显上升。在相对均一的低盐中层水中,各无机碳参数与盐度相关性较弱,与温度相关性较为显著。在这一水层中,随着水深增加,水温降低,压力增大, CaCO_3 表观溶度积常数 K'_{sp} 升高, CaCO_3 开始溶解,因此 TAlk 迅速升高。而 DIC/TAlk 的升高趋势以及 pH 的下降趋势则说明,在这一水层中有机物仍被不断降解,生成的 CO_2 抵消了 CaCO_3 溶解过程中的消耗,根据文献与本次调查,黑潮水体中 DO 含量最小值出现在 800—1000m 水层(Sheu *et al.*, 1996),也可以证实中层水中有机物的耗氧降解过程。

黑潮深层水中各参数分布均较为稳定均一。这一水层有着四个水层中最高的 DIC/TAlk 比值、TAlk 与 DIC 含量以及最低的 pH 值。随水深增加,深层水中盐度回升,温度略有下降,无机碳参数中 pH 与 TAlk、DIC 略有升高, DIC/TAlk 比值则略有下降。Sheu 等(1996)与 Chen 等(2006)的调查研究指出,在台湾东北黑潮流域 1000m 以深水层中, DO 浓度随水深增加而上升,由此可知在黑潮深层水中,有机物分解已基本完成,而 CaCO_3 的溶解是影响各无机碳参数分布的主要因素。

位于上升流区的 TW0-1 站位各无机碳参数分布整体趋势类似于台湾以东的 TW1、TW2 断面各站位,影响因素也相近。与 TW1、TW2 两断面站位相比, TW0-1 上升流站位 200m 以浅水体中各无机碳参数分布与 Chl *a* 含量分布相关性更大,即受浮游植物生产影响更显著。此外, TW0-1 站位与 TW1、TW2 断面站位相比 TAlk 相近,而 pH 偏低, DIC 含量、DIC/TAlk 比值偏高,这是由于上升流携带较深层次水体中较高含量的游离 CO_2 进入浅层水体,从而影响了上升流区水体中各无机碳参数的整体分布。

2.3 东海陆架区水体中的无机碳及黑潮对其影响

2.3.1 东海陆架区水体无机碳的分布特征

东海陆架区海域各无机碳参数分布受到陆源输入、黑潮输送、生物生产以及海—气界面、海水—沉积物界面交换等多种因素影响,因而有着明显的空间差异(图 6)。东海陆架海区各站位整体而言 pH 值范围为 7.780—8.419, 平均值为 8.051 ± 0.111 ; TAlk 含量分布范围为 2005.67—2422.74 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值约为 (2288.5 ± 51.1) $\mu\text{mol/kg}$; DIC 含量分布范围为 1617.00—2240.91 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值约为 (1995.2 ± 92.2) $\mu\text{mol/kg}$; DIC/TAlk 比值范围为 0.78—0.97, 平均比值为 0.87 ± 0.03 。

调查海域表层海水整体而言 pH 值范围为 7.973—

8.419, 平均值为 8.152; TAlk 含量分布范围为 2005.67—2340.10 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值约为 2262.0 $\mu\text{mol/kg}$; DIC 含量分布范围为 1617.00—2240.91 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值约为 1923.7 $\mu\text{mol/kg}$; DIC/TAlk 比值范围为 0.78—0.97, 平均比值为 0.85。CCW 区表层海水有着较高的 pH 值, 略低的 TAlk 含量、DIC 含量以及 DIC/TAlk 比值, 这是由于海区中较为活跃的生物生产活动消耗 CO_2 又生成 CaCO_3 壳体。本次调查中, 长江、钱塘江淡水在 0—30m 水层中向东扩散, 并沿岸南下可达 28°N 附近, 因而受河流输入影响, 在调查海区西北部靠近长江、钱塘江口低盐区域出现 pH 低值以及 DIC、TAlk 与 DIC/TAlk 高值。靠近外陆架的 TCWW 区表层水由台湾海峡东侧延伸而出, 又受东部黑潮水流影响, 与 CCW 区相较之下有着较低的 pH 值, 较高的 TAlk 含量、DIC 含量以及 DIC/TAlk 比值, 分布模式主要受海温与浮游植物活动影响。SVMW 区在表层水中特征并不十分明显, 各无机碳参数分布多居于 CCW 区与 TCWW 区之间, 且与 TSM 有一定相关性, 因垂直混合有较高 TSM 浓度的站位水体有着相对略高的 CO_2 含量。由于高温, 台湾以东的黑潮表层水 KSW 区相较于 TCWW 区有着略高的 pH 与略低的 DIC/TAlk 比值; 而 TW0-1 与 DH9-6 站位为中心的黑潮上升流 KUW 区由于较深层次水体上升, pH 低于 KSW 区, DIC、TAlk 含量以及 DIC/TAlk 比值略高于 KSW 海区。

30m 层在本次调查中处于黑潮表层水下边界附近, 也是绝大部分调查站位均能达到的水深。调查海域 30m 层海水整体而言 pH 值范围为 7.834—8.186, 平均值为 8.037; TAlk 含量分布范围为 2232.56—2379.52 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值约为 2299.9 $\mu\text{mol/kg}$; DIC 含量分布范围为 1882.48—2162.95 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值约为 1993.6 $\mu\text{mol/kg}$; DIC/TAlk 比值范围为 0.83—0.91, 平均比值为 0.87。与表层相比, 随着有机物分解、海—气界面交换隔绝、生物生产减弱等因素影响, 30m 层水体中 pH 值下降, TAlk 含量、DIC 含量以及 DIC/TAlk 比值均有上升; 各水团中以 CCW 区垂向变化最大, TCWW、KSW 区与表层相比各无机碳参数值基本不变。这一水层中, 东海陆架大部区域各无机碳参数分布较均匀; CCW 区北部温、盐跃层多在 20—30m 之间, 30m 水层处于跃层之下, 但受长江、钱塘江陆源输入影响仍然显著, 加之较低的温度、上层水体中较活跃的光合作用产物在该层的分解, 成为明显的低 pH 值、高 TAlk、DIC 含量以及高 DIC/Talk

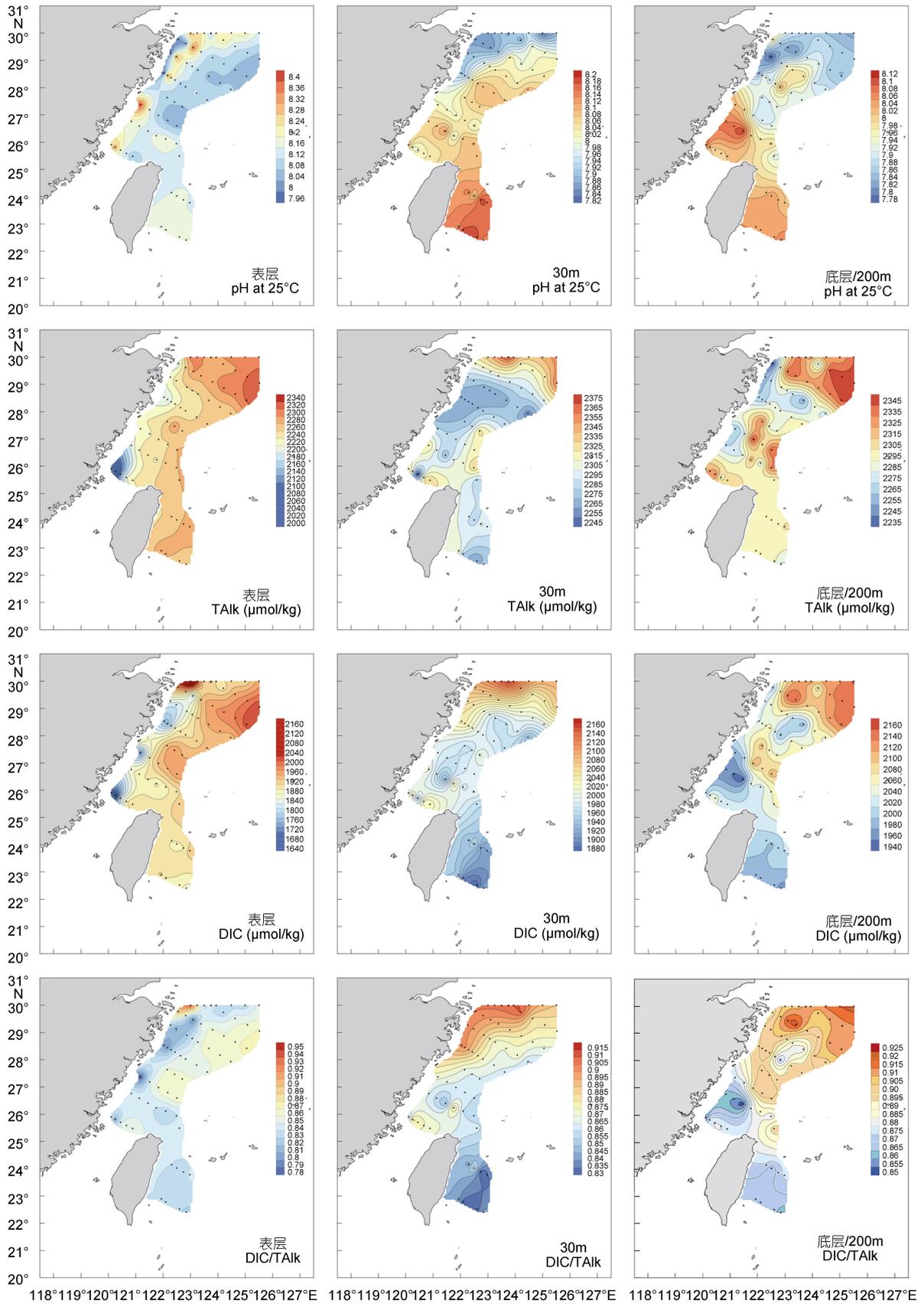


图 6 调查海域各无机碳参数平面分布

Fig.6 Spatial distributions of inorganic carbon parameters in study area

比值海区;与之相比, KSW 海区则表现出高 pH 值、低 TAlk、DIC 含量以及低 DIC/TAlk 比值。垂直混合较明显的 SVMW 区在 30m 层表现为不明显的高 pH 值、低 TAlk、DIC 含量与低 DIC/TAlk 比值区域;陆架边缘的 KUW 区相对于临近 KSW 站位依旧表现出较深水层上涌的影响, pH 值相对较低, TAlk、DIC 含量与低 DIC/TAlk 比值则相对较高。

东海陆架底层地形与海流对底层无机碳参数分布有着不可忽视的影响。黑潮主流径站位水深均大于 500m, 本研究中采用代表黑潮热带水、相当于外陆架大陆坡折深度的 200m 深处(刘在科, 2007)黑潮水与东海陆架底层水进行比较分析。调查海域底层(黑潮主流径各站取水深 200m)海水整体而言 pH 值范围为 7.780—8.123, 平均值为 7.950; TAlk 含量分布范围为 2237.35—2353.20 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2308.1 $\mu\text{mol}/\text{kg}$; DIC 含量分布范围为 1944.24—2163.36 $\mu\text{mol}/\text{kg}$, 平均值约为 2060.2 $\mu\text{mol}/\text{kg}$; DIC/TAlk 比值范围为 0.85—0.92, 平均比值为 0.89。与表层、30m 层相比, 底层海水中 pH 值更低, TAlk 含量、DIC 含量以及 DIC/TAlk 比值略有升高; 由于水深差距不同, 各水团中以 TCWW 区垂向变化较大, CCW、SVMW 区与 30m 层相比各无机碳参数值基本不变, 黑潮主流径 200m 深处水体中 TAlk 含量与 30m 深处相差不大。沿岸南下的长江、钱塘江冲淡水加之较浅的水深($\leq 30\text{m}$)使 CCW 西侧沿岸形成细长的低 pH 值、低 TAlk、低 DIC 含量、高 DIC/TAlk 海区, 同样受陆源输入影响而水深较大(50—60m)的 CCW 北部站位则依旧表现为低 pH 值、高 TAlk、DIC 含量以及高 DIC/TAlk 比值海区。与表层及 30m 层不同, 底层陆架中部出现一条从黑潮海区以及 TCWW 海区向正北延伸至钱塘江口附近的低 pH 值、高 TAlk、DIC 含量以及高 DIC/TAlk 比值水流, 其性质与 KUW 区相似。而其它海区, 尤其 SVMW 与 KTW 区, 相较之下有着较高的 pH 值与较低的 DIC 含量、DIC/TAlk 比值; 与 KTW 区相比, SVMW 区因海底地势突浅(与外侧站位相差 20—30m)以及各参数垂直分布均匀, 更带有其上层水体的高 pH 值、低 DIC、低 TAlk 特征。

2.3.2 黑潮对东海陆架区无机碳的影响 有关黑潮与东海陆架区之间 TAlk、DIC 交换的研究较少。Chen 等(1999)利用实测数据与箱式模型进行计算的结果表明, TAlk 与 DIC 由东海陆架水体向黑潮区域有净输出, 其通量分别为 $24929 \times 10^9 \text{mol}/\text{年}$ (另有 $3705 \times 10^9 \text{mol}/\text{年}$ 以悬浮颗粒物中颗粒无机碳形式输出)与

$21733 \times 10^9 \text{mol}/\text{年}$, 这两个数据均包括了东海水体跨陆架与通过对马海峡的输出。在水体交换过程中, 陆架高 TAlk、高 DIC 上层水向黑潮输出的同时, 黑潮表层至中层水也向陆架海域有无机碳输送, 因此对陆架海域碳格局亦有一定影响。

本研究的结果表明, 外侧陆架站位表层至 30m 层主要受台湾海峡暖流影响。高温、次高盐水舌由台湾海峡出口的 DH11-5 站位向东北延伸至 29°N 附近, 迫使高 pH、低 DIC/TAlk 比值的 KSW 影响区域局限于陆架东南部, 与以往报道中台湾海峡出流抑制黑潮表层水入侵的结论一致(杨晓丹, 2013; 赵瑞祥, 2013)。而在外侧陆架底层, 台湾海峡流的影响消失, 黑潮水的影响范围向西、北扩大, 一支低温、高盐、低 pH、高 DIC/TAlk 比值的水舌离开黑潮主流径沿 $122\text{—}123^\circ\text{E}$ 向正北方延伸并抬升至 29.5°N 附近, 形成钱塘江口外一个表层以下的上升流区。这支水流有着黑潮次表层水的特征, 与前人研究观察到的黑潮入侵流(Kuroshio Branch Current to the North of Taiwan, KBCNT, 亦称“黑潮分派”)之描述一致(Yang *et al.*, 2011; 赵瑞祥, 2013)。此外, 在 TW0-1 与 DH9-6 附近, 上升流的影响持续至表层, 200m 水深处 KUW 中心水文特征接近于 TW1、TW2 断面 300m 左右深处水体, 即 KIW 可能通过上升流进入陆架边缘, 输送低 pH、高 DIC/TAlk 比值水体。有研究表明, 高 CO_2 含量的南海次表层水可以通过输出高 DIC/TAlk 比值、低 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 海水至 KIW 西侧, 对陆架海区乃至更高纬度海域的碳汇能力产生影响(Chou *et al.*, 2007; Sheu *et al.*, 2009)。

不同水团之间的水交换量是获取化学要素通量的基础, 不同研究中采用的水交换箱式模型不同, 且大多在模型中只笼统计算了黑潮与东海跨陆架水交换的净通量, 并未区分东海的输出与黑潮的输入, 也并未将进入东海陆架区的黑潮水体分层, 获得的进入东海的黑潮水净通量变化很大, 其数值在 0.60—1.64Sv 之间(Song *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2011; 陈鑫, 2014)。如 Hung 等(2000)和 Liu 等(2000)所采用的模型只考虑了 KTW 向陆架输送的水流量, 一些研究所采用的模型中虽同时考虑了 KSW 与 KTW, 但未考虑 KIW 的影响(Wong *et al.*, 2000; Hung *et al.*, 2003; 林晶, 2007), Wong 等(2000)就假设了进入东海陆架区的 $\text{KSW} : \text{KTW} = 1 : 1$ 的前提条件, 而 Hung 等(2000)和林晶(2007)根据水盐平衡及 $\delta^{18}\text{O}$ 平衡估算进入东海陆架区的 $\text{KSW} : \text{KTW} = 1 : 3$, 这些

不同的考虑,使得黑潮与东海陆架的水交换量结果差异十分巨大。

综合分析归纳这些研究,认为 Chen 等(Chen *et al.*, 1995; Chen 1996; Chen 1998; Chen *et al.*, 1999)的研究中同时考虑 KSW、KTW 与 KIW,把 5—10 月间进入东海陆架的 KSW:KTW:KIW 平均水交换量确定为 3:3:1,与实际情况接近。

基于上述的调查研究结果可知, KIW 在一定程度上也确实参与了对陆架海区的输送,因此以下的估算采用了 KSW:KTW:KIW = 3:3:1 的水量输送比值。根据箱式模型水盐平衡关系计算黑潮与东海陆架水体跨陆架边缘交换量的公式为:

$$\sum Q_i = 0 \quad (1)$$

$$\sum (Q_i \times \rho_i \times S_i) = 0 \quad (2)$$

式中 Q_i 代表海水体积通量, ρ_i 代表水体密度, S_i 代表水体盐度。

根据计算,5—10 月间黑潮跨陆架向东海净输入水通量为 1.16Sv,这一结果与最近物理海洋调查数据

更为接近(Song *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2015),同时还区分了东海水从对马海峡与陆架边缘的输出。黑潮 KSW、KTW 与 KIW 在 5—10 月向东海陆架区输送 TAlk 与 DIC 情况见表 4。5—10 月间进入东海陆架区的黑潮水输入 TAlk 与 DIC 总量分别为 68062.6 与 $58798.9 \times 10^9 \text{ mol}$,远超过河流对东海陆架区的贡献(全年仅 $1830 \times 10^9 \text{ mol}$ DIC, Chen *et al.*, 1999),这其中又以 KTW 贡献最大, KSW 其次, KIW 贡献最小;同时,跨越陆架边缘出流的东海水向黑潮水体输出 TAlk 与 DIC 分别为 24564.2 与 $21416.0 \times 10^9 \text{ mol}$,由此可知,在陆架边缘(Shelf Break),黑潮水通过交换过程向东海净输入 TAlk 与 DIC 分别达 43498.4 与 $37382.9 \times 10^9 \text{ mol}$ 。此外,东海陆架水通过对马海峡向日本海输出 TAlk 与 DIC 分别达 106487.3 与 $92839.6 \times 10^9 \text{ mol}$,占东海向外输出无机碳的绝大部分(约 81.3%),甚至超过了黑潮水的总输入量,大量陆源 DIC 由此进入大洋循环。

表 3 东海陆架区主要水盐收支(5—10 月)

Tab.3 Major water-salt transports of East China Sea shelf area (May—October)

输入/输出项	盐度	密度(kg/m ³)	水通量(Sv)	水通量数据来源
河流(长江)	0.18	1000	0.040	(中华人民共和国水利部, 2013)
降雨-蒸发	0.00	1000	0.0264	(Chen <i>et al.</i> , 1999)
台湾海峡	34.0	1022	1.63	(郭景松等, 2005)
对马海峡	33.6	1027	-2.85	(Fukudome <i>et al.</i> , 2010)
黄东海交换	32.7	1025	-0.009	(林晶, 2007)
黑潮表层水	34.59	1022	0.781	本研究
黑潮热带水	34.73	1024	0.781	本研究
黑潮中层水	34.33	1027	0.260	本研究
东海陆架边缘	33.42	1023	-0.660	本研究

表中输出项为-, Sv=10⁶ m³/s

河流、台湾海峡、对马海峡及黄东海交换温盐数据来自文献(陈鑫, 2014)

台湾海峡、对马海峡水通量为计算所得 5—10 月平均值

雨季径流量占全年流量比例按 71%计算(梁翠, 2013)

表 4 东海陆架外侧 5—10 月无机碳收支

Tab.4 Transports of inorganic carbon on the outer edge of East China Sea shelf (May—October)

输入/输出项	浓度(μmol/kg)		通量(kmol/s)		半年输送量(10 ⁹ mol/0.5×年)		
	TAlk	DIC	TAlk	DIC	TAlk	DIC	
黑潮	表层水(KSW)	2285.0	1913.2	1823.8	1527.1	28994.8	24276.9
	热带水(KTW)	2295.2	1980.2	1835.6	1583.7	29181.2	25176.3
	中层水(KIW)	2329.0	2201.6	621.9	587.9	9886.6	9345.7
	总计			4281.3	3698.6	68062.6	58798.9
东海	东海陆架边缘	2288.5	1995.2	-1545.1	-1347.1	-24564.2	-21416.0
	对马海峡 ^a	2288.5	1995.2	-6698.3	-5839.9	-106487.3	-92839.6

表中输出项为-, 5—10 月半年以 184 日计算

a: 认为对马海峡暖流与陆架边缘输出的东海水具有相同的 TAlk、DIC 含量, 与文献数值相似(陈鑫, 2014)

3 结语

2014年5—6月在台湾以东黑潮主流径及毗邻东海陆架区67个站位进行的调查研究表明,黑潮主流径水体垂向上可由30—50m、300—400m以及800—1000m三个界面划分为黑潮表层水、热带水、中层水与深层水。黑潮表层水中有着较低的DIC含量、TAlk与DIC/TAlk比值,以及较高的pH值,体现了浮游植物生产以及海—气界面交换等过程的影响;黑潮次表层热带水中,DIC/TAlk比值随水深增加而上升,pH下降,DIC含量升高,TAlk含量则相对均一,其原因在于热带水中浮游植物生产逐渐减弱消失,而有机物开始不断分解;黑潮中层水中DIC/TAlk比值随水深增加明显升高,同时pH明显下降,TAlk、DIC含量明显上升,这一水层中CaCO₃开始溶解,与有机物的降解并行;黑潮深层水有着四个水层中最高的DIC/TAlk比值、TAlk与DIC含量以及最低的pH值,有机物分解基本结束,CaCO₃的溶解是影响各无机碳参数分布的主要因素。位于上升流中心的TW0-1站位各参数均受到较深层次水体上涌的影响,与黑潮主流径其它站位略有不同。

东海陆架海区受长江、钱塘江等径流输入影响同时,也受到台湾海峡流、台湾暖流以及黑潮水流的强烈影响。外侧陆架站位表层至30m层主要受台湾海峡暖流影响,高pH、低DIC/TAlk比值的KSW影响区域局限于陆架调查海区东南部;而在外侧陆架底层,黑潮水的影响范围扩大,一支低温、高盐、低pH、高DIC/TAlk比值的水舌离开黑潮主流径向正北方延伸并抬升至钱塘江口附近,形成一个表层以下的上升流区。这支水流有着黑潮次表层水的特征,应为前人研究中观察到的黑潮入侵流(KBCNT)。在TW0-1与DH9-6附近,上升流的影响持续至表层,其携带的KIW因此也可能进入陆架海区。

箱式水盐平衡模型计算可知,黑潮KSW、KTW与KIW在5—10月向东海陆架区输送TAlk分别达28994.8、29181.2及9886.6×10⁹mol(总计68062.6×10⁹mol),输送DIC分别达24276.9、25176.3及9345.7×10⁹mol(总计58798.9×10⁹mol),远超过河流对东海陆架区的贡献;同时,跨陆架出流的东海水向黑潮主流径输出TAlk与DIC分别为24564.2与21416.0×10⁹mol,即黑潮水跨越陆架边缘向东海净输入TAlk与DIC分别达43498.4与37382.9×10⁹mol;而东海向外输出的无机碳绝大部分经由对马海峡进入

日本海。

参 考 文 献

- 马超, 2009. 黑潮对东中国海主要流系的影响. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 1—106
- 王兆毅, 2012. 黑潮对中国近海环流影响的数值模拟研究. 北京: 国家海洋环境预报中心硕士学位论文, 1—89
- 中华人民共和国水利部, 2013. 中国河流泥沙公报. 北京: 中国水利水电出版社, 4
- 刘在科, 2007. PN断面东海黑潮的地转经验模态分析. 青岛: 中国科学院海洋研究所硕士学位论文, 1—52
- 杨晓丹, 2013. 黑潮的变化及其对东中国海物理环境的影响. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 1—88
- 宋金明, 李学刚, 李宁等, 2004. 一种海水中溶解无机碳的准确简易测定方法. 分析化学, 32(12): 1689—1692
- 陈鑫, 2014. 长江口及其邻近海域碳的迁移特征. 青岛: 中国科学院海洋研究所硕士学位论文, 1—81
- 陈荣发, 2000. 我所中日黑潮研究连续十四年成果获奖多, 日方评价高. 东海海洋, 18(1): 56
- 林晶, 2007. 长江口及其毗邻海区溶解有机碳和颗粒有机碳的分布. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 1—102
- 赵瑞祥, 2013. 台湾东北部黑潮入侵东海陆架的季节变化规律. 青岛: 中国科学院海洋研究所硕士学位论文, 1—77
- 倪婷婷, 管卫兵, 曹振轶等, 2014. 浙江沿岸春季上升流的数值研究. 海洋学研究, 32(2): 1—13
- 郭景松, 胡筱敏, 袁业立, 2005. 利用卫星高度计资料对台湾海峡流量变化的诊断分析. 海洋科学进展, 23(1): 20—26
- 梁翠, 2013. 长江口陆源输入变化及河口生态环境响应的初步研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所硕士学位论文, 13
- 管秉贤, 1978. 黑潮——一支世界著名的大洋强流. 海洋科学, (2): 1—6
- 管秉贤, 1979a. 黑潮及其邻近水域合作调查——第四次学术讨论会在东京召开. 海洋与湖沼, 10(4): 395—398
- 管秉贤, 1979b. 黑潮学术活动史上的一次盛会. 海洋湖沼通报, (1): 79—83
- 管秉贤, 1983. 台湾以东及东海黑潮调查研究的主要动向及结果. 海洋学报, 5(2): 133—146
- Chen C T A, 1996. The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf. *Oceanologica Acta*, 19(5): 523—527
- Chen C T A, 1998. Response to Liu's comments on "The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf" by Chen (1996). *Oceanologica Acta*, 21(5): 713—716
- Chen C T A, Liu C T, Pai S C, 1995. Variations in oxygen, nutrient and carbonate fluxes of the Kuroshio Current. *Limnology and Oceanography*, 33(3): 161—176
- Chen C T A, Pytkowicz R M, Olson E J, 1982. Evaluation of the calcium problem in the South Pacific. *Geochemical Journal*, 16(1): 1—10
- Chen C T A, Ruo R, Pai S C *et al*, 1995. Exchange of water masses between the East China Sea and the Kuroshio off northeastern Taiwan. *Continental Shelf Research*, 15(1): 19—39
- Chen C T A, Wang S L, 1999. Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf. *Journal of*

- Geophysical Research, 104(C9): 20675—20686
- Chen C T A, Wang S L, Chou W C *et al.*, 2006. Carbonate chemistry and projected future changes in pH and CaCO₃ saturation state of the South China Sea. *Marine Chemistry*, 101(3—4): 277—305
- Chou W C, Gong G C, Sheu D D *et al.*, 2009. Surface distributions of carbon chemistry parameters in the East China Sea in summer 2007. *Journal of Geophysical Research*, 114(C7), <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JC005128/pdf>
- Chou W C, Sheu D D, Chen C T A *et al.*, 2007. Transport of the South China Sea subsurface water outflow and its influence on carbon chemistry of Kuroshio waters off southeastern Taiwan. *Journal of Geophysical Research*, 112(C12), <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JC004087/pdf>
- Dickson A G, Millero F J, 1987. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media. *Deep Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers*, 34(10): 1733—1743
- Dickson A G, Sabine C L, Christian J R, 2007. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. USA: PICES Special Publication 3, 1—175
- Fukudome K-I, Yoon J-H, Ostrovskii A *et al.*, 2010. Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations. *Journal of Oceanography*, 66(4): 539—551
- Hsueh Y, 2000. The Kuroshio in the East China Sea. *Journal of Marine Systems*, 24(1—2): 131—139
- Hung J J, Chen C H, Gong G C *et al.*, 2003. Distributions, stoichiometric patterns and cross-shelf exports of dissolved organic matter in the East China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(6—7): 1127—1145
- Hung J J, Lin P L, Liu K K, 2000. Dissolved and particulate organic carbon in the southern East China Sea. *Continental Shelf Research*, 20(4—5): 545—569
- Lewis E, Wallace D W R, 1998. Program Developed for CO₂ System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee
- Liu K K, Tang T Y, Gong G C *et al.*, 2000. Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan. *Continental Shelf Research*, 20(4—5): 493—523
- Mehrbach C, Culbertson C H, Hawley J E *et al.*, 1973. Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure. *Limnology and Oceanography*, 18(6): 897—907
- Sheu D D, Chou W C, Chen C T A *et al.*, 2009. Riding over the Kuroshio from the South to the East China Sea: Mixing and transport of DIC. *Geophysical Research Letters*, 36(7), <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008GL037017/pdf>
- Sheu D D, Lee W Y, Wang C H *et al.*, 1996. Depth distribution of delta δ^{13} of dissolved Σ CO₂ in seawater off eastern Taiwan: Effects of the Kuroshio current and its associated upwelling phenomenon. *Continental Shelf Research*, 16(12): 1609—1619
- Song J, Xue H J, Bao X W *et al.*, 2011. A spectral mixture model analysis of the Kuroshio variability and the water exchange between the Kuroshio and the East China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29(2): 446—459
- Wollast R, 1998. Evaluation and comparison of the global carbon cycle in the coastal zone and in the open ocean. In: Brink K H, Robinson A R eds. *The Sea: The Global Coastal Ocean Processes and Methods*. New York: John Wiley & Sons Press, 213—252
- Wong G T F, Chao S Y, Li Y H *et al.*, 2000. The Kuroshio edge exchange processes (KEEP) study ——an introduction to hypotheses and highlights. *Continental Shelf Research*, 20(4—5): 335—347
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *et al.*, 2011. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer. *Journal of Geophysical Research*, 116(C5), <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JC006777/pdf>
- Zhou F, Xue H J, Huang D J *et al.*, 2015. Cross-shelf exchange in the shelf of the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 120(3): 1545—1572, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JC010567/pdf>

DISTRIBUTION OF INORGANIC CARBON PARAMETERS IN KUROSHIO AND ITS IMPACT ON ADJACENT EAST CHINA SEA SHELF

LU Xi^{1,2}, SONG Jin-Ming^{1,3}, YUAN Hua-Mao^{1,3}, LI Ning^{1,3}, LI Xue-Gang^{1,3},
DUAN Li-Qin^{1,3}, QU Bao-Xiao^{1,3}

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Function Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract Vertical and horizontal distributions of inorganic carbon parameters—pH, total alkalinity (TAlk), dissolved inorganic carbon (DIC) and ratio of DIC/TAlk—in the Kuroshio and adjacent East China Sea (ECS) shelf were investigated in spring, 2014. Generally, TAlk, DIC and DIC/TAlk increased while pH decreased with the increasing water depth in Kuroshio mainstream, indicating the impacts of biological production, air-sea exchanges, organic matters degradation, and CaCO₃ dissolution. All parameters in Kuroshio Upwelling Water (KUW) were affected by upwelled deeper water. The influences of Kuroshio Surface Water in outer shelf (high in pH, low in DIC/TAlk) were restricted by Taiwan Current Warm Water in surface and 30m layer, while the northward Kuroshio Branch Current to the North of Taiwan (low in pH, high in DIC/TAlk) predominated in the bottom of outer shelf area. KUW had influences even in surface layer, which may bring Kuroshio Intermediate Water into the shelf. Transport of DIC from Kuroshio to ECS in wet season (May-October) was calculated to be 58798.9×10^9 mol (net export: 37382.9×10^9 mol); most of DIC exported by outflowing ECS waters entered the Japan Sea via Tsushima Warm Current.

Key words Dissolved Inorganic Carbon; Kuroshio; East China Sea; distribution; impact