

台湾东部黑潮主流径区 2014 年春秋季节水体碳的垂直变化特征与影响因素^{*}

宋金明^{1, 2①} 段丽琴^{1, 2} 卢 汐¹

(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. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266237)

摘要 2014 年春秋季节对台湾以东黑潮主流径区碳化学的研究表明, 春季黑潮主流径水体垂向可划分为黑潮表层水(KSW)、热带水(KTW)、中层水(KIW)和深层水(KDW), 水层以 30~50m、300~400m 和 800~1000m 分界。黑潮水体中溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)平均含量为 2078.1 $\mu\text{mol/kg}$, 溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)平均含量分别为 98.59 $\mu\text{mol/L}$ 和 1.62 $\mu\text{mol/L}$ 。各参数中, pH 随水深的增加而降低; 总碱度(total alkalinity, TAlk)、DIC 含量和 DIC/TAlk 则随水深的增加而升高; DOC 和 POC 在 200m 以浅含量较高, 而在 200m 以深降为相对均一的低值。黑潮主流径水体中碳的分布在表层受到浮游植物生产、细菌分解、海-气界面交换及陆源输送等多种因素的综合影响; 在次表层至中层水体中, 初级生产的影响消失, 有机物的分解对水体中的碳分布有着重要影响; 在中层至底层水体中, 有机物分解逐渐完成, CaCO_3 溶解过程及陆坡沉积物的水平输运成为水体中碳分布的主要影响因素。位于上升流中心的 TW0-1 站位各参数均受到较深层次水体挟游离 CO_2 与营养盐上涌的影响, 与黑潮主流径其他站位略有不同。秋季黑潮主流径水体垂向上依然能够划分为表层水、热带水、中层水和深层水 4 层, 分别在 75~100m、300~500m 和 800~1000m 分界。秋季黑潮水体中 DIC 平均含量为 2078.7 $\mu\text{mol/kg}$, DOC 和 POC 平均含量分别为 92.36 $\mu\text{mol/L}$ 和 1.93 $\mu\text{mol/L}$; 黑潮主流径各层水体中各水文、碳参数分布规律与春季相似, 影响因素也类似。秋季黑潮流域各站位碳参数值与春季略有不同, 其可能是由浮游植物生产、利用及微生物分解量降低造成的。秋季黑潮水体中 DIC 含量和 DIC/TAlk 与春季差异较小, 但 pH 和 TAlk 高于春季, 由此可以推测, 秋季黑潮水体中有着较高的 $[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$ 。

关键词 碳; 海水; 垂直变化; 影响因素; 台湾东部黑潮主流径区

中图分类号 P734.2

doi: 10.12036/hyxxjk20160721003

^{*} 资助项目: 中国科学院海洋先导专项(XDA11020102); 青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”计划项目(2015ASTP-OS13)。

① 通讯作者: 宋金明, 男, 研究员, 从事海洋生物地球化学。E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2016-07-21, 收修改稿日期: 2016-07-29

黑潮与毗邻的东海和南海陆架海域之间存在重要的物质与能量交换,对东海和南海的碳收支影响巨大,探明黑潮主流径碳的变化特征对查明黑潮对东海和南海的碳循环与源汇变化意义重大(Gao and Song, 2006; 宋金明等, 2008; Song, 2010)。

有研究表明,溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)由东海陆架向黑潮输出(Hung and Lin, 1995; Chen and Wang, 1999; Hung et al., 2003)。虽然黑潮提供了进入东海陆架的大部分 DOC,但入侵东海陆架的黑潮水体,尤其是上升进入东海陆架的黑潮次表层热带水和中层水 DOC 浓度较低,而向黑潮输送的东海陆架水则有着较高的新生产力和 DOC 浓度,因此东海陆架水向黑潮水体有 DOC 净输出。Chen 和 Wang(1999)根据实测 DOC 浓度和盐平衡箱式模型所得的黑潮及毗邻海区水团流量,计算得到东海陆架区跨陆架向黑潮海域净输出 DOC 量值约为 $2431 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ 。与 DOC 相似,颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)同样由东海陆架区向黑潮水体输出(Chen and Wang, 1999; Hung et al., 2000; Liu et al., 2003)。据 Chen 和 Wang(1999)计算,东海陆架向黑潮海域 POC 净输出通量约为 $1051 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ 。虽然黑潮水挟 POC 进入东海陆架区,但因其 POC 浓度相对较低,其挟带 POC 通量总计为 $150 \times 10^9 \text{ mol C/a}$,尚不及河流输入的总量($750 \times 10^9 \sim 875 \times 10^9 \text{ mol C/a}$)(Cauwet and Mackenzie, 1993)。有关溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)和颗粒无机碳(particulate inorganic carbon, PIC)通量的结果少见报道,但卢汐等(2015, 2016)根据最近观测数据对其进行了一定的研究。Chen 和 Wang(1999)根据观测数据和箱式模型,计算得到东海陆架水体跨陆架向黑潮水体净输出 DIC 的通量为 $21\ 733 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ 。未有确切数据计算黑潮与东海陆架海区水体交换中的 PIC 通量,但由 Chen 和 Wang(1999)根据悬浮

颗粒物中无机碳和有机碳的比值(inorganic carbon/organic carbon, IC/OC)估算得出,东海陆架悬浮沉积物离岸输送挟带 PIC 量约为 $1852 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ 。Chen 等(2006)根据实测数据和先前研究中在水盐平衡基础上得到的箱式模型,计算了黑潮与南中国海之间经由吕宋海峡的碳收支,若不考虑台湾海峡水流挟碳量,则南中国海向黑潮净输送 DOC、POC 和 PIC 的量分别为 $2652 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ 、 $1009 \times 10^9 \text{ mol C/a}$ 和 $230 \times 10^9 \text{ mol C/a}$;而黑潮向南中国海净输送 DIC 的量为 $13\ 005 \times 10^9 \text{ mol C/a}$,若只考虑雨季,则 DIC 由南中国海向黑潮水体净输出。

本文基于 2014 年春秋两季对台湾以东黑潮主流径区域的调查,研究了该区域海水 pH、总碱度(total alkalinity, TALK)、DIC、DOC、POC 等碳的垂直分布特征及影响因素,为阐明黑潮碳对邻近陆架区碳循环的影响提供了依据。

1 样品采集与分析

2014 年 5~6 月和 10~11 月乘“科学一号”考察船对台湾以东黑潮主流径区进行春秋两季调查。站位设计如图 1 所示。调查项目包括温度(temperature, T)、盐度(salinity, S)、pH、TALK、DIC、DOC、POC、总悬浮颗粒物(total suspended matters, TSM)和叶绿素 a (chl a)等。

水体的 T 、 S 由 SBE911-Plus CTD(Sea Bird Inc., 美国)进行现场测量,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(Thermo Fisher, 美国;相对精度为 ± 0.001 ,分辨率为 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, $\text{pH}=8.089$, $S=35\text{PSU}$)和二氨基吡啶-盐酸标准缓冲溶液($\text{pH}=6.786$, $S=35\text{PSU}$)对电极进行校正,精度可达 $\pm 0.002\text{pH}$ 单位。另取未过滤水样于

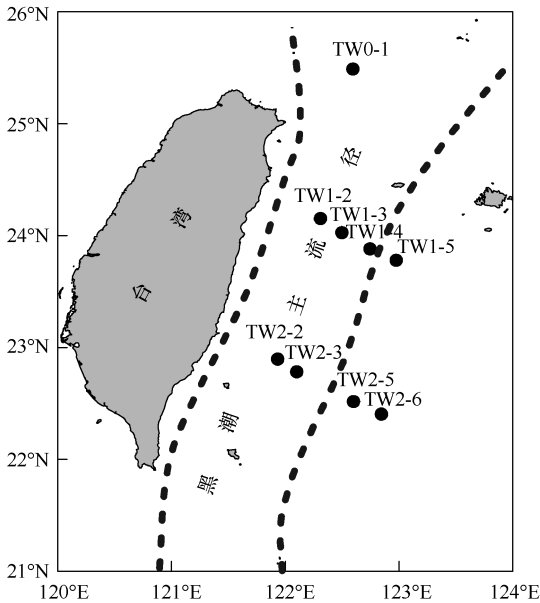


图1 2014年春秋季节台湾岛东部黑潮主流径采样
站位

Fig.1 Sampling stations in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in spring and fall, 2014

125ml 洁净磨口玻璃瓶中, 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 $^\circ\text{C}$ 下预先灼烧 4h 并称空重)过滤 600~5000ml 水样, 取约 50ml 滤液转移至洁净玻璃瓶(450 $^\circ\text{C}$ 下预先灼烧 4h)中, 加入 1~2 滴饱和 HgCl_2 溶液固定保存, 密封保存于 -5 $^\circ\text{C}$ (暗处)以备实验室测定 DOC; 滤膜保存于 -20 $^\circ\text{C}$ 以备测定 POC 和 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 $^\circ\text{C}$ 以备测定 chl *a*。

TAlk 测定按照 Dickson 等(2007)设计的开放单元滴定法根据现有条件调整进行。水样在精确称重($\pm 0.01\text{g}$)后恒温至 25.0 $^\circ\text{C}$, 以预先标定并测定密度的盐酸溶液在 905 Titrando 自动滴定仪(Metrohm, 瑞士)操作下进行滴定。取 pH=3.0~3.5 加酸体积与相应 pH 数据, 根据 Gran 作图法算得 TAlk。测定结果以 Dickson 的标准海水进行校准, 测量精密度约为 0.001

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

实验室 DOC 测定按照国家海洋监测规范 (GB17378.4—2007)中总有机碳(total organic carbon, TOC)仪器测定法进行。水样以浓硫酸酸化至 pH ≈ 2 后, 使用 vario TOC cube 总有机碳分析仪(Elementar, 德国), 以高温催化氧化-非分散红外吸收法测定 DOC 含量, 测定以邻苯二甲酸氢钾标准溶液进行校准, 测量精度约为 1%。POC 滤膜样品于 60 $^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重, 称重之后以浓盐酸熏蒸 12h, 再次烘干, 使用 vario Macro cube 元素分析仪(Elementar, 德国), 以高温催化演化-热导检测法测定 POC 含量, 测定以磺胺标准品进行校准, 测量精度约为 0.005(陈鑫等, 2014)。DIC 利用 CO_2 Sys EXCEL Macro 程序(Lewis and Wallace, 1998), 由温度、盐度、pH 与 TAlk 等参数计算得到, 部分样品经实测方法(宋金明等, 2004)比对得到。海水 CO_2 解离常数 K_1 、 K_2 采用 Mehrbach 等(1973)提出并由 Dickson 和 Millero(1987)修正的方法计算得到。

chl *a* 样品加入 10ml N, N-二甲基甲酰胺(dimethyl formamide, DMF)萃取剂避光放置 0.5h 以上, 以 F-4600 型荧光分光光度计(Hitachi, 日本)采用常规荧光法测定。TSM 由烘干后膜重与空膜重之差除以滤水体积求得。

2 结果与讨论

2.1 春季黑潮主流径水体中碳的垂直分布与影响因素

2.1.1 无机碳

春季 9 个站位的 pH、TAlk 和 DIC 3 个无机碳参数的垂直分布特征如图 2(见文后彩图)所示。pH 范围为 7.54~8.20, 平均值为 7.92。总体而言, 表层水 pH 最高, 为 8.08~8.20, 平均值为 8.17。次表层热带水到中层水中 pH 随水深的增加而急剧下降, 范围为 7.54~8.19, 热带水和中层水中 pH 平均值分别为 8.07 和 7.69。pH 在 800m 水层达到最小值后, 随水深的增加略有回升, 为 7.54~7.74, 平均值为 7.61。

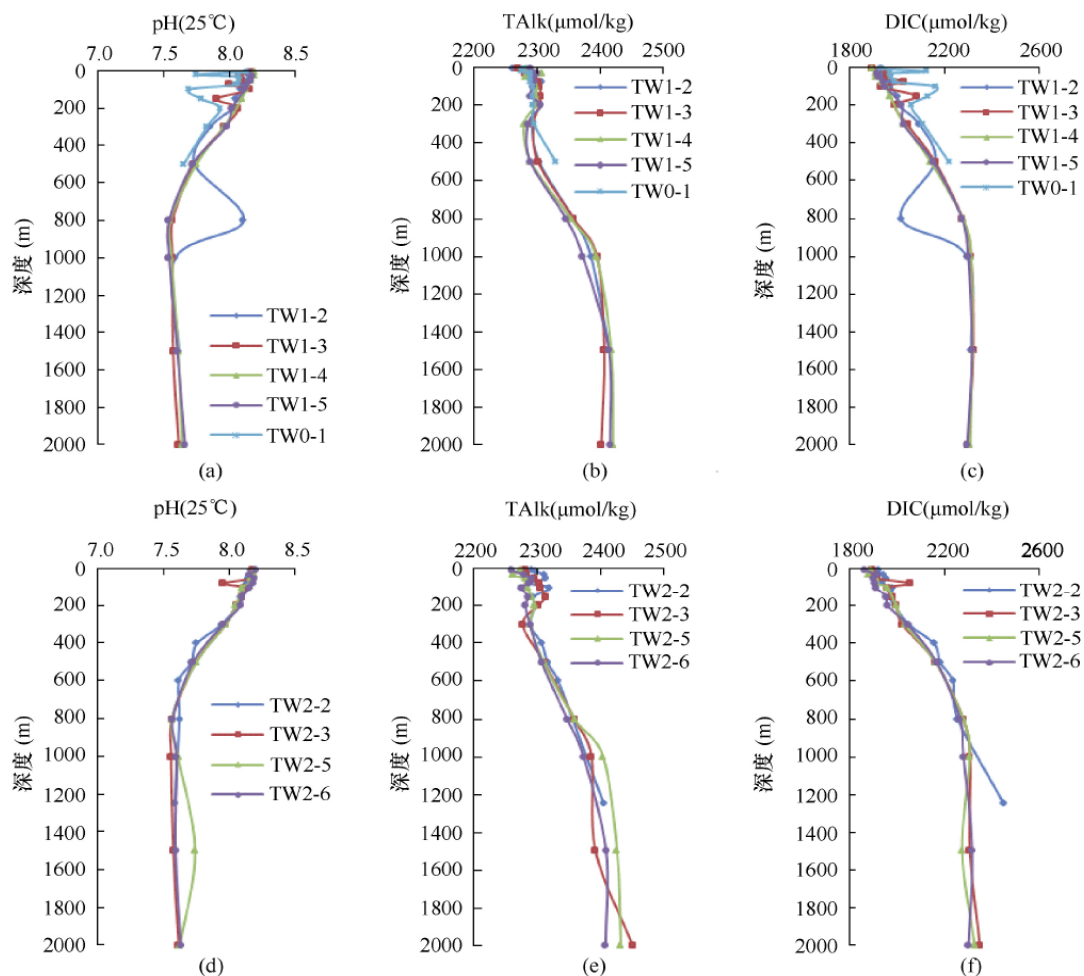


图2 2014年春季台湾岛东部黑潮主流径(含上升流中心)无机碳参数的垂直分布

Fig.2 Vertical distributions of inorganic carbon parameters in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the spring, 2014

TAlk 含量范围为 2259.58~2451.63 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2321.8 $\mu\text{mol/kg}$ 。总体而言, 黑潮表层水 TAlk 最低, 0~30m 水层中 TAlk 随水深的增加而增加, 含量范围为 2259.58~2312.83 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2285.0 $\mu\text{mol/kg}$ 。热带水中 TAlk 含量较为均一, 随水深的增加略有下降, 范围为 2275.95~2320.56 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2295.2 $\mu\text{mol/kg}$ 。中层水中 TAlk 含量随水深的增加而显著升高, 范围为 2290.52~2360.05 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2329.0 $\mu\text{mol/kg}$ 。TAlk 在黑潮深层水中的垂直变化梯度最小, 含量最高, 为 2373.01~2451.63 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2406.4 $\mu\text{mol/kg}$ 。

DIC 含量范围为 1867.63~2451.34 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2078.1 $\mu\text{mol/kg}$ 。总体而言, 黑潮表层水中 DIC 含量最低, 其含量从表层水至中层水随水深的增加而升高, 含量范围为 1867.63~2280.90 $\mu\text{mol/kg}$ 。黑潮表层水、热带水和中层水中 DIC 的平均浓度分别为 1913.2 $\mu\text{mol/kg}$ 、1980.2 $\mu\text{mol/kg}$ 和 2201.6 $\mu\text{mol/kg}$ 。黑潮深层水中 DIC 含量最高, 分布变化不大, 平均值为 2315.7 $\mu\text{mol/kg}$ 。

处于上升流中心的 TW0-1 站位各无机碳参数数值和邻近的 TW1 断面各站位略有不同, 但分布趋势与其相似。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和台湾以东黑潮主流径各站位中层水整体平均值相近; 表层和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 和 TW2 断面各站位相应水深, 范围为 7.65~8.13, 平均值为 7.90, 其表层水、热带水和中层水的 pH 平均值分别为 7.99、7.89 和 7.65。TW0-1 站位水体中的 TA_{ik} 含量则和台湾以东黑潮主流径断面各站位相差不大, 含量范围为 2276.73~2330.77 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2293.7 $\mu\text{mol/kg}$,

其表层水、热带水和中层水中 TA_{ik} 含量平均值分别为 2282.0 $\mu\text{mol/kg}$ 、2293.4 $\mu\text{mol/kg}$ 和 2330.8 $\mu\text{mol/kg}$ 。TW0-1 站位各层水 DIC 整体大于 TW1 和 TW2 断面站位, 总体含量范围为 1934.94~2219.85 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2069.4 $\mu\text{mol/kg}$, 其表层水、热带水和中层水中 DIC 含量平均值分别为 2012.0 $\mu\text{mol/kg}$ 、2073.1 $\mu\text{mol/kg}$ 和 2219.9 $\mu\text{mol/kg}$ 。

2.1.2 有机碳

春季各站位 DOC 和 POC 的垂直分布特征如图 3(见文后彩图)所示。与无机碳参数相比, 各有机碳参数分布规律和所在水层相关性较

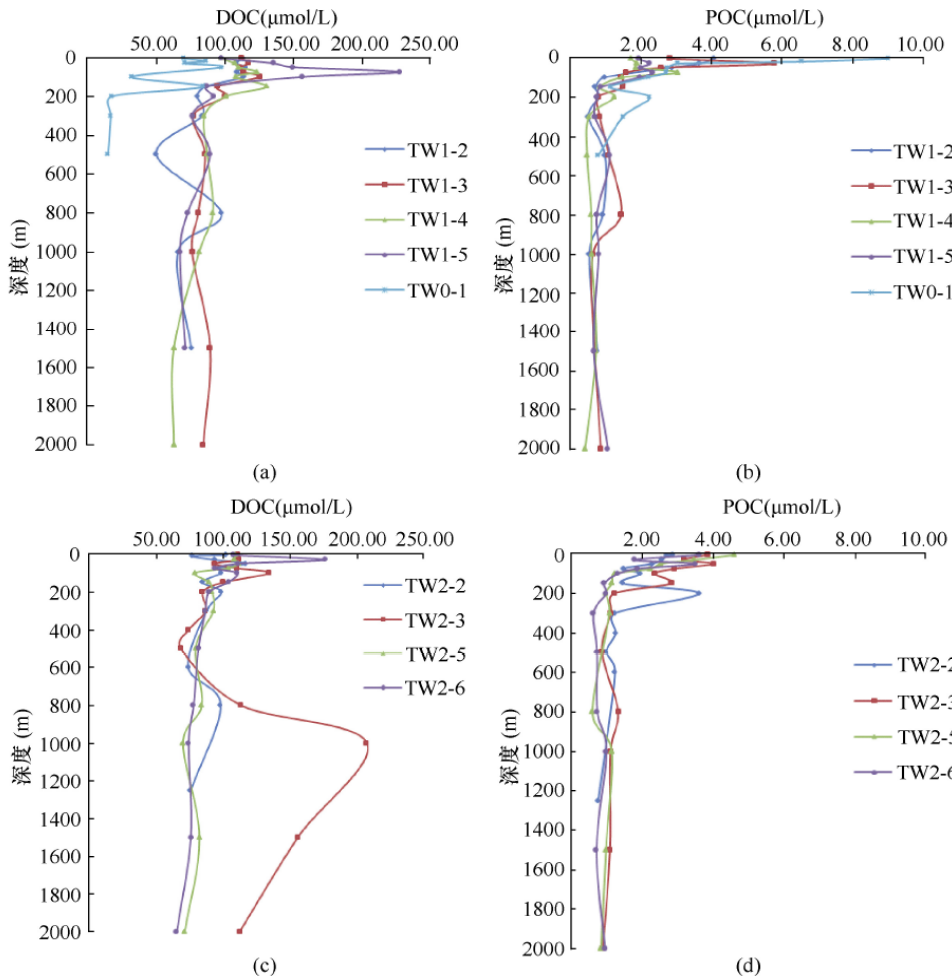


图 3 2014 年春季台湾岛东部黑潮主流径(含上升流中心)有机碳的垂直分布

Fig.3 Vertical distributions of organic carbon in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the spring, 2014

小。DOC 含量范围为 50.50~227.42 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 98.59 $\mu\text{mol/L}$ 。从总体趋势看, DOC 含量在表层水体中有高值, 在 200m 以深水体中为相对均一的低值, 随水深的增加略有下降, 至近底层又略有回升。黑潮表层水和热带水中 DOC 含量较高, 范围为 76.58~227.42 $\mu\text{mol/L}$, 表层水和热带水中 DOC 含量平均值分别为 111.20 $\mu\text{mol/L}$ 和 104.67 $\mu\text{mol/L}$ 。黑潮中层水和深层水中 DOC 含量较低, 平均值分别为 82.88 $\mu\text{mol/L}$ 和 86.60 $\mu\text{mol/L}$ 。各站位中, TW2-3 站位在 1000m 水深出现 DOC 高值, 在 1000m 以深的深层水中 DOC 含量仍显著高于其他站位, 最高达 207.67 $\mu\text{mol/L}$ 。

POC 含量范围为 0.43~5.80 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 1.62 $\mu\text{mol/L}$ 。与 DOC 总体分布规律相似, POC 含量在表层水体中较高, 在 200m 以深水体中有低值并相对均一。黑潮表层水中 POC 含量最高, 范围为 1.72~5.80 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 3.11 $\mu\text{mol/L}$ 。热带水中 POC 含量低于表层, 并有随水深的增加而逐渐降低的趋势, 在 200m 左右水深略有回升, 至 200m 以深水体中又迅速下降, 范围为 0.53~4.02 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 1.65 $\mu\text{mol/L}$ 。黑潮中层水和深层水中 POC 含量为相对均一的低值, 范围为 0.43~1.45 $\mu\text{mol/L}$, 中层水和深层水中 POC 含量平均值分别为 0.95 $\mu\text{mol/L}$ 和 0.83 $\mu\text{mol/L}$ 。

TW0-1 站位 DOC 含量同样在 200m 以浅有高值, 但总体数值明显低于 TW1 和 TW2 断面站位相应水深, 含量范围为 15.33~98.25 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 54.96 $\mu\text{mol/L}$, 其表层水、热带水和中层水的 DOC 含量平均值分别为 75.95 $\mu\text{mol/L}$ 、50.29 $\mu\text{mol/L}$ 和 15.33 $\mu\text{mol/L}$ 。TW0-1 站位水体中 POC 含量则和 TW1、TW2 断面各站位区别不大, 在 5~20m 水体中, 其 POC 含量甚至远高于黑潮主流径其他站位。TW0-1 站位 POC 含量范围为 0.80~9.02 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 3.20 $\mu\text{mol/L}$, 其表层水、热带水和中层水的 POC 含量平均值分别为 6.21 $\mu\text{mol/L}$ 、

2.10 $\mu\text{mol/L}$ 和 0.80 $\mu\text{mol/L}$ 。

2.1.3 影响春季黑潮水体碳的因素

海水中各形态碳的分布、转化与循环过程复杂, 受到多种因素的影响。海水中无机碳体系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。海水中有机碳体系各参数的分布则与外源输入、生物生产、摄食与消耗分解, 以及物理、化学降解过程关系密切(宋金明, 2011)。

海水中溶解 CO_2 含量可以同时指示生物活动、化学转换及物理混合等过程的影响, 因此是海洋碳循环体系中一项重要的指标。海水中二氧化碳逸度 $f\text{CO}_2$ 的计算公式如下(Chou et al., 2009):

$$f\text{CO}_2 = [K_2 \times (2 - \text{TAlk}/\text{DIC})^2] / [K_0 \times K_1 \times (\text{TAlk}/\text{DIC} - 1)],$$

式中, K_0 为 CO_2 在海水中的亨利常数; K_1 和 K_2 分别为一级和二级海水 CO_2 解离常数。从该公式可以看出, $f\text{CO}_2$ 与 DIC/TAlk 呈正相关, 即 DIC/TAlk 可指示水体中溶解 CO_2 的含量, 比值越高说明水体中溶解的 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 见文后彩图)。黑潮表层水中 DIC/TAlk 最低, 从表层水至中层水, DIC/TAlk 总体随水深的增加而升高, 但在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 相对均一, 且随水深的增加而略有回落。受上升流与较高 DIC 含量的影响, TW0-1 站位水体中 DIC/TAlk 整体大于 TW1 和 TW2 断面各站位。

在黑潮表层水中 DIC/TAlk 、 TAlk 和 DIC 含量较低, 而 pH 和有机碳(DOC、POC)含量较高, 且 DIC/TAlk 随水深增加的上升趋势伴随着水体中 pH、DOC、POC 的下降和 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, 因此这些分布特征体现了浮游植物生产过程中吸收 CO_2 、生成有机物和 CaCO_3 壳体所造成的影响。然而, 黑潮表层水

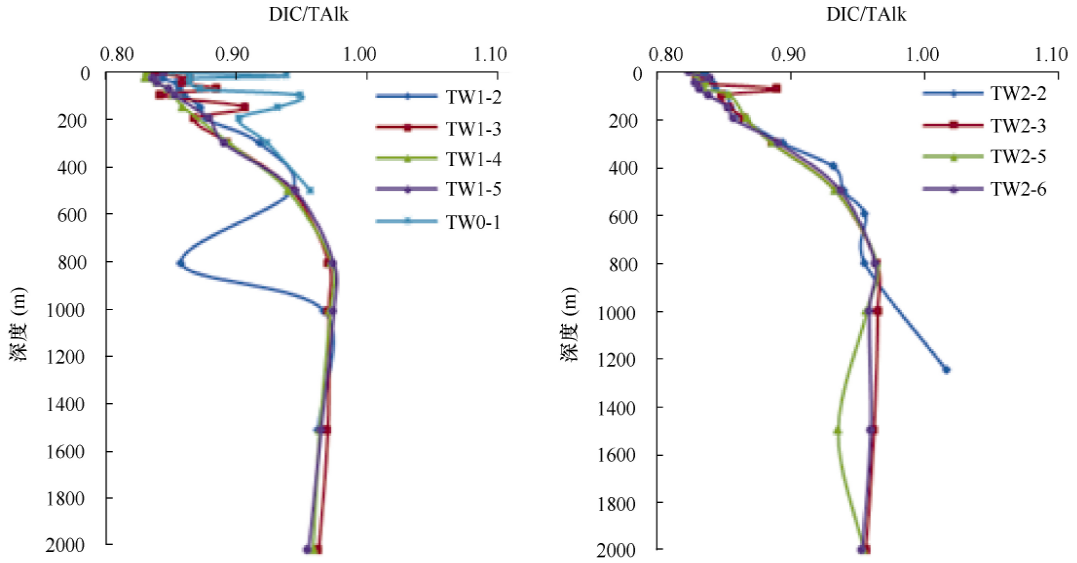
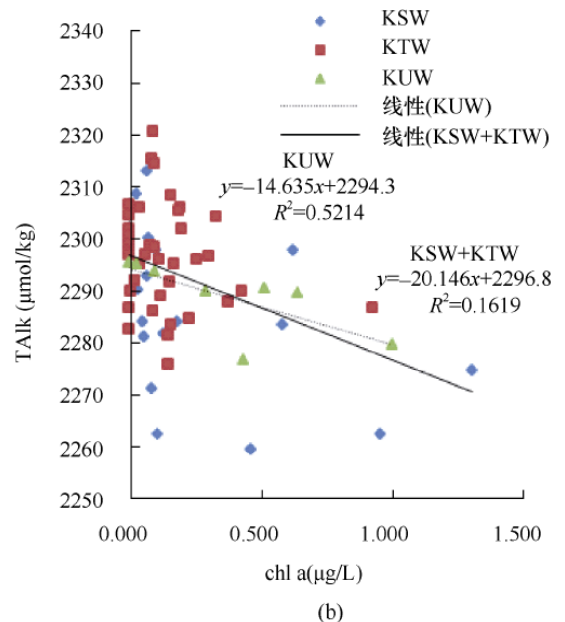
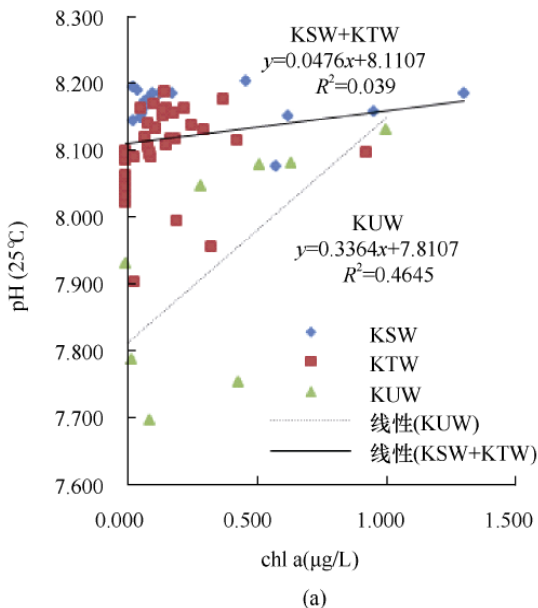


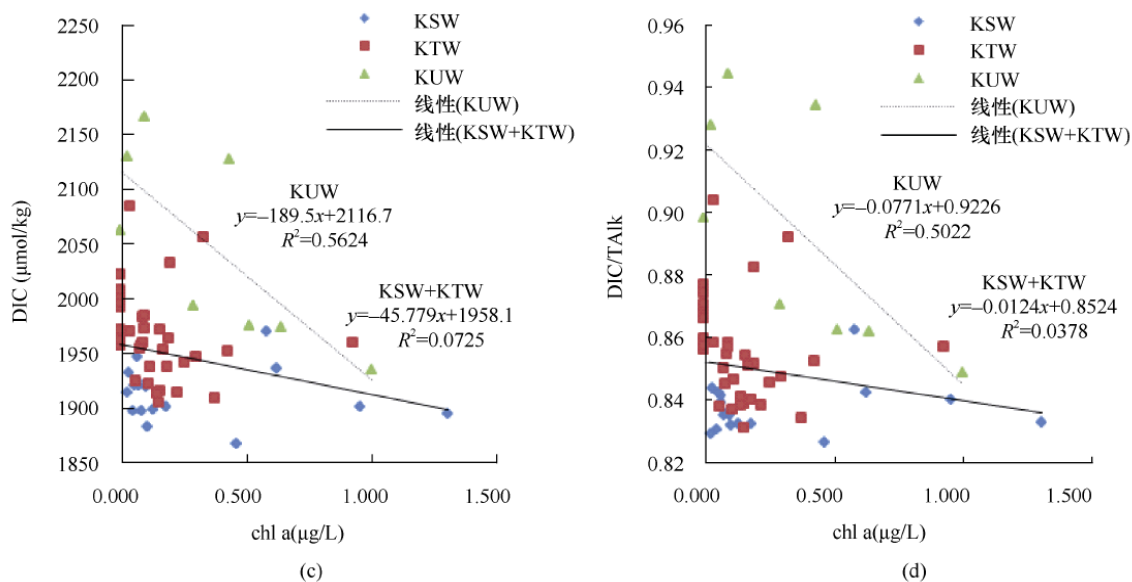
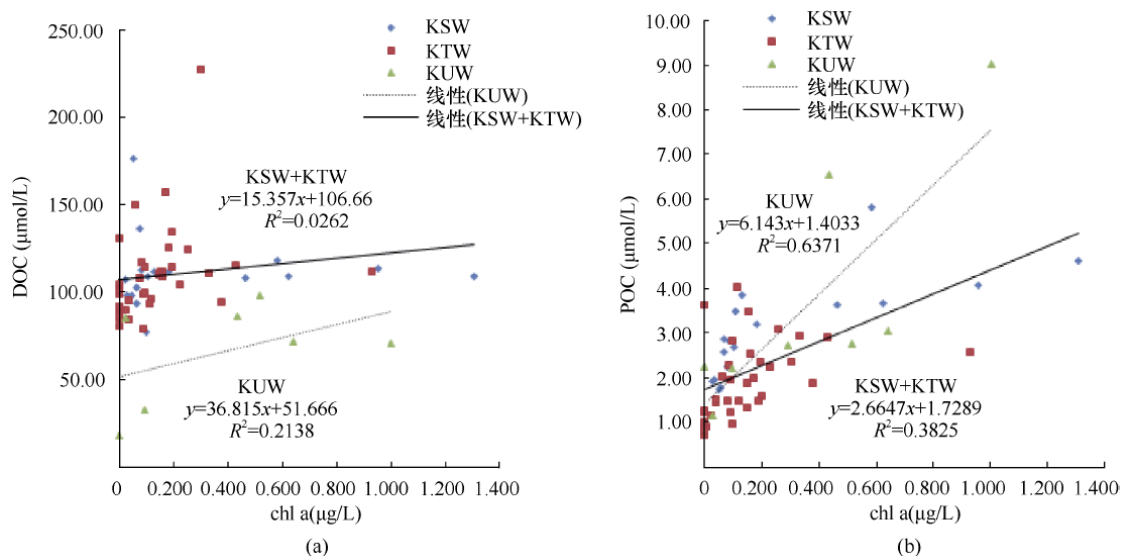
图 4 2014 年春季台湾岛东部黑潮主流径各站 DIC/Talk 的垂直分布

Fig.4 Vertical distributions of DIC/Talk in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the spring, 2014

中 chl *a* 与各无机碳、有机碳参数相关性并不十分显著(图 5, 图 6), 说明光合作用产物的原位分解再循环、呼吸作用, 以及海-气界面交换甚至有机物光化学分解等过程也对表层水中 CO_2 浓度及其余各碳参数的分布产生了影响。此外, 黑潮表层水中各无机碳参数与海水盐度相关性较低(图 7), 而与海水温度相关性

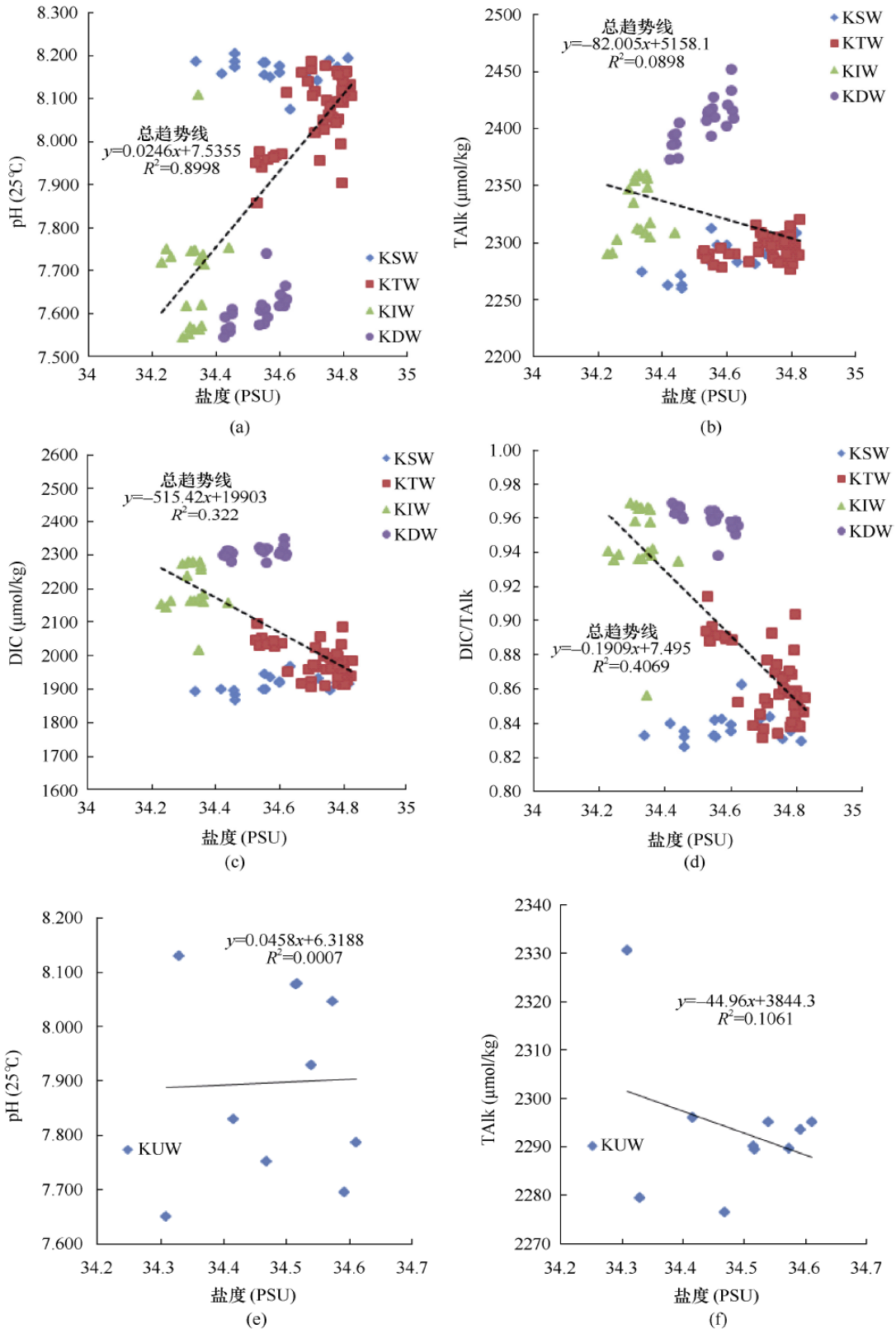
较高(图 8), 且有机碳参数与海水盐度、温度相关性普遍低于无机碳参数(图 9), 说明在黑潮 0~30m 水层中, 东海陆架水输出导致的盐度下降对无机碳和有机碳体系影响不大, 较高的海水温度有利于生物生长和 CO_2 移除。黑潮表层水中 POC 含量与盐度呈负相关, 体现了陆架低盐水体颗粒物输出的影响。



图5 2014年春季台湾岛东部黑潮主流径无机碳参数与 chl *a* 的关系Fig.5 Relationships between inorganic carbon parameters and chl *a* in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the spring, 2014图6 2014年秋季台湾岛东部黑潮主流径有机碳与 chl *a* 的关系Fig.6 Relationships between organic carbon and chl *a* in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the fall, 2014

黑潮次表层热带水中, DIC/Talk 随水深增加的上升同样伴随着水体中 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的游离 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, 随水深的增加游离 CO_2 含量也增加, 而 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量相对恒定。有机碳体系中, DOC 和 POC 含量在 200m 以浅水体中随水深的增加而明显下降, 在 200m 以深含量低且变化较



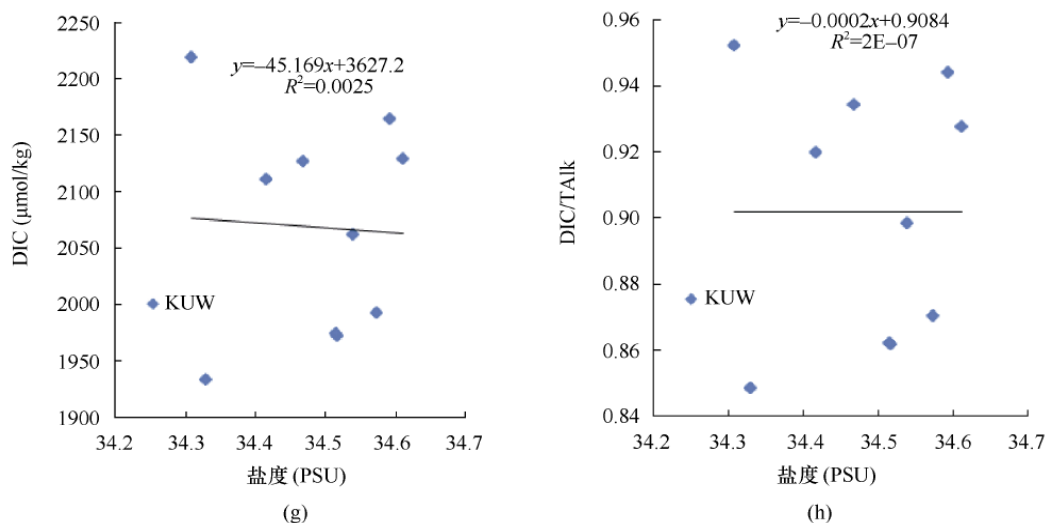
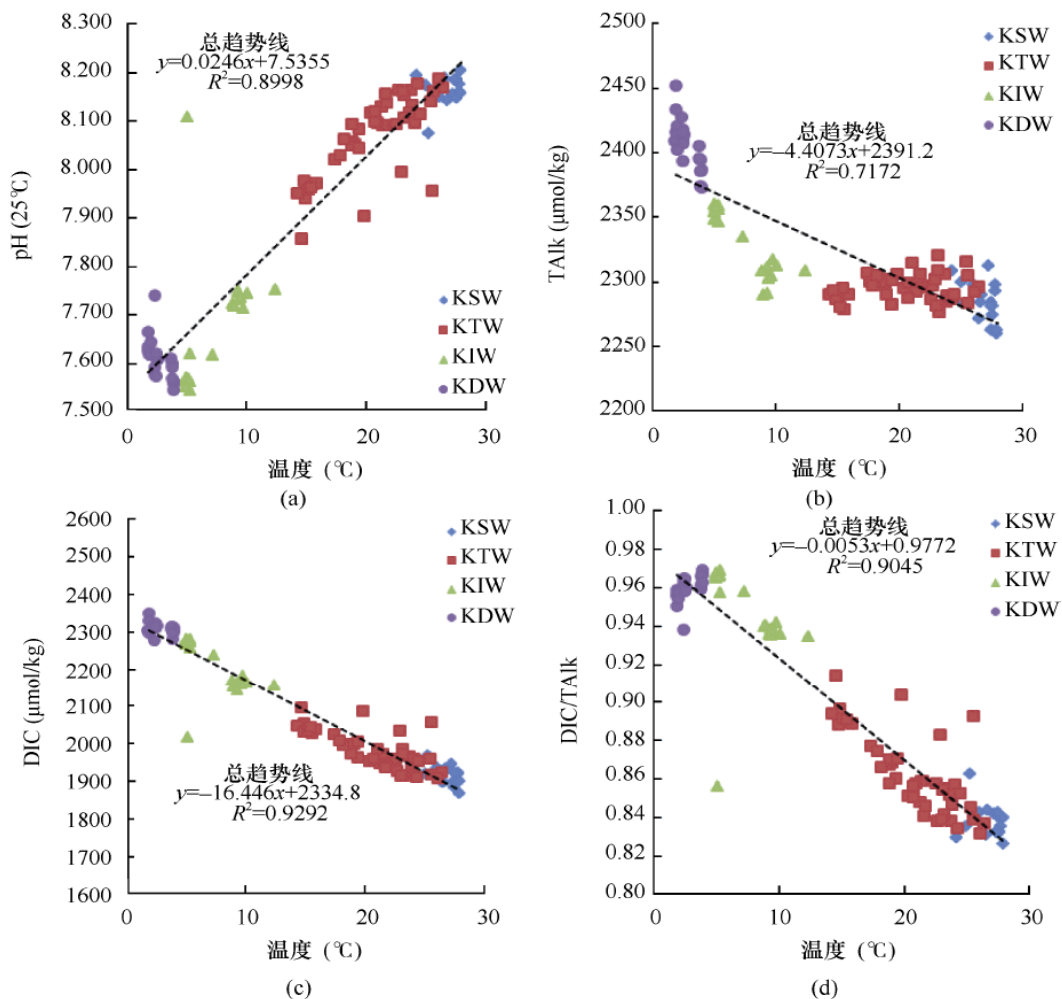


图7 2014年春季台湾岛东部黑潮主流径无机碳参数与盐度关系

Fig.7 Relationships between organic carbon parameters and salinity in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the spring, 2014



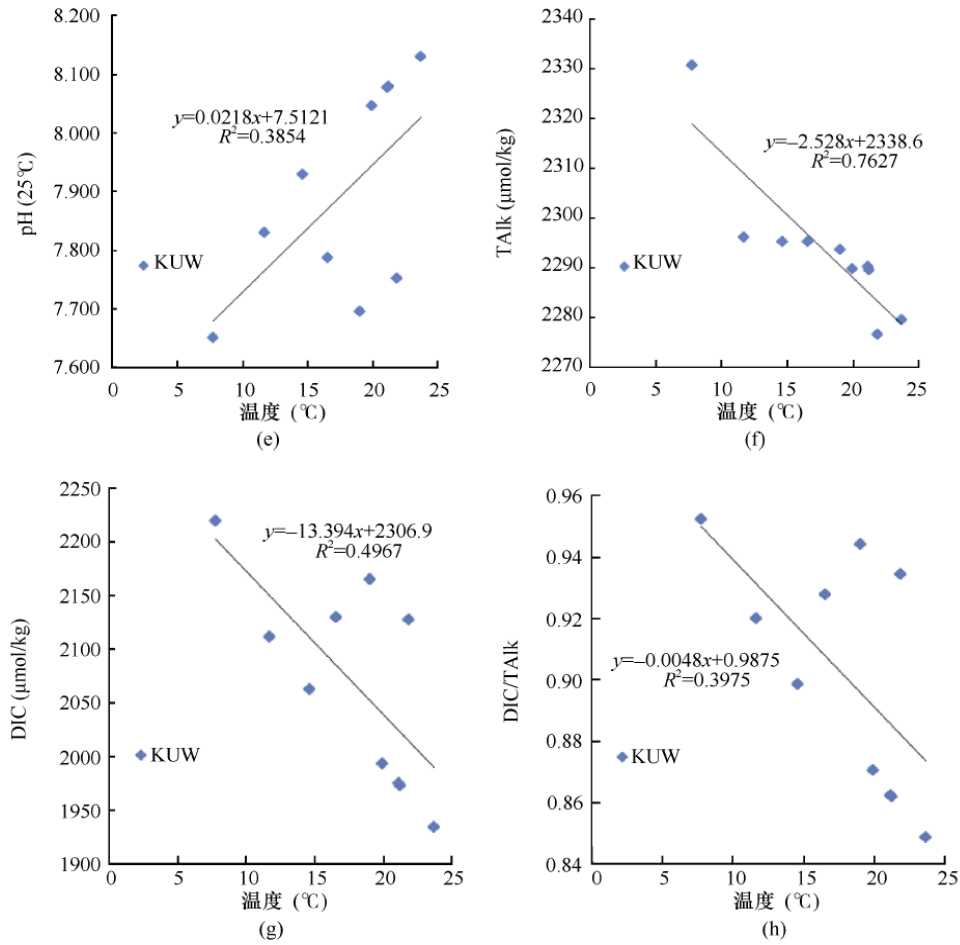
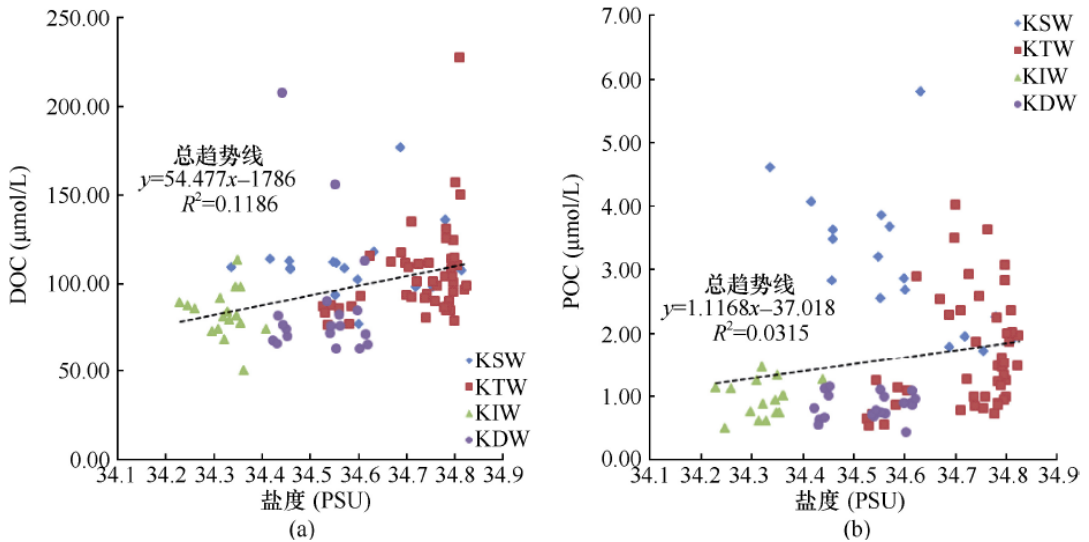


图 8 2014 年春季台湾岛东部黑潮主流径无机碳参数与温度的关系

Fig.8 Relationships between inorganic carbon parameters and temperature in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the spring, 2014



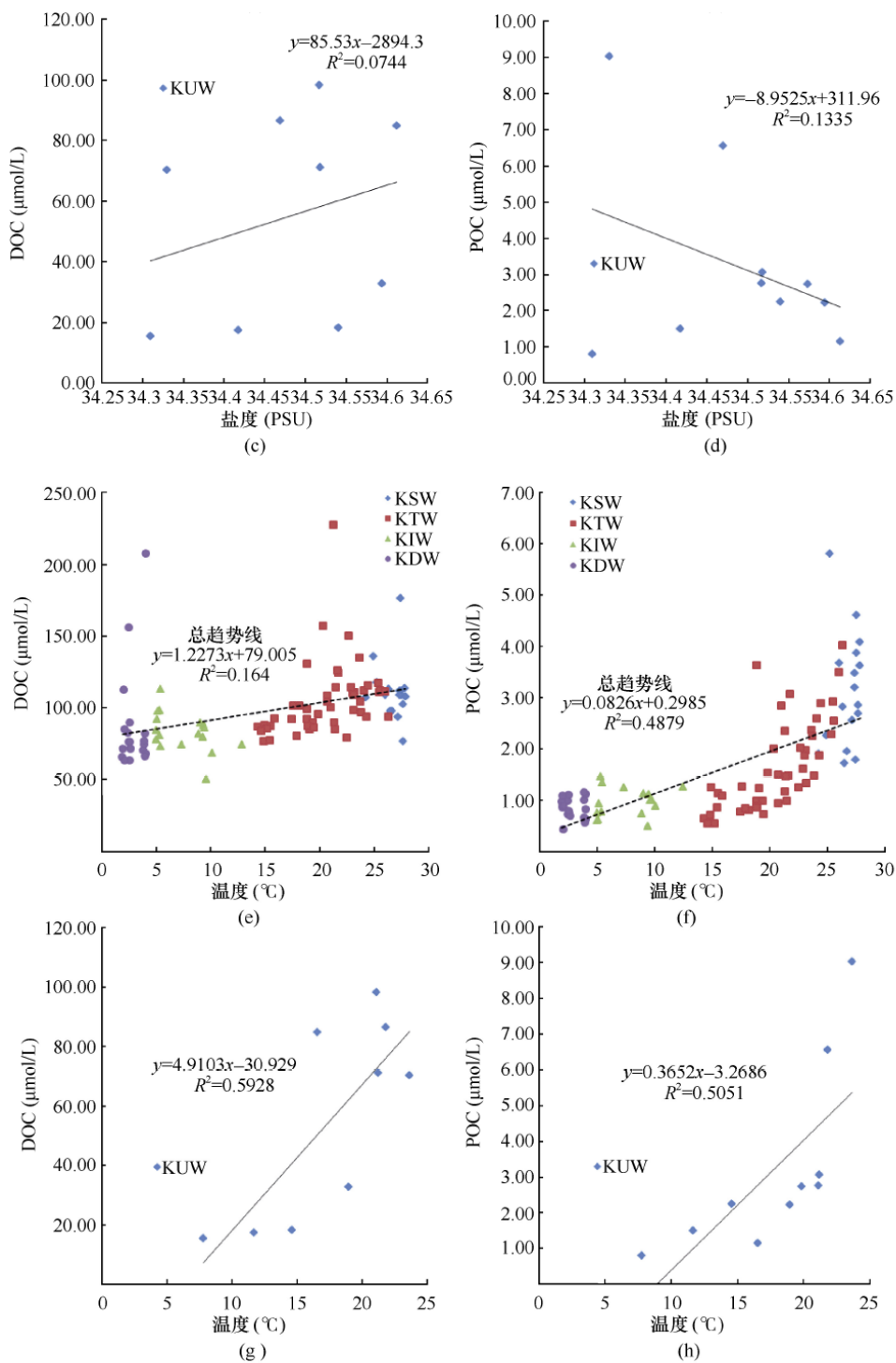


图9 2014年春季台湾岛东部黑潮主流径有机碳与盐度、温度的关系

Fig.9 Relationships between organic carbon parameters and S and T in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the spring, 2014

小。由 chl *a* 的分布趋势可以看出, 在 50~150m 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* 含量均低于检出限, 各无机碳参数与 chl *a* 相关性也不明显(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)的研究发现, 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, 本文的研究中也观测到这一现象, 由此可推断, 有机物分解可能是黑潮热带水中游离 CO₂ 增加的主要来源。黑潮热带水中, pH、DIC 和 DIC/Talk 与水体温度、盐度均有明显的相关性(图 7, 图 8), 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 CO₂, 导致 pH 的下降及 DIC 含量和 DIC/Talk 比值的上升。此外, 根据 Chen 等(1982)的研究, 海水中有有机物分解生成的酸性物质将导致 Talk 略有下降, $\Delta\text{Talk} : \Delta\text{DIC} \sim 17 : 106$, 由此也解释了黑潮热带水中 Talk 随水深增加略微下降的原因。相对于无机碳参数, 有机碳参数(尤其 POC)受浮游植物生产影响更为明显(图 6)。与陆源输入有机碳相比, 海洋自生有机碳更易被原位分解利用(Hung and Lin, 1995), 因此大部分有机碳在 200m 以浅水体中被分解再循环, 未被利用的有机碳部分则随水深增加被继续分解, 其含量与温度、盐度均呈现正相关(图 9)。

整体而言, 春季黑潮中层水中 DIC/Talk 随水深的增加而明显升高, 同时水体中 pH 明显下降, DOC、POC 含量略微下降, 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的相关性较弱, 与温度相关性显著(图 7, 图 8)。在这一水层中, 随着水深的增加, 水温降低, 压力增大, CaCO₃ 表观溶度积常数(K'_{sp})升高, CaCO₃ 开始溶解, 因此 Talk 迅速升高。而 DIC/Talk 升高及 pH 下降的趋势说明, 在这一水层中有机物仍被不断降解, 生成的 CO₂ 抵消了 CaCO₃ 溶解过程

中的消耗。根据 Sheu 等(1996)的研究与本文的研究发现, 黑潮水体中 DO 含量最小值出现在 800~1000m 水层, 也可以证实中层水中仍存在有机物的耗氧降解过程。虽然相较于各无机碳参数, DOC 与 POC 含量在黑潮中层水中下降趋势不明显, 且与温度、盐度相关性均较弱, 但先前的研究表明, 黑潮中层水中有机碳含量与表观耗氧量(apparent oxygen utilization, AOU)仍存在负相关, 其中又以 POC 降解耗氧为主, DOC 降解耗氧仅占 19%~25%(Hung and Lin, 1995; Hung et al., 2000)。在本文的研究中发现, DOC/POC 比值自热带水(平均值为 78.54)至中层水(平均值为 98.00)有所升高, 与先前的报道相符, 证明黑潮中层水中依然存在有机碳的降解过程, 并以 POC 降解为主。

黑潮深层水中各碳参数分布变化不大, 这一水层有着 4 个水层中最高的 DIC/Talk、Talk 和 DIC 含量, 以及最低的 pH, 总体而言有机碳含量也为低值。随水深的增加, 深层水中盐度回升, 温度略有下降, 无机碳参数中 pH 和 Talk、DIC 略有升高, DIC/Talk 则略有下降, 有机碳参数中 DOC 和 POC 含量均略有回升。Sheu 等(1996)与 Chen 等(2006)指出, 在台湾东北黑潮流域 1000m 以深水体中, DO 浓度随水深的增加而上升, 由此可知, 在黑潮深层水中, 有机物分解已基本完成, 而 CaCO₃ 的溶解是影响各无机碳参数分布的主要因素, 底层沉积物释放与水平输运则可能是有机碳含量有所回升的原因。

位于上升流区的 TW0-1 站位各无机碳、有机碳参数分布整体趋势类似于台湾以东的 TW1 和 TW2 断面各站位, 影响因素也相近。与 TW1 和 TW2 两断面站位相比, TW0-1 上升流站位 200m 以浅水体中各碳参数分布与 chl *a* 含量分布相关性更大, 即受浮游植物生产影响更显著。TW0-1 站位与 TW1 和 TW2 断面站位相比, Talk 相近, pH 偏低, 而 DIC 含量和 DIC/Talk 偏高, 这是由于上升流挟带较深层

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。同时, TW0-1 站位水体中 DOC 含量明显低于 TW1 和 TW2 断面站位, POC 含量则相近,甚至在表层有高值,这种现象在先前研究中也发现(Hung et al., 2000), 其可能是由于强劲的上升水流挟带大量营养盐,促进了周围海域生物生产,从而增加了上升流区水体中的 POC 含量;然而,在营养盐丰富的情况下,浮游植物对 DOC 的分泌并不活跃(刘诚刚等, 2010; Hung and Lin, 1995), 但细菌对 DOC 的分解转化较为活跃(Hung et al., 2000; Shiah et al., 2000), 加之来自较深层次的上升水流中有机碳含量低,也稀释了上升流区水体里的 DOC(Hung and Lin, 1995; Hung et al., 2000), 因此上升流区水体中 DOC 含量较低。

在该研究中发现,黑潮主流径一些近岸站位在 800~1000m 水深出现高 pH、低 DIC 含量、低 DIC/Talk 和高 DOC、高 POC 含量的异常值;同时,在该水深近岸站位发现明显的 TSM 高值,其成因是由于较上层的陆坡区沉积物周期性再悬浮后离源区向深海(黑潮流经)的水平运输(Hung et al., 2000; Liu et al.,

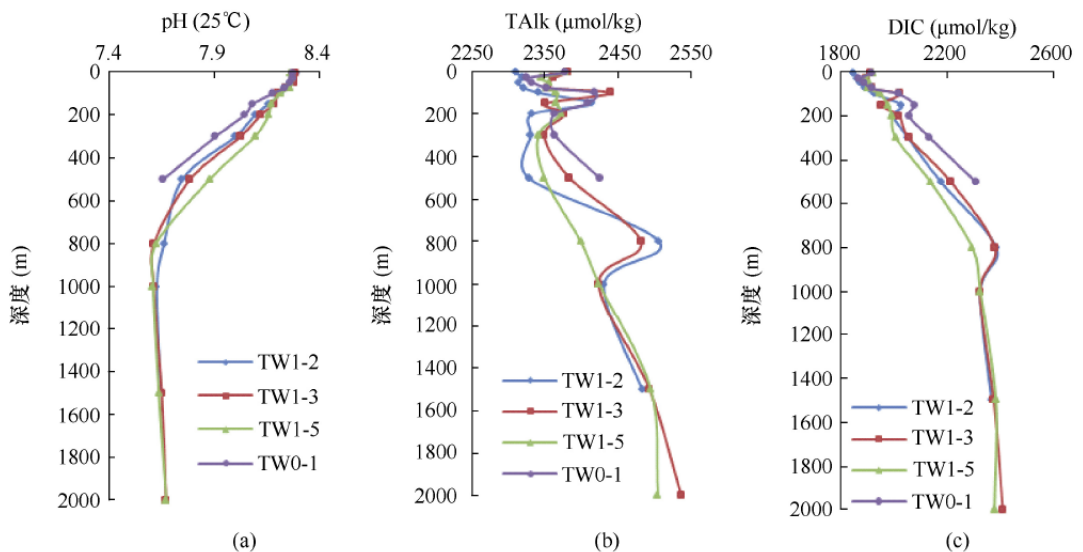
1995; Wong et al., 2000), 因此低游离 CO_2 、高有机碳含量的陆架、陆坡来源物质输入有可能是造成这些碳参数出现异常值的原因。

2.2 秋季黑潮主流径水体中碳的垂直分布与影响因素

2.2.1 无机碳

秋季各站位 pH、Talk 和 DIC 3 个无机碳参数垂直分布特征如图 10 所示。pH 范围为 7.66~8.28, 平均值为 8.10。总体而言,表层水 pH 最高, pH 大体呈随水深增加而下降的趋势,范围为 8.22~8.29, 平均值为 8.25。次表层热带水至中层水中 pH 仍随水深的增加而下降,热带水和中层水中 pH 范围分别为 8.00~8.22 和 7.56~8.08, 平均值分别为 8.14 和 7.74, pH 一般在 800m 水层达到最小值。在 1000m 以深的深层水中, pH 为相对均一的低值,并随水深增加略有回升,范围为 7.58~7.69, 平均值为 7.64。与春季相比,秋季黑潮主流径有着更高的 pH, 其总体分布趋势与春季相似。

Talk 含量范围为 2311.00~2537.28 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2384.1 $\mu\text{mol/kg}$ 。总体而言, Talk 在黑潮表层水中最低,并随水深的增加而增加,含量范围为 2311.00~2382.01 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2344.6 $\mu\text{mol/kg}$ 。黑潮热带水中 Talk 含量大



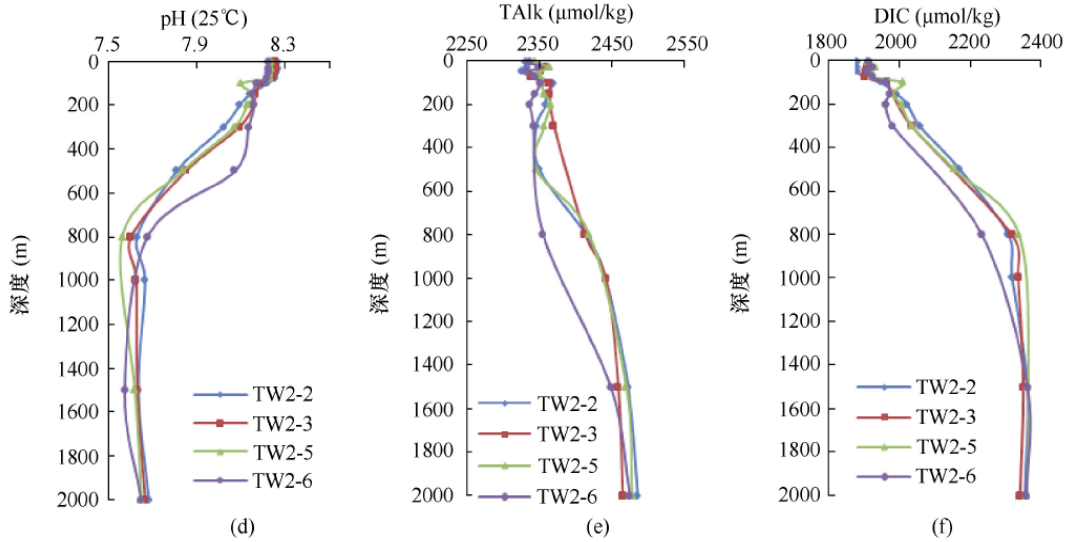


图 10 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径(含上升流中心)无机碳参数的垂直分布

Fig.10 Vertical distributions of inorganic carbon parameters in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island (including upwelling center) in the fall, 2014

体均一,并在 200~300m 水层中随水深的增加略有下降,靠近陆架边缘的站位(如 TW0-1、TW1-2 和 TW1-3)在 150~200m 水深出现 TAlk 高值(高于 $2400\mu\text{mol/kg}$),热带水中 TAlk 的含量范围为 $2331.05\sim2441.24\mu\text{mol/kg}$,平均值为 $2360.5\mu\text{mol/kg}$ 。黑潮中层水中, TAlk 含量随水深的增加而显著升高,靠近陆架边缘的 TW1-2、TW1-3 站位在 800m 水层再次出现 TAlk 高值(可高于 $2500\mu\text{mol/kg}$),中层水中 TAlk 含量范围为 $2328.45\sim2507.04\mu\text{mol/kg}$,平均值为 $2396.0\mu\text{mol/kg}$ 。TAlk 在黑潮深层水中平均含量最高(个别站位 2000m 水层 TAlk 高于 $2500\mu\text{mol/kg}$),而垂直变化梯度较小,平均值为 $2468.5\mu\text{mol/kg}$ 。秋季黑潮水体 TAlk 分布趋势与春季相似但含量总体更高。

DIC 含量范围为 $1852.91\sim2410.86\mu\text{mol/kg}$,平均值为 $2078.7\mu\text{mol/kg}$ 。黑潮表层水中 DIC 含量最低,且大体随水深的增加而增加,含量范围为 $1852.91\sim1932.69\mu\text{mol/kg}$,平均值为 $1904.7\mu\text{mol/kg}$ 。从次表层热带水至中层水中, DIC 含量总体随水深的增加而继续升高,热带水和中层水中 DIC 含量范围分别为 $1929.24\sim$

$2058.96\mu\text{mol/kg}$ 和 $2140.24\sim2386.27\mu\text{mol/kg}$,平均值分别为 $1998.4\mu\text{mol/kg}$ 和 $2260.9\mu\text{mol/kg}$ 。黑潮深层水中 DIC 含量最高且变化不大,含量范围为 $2319.87\sim2410.86\mu\text{mol/kg}$,平均值为 $2356.3\mu\text{mol/kg}$ 。与春季相比,秋季黑潮表层水体中 DIC 含量略有下降,从次表层至深层水体 DIC 含量有所升高, DIC 整体平均含量与春季差别不大。

与春季结果相似,位于上升流中心的 TW0-1 站位水体中,各无机碳参数分布趋势与 TW1 断面各站位相似,但整体数值略有不同。TW0-1 站位表层水体中各参数分布与 TW1 断面站位相似,但次表层和中层水在较深层次水体上涌的影响下,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的平均值。TW0-1 站位各层水体中 pH 整体小于 TW1 和 TW2 断面各站位相应水深,范围为 $7.66\sim8.29$,平均值为 8.10 ,其表层水、热带水和中层水 pH 平均值分别为 8.26 、 8.05 和 7.66 。TW0-1 站位水体中的 TAlk 与台湾以东黑潮主流径靠近陆架边缘站位分布相近,并略高于黑潮主流径各站位平均值,含量范围为 $2324.71\sim$

2425.27 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2374.6 $\mu\text{mol/kg}$, 其表层水、热带水和中层水中 TAik 含量平均值分别为 2347.5 $\mu\text{mol/kg}$ 、2389.0 $\mu\text{mol/kg}$ 和 2425.3 $\mu\text{mol/kg}$ 。TW0-1 站位各层水 DIC 整体大于 TW1 和 TW2 断面站位, 总体含量范围为 1873.44~2308.80 $\mu\text{mol/kg}$, 平均值为 2024.0 $\mu\text{mol/kg}$, 其表层水、热带水和中层水中 DIC 含量平均值分别为 1902.2 $\mu\text{mol/kg}$ 、2074.7 $\mu\text{mol/kg}$ 和 2308.8 $\mu\text{mol/kg}$ 。与同一站位春季调查数据相

比, 秋季 TW0-1 站位各无机碳参数中 pH 和 TAik 较高, DIC 含量表层较低、中层较高而整体平均值相近。

2.2.2 有机碳

秋季各站位 DOC 和 POC 垂直分布特征如图 11(见文后彩图)所示。与春季研究结果相似, 秋季各有机碳参数分布规律与各无机碳参数相比受所在水层影响较小。DOC 含量范围为 56.72~141.04 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 92.36 $\mu\text{mol/L}$ 。总

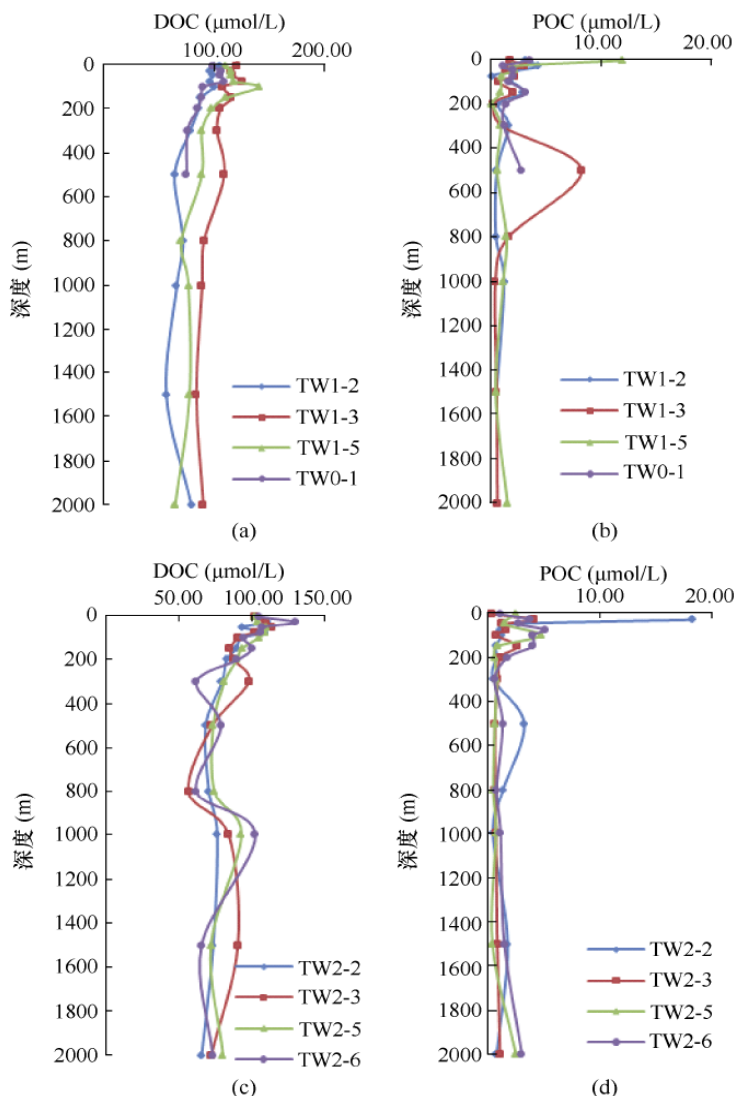


图 11 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径(含上升流中心)有机碳的垂直分布

Fig.11 Vertical distributions of organic carbon in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island (including upwelling center) in the fall, 2014

体趋势而言, DOC 含量在表层水中有高值, 范围为 93.6~130.41 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 109.25 $\mu\text{mol/L}$ 。黑潮次表层热带水至中层水中, DOC 含量在 200m 以浅较高, 随水深的增加, DOC 含量出现下降趋势, 热带水与中层水中 DOC 含量范围分别为 62.08~141.04 $\mu\text{mol/L}$ 和 56.72~109.36 $\mu\text{mol/L}$, 平均值分别为 94.70 $\mu\text{mol/L}$ 和 75.40 $\mu\text{mol/L}$ 。在 1000m 以深的黑潮深层水中, DOC 含量总体变化较小且相较中层水略有回升, 范围为 57.14~102.48 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 78.04 $\mu\text{mol/L}$ 。与春季相比, 秋季黑潮主流径各层水体中 DOC 含量略有降低。

POC 含量范围为 0.17~18.26 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 1.93 $\mu\text{mol/L}$ 。与春季 POC 含量的分布规律相似, 秋季 POC 在 200m 以浅的表层水和上层热带水中含量较高, 在 200m 以深水体中含量总体较低且相对均一。黑潮表层水中 POC 含量最高, 含量范围也最大, 为 0.17~18.26 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 3.24 $\mu\text{mol/L}$ 。热带水中 POC 含量低于表层, 在 150~200m 水层出现小回升之后, POC 含量总体随水深的增加而略有降低, 为 0.22~4.78 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 1.49 $\mu\text{mol/L}$ 。黑潮中层水和深层水中 POC 含量为相对均一的低值, 并在底层略有增高, 一些站位在 500m 左右水层中出现 POC 含量高值, 中层水和深层水中 POC 含量范围分别为 0.52~8.24 $\mu\text{mol/L}$ 和 0.45~3.09 $\mu\text{mol/L}$, 平均值分别为 1.61 $\mu\text{mol/L}$ 与 1.11 $\mu\text{mol/L}$ 。秋季黑潮主流径表层水和热带水中 POC 含量与春季相比差别较小, 中层水和深层水中 POC 含量高于春季。

秋季, TW0-1 站位各有机碳参数分布规律与附近的 TW1 断面站位相似, DOC 含量整体略低, POC 含量在表层略高于 TW1 断面站位。与春季相比, 秋季 TW0-1 站位与黑潮主流径其他站位水体中 DOC 和 POC 含量差异更小。TW0-1 站位 DOC 含量范围为 75.73~109.20 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 93.07 $\mu\text{mol/L}$, 其表层水、热带水和中层水中 DOC 含量平均值分别为 105.11 $\mu\text{mol/L}$ 、

85.37 $\mu\text{mol/L}$ 和 75.73 $\mu\text{mol/L}$ 。秋季 TW0-1 站位 POC 含量范围为 1.15~3.54 $\mu\text{mol/L}$, 平均值为 2.14 $\mu\text{mol/L}$, 其表层水、热带水和中层水中 POC 含量平均值分别为 2.22 $\mu\text{mol/L}$ 、1.90 $\mu\text{mol/L}$ 和 2.82 $\mu\text{mol/L}$ 。与春季相比, 秋季 TW0-1 站位水体中 DOC 含量明显较高, 表层水和次表层热带水中 POC 含量略低于春季, 而中层水(处于该站位近底层)POC 含量明显高于春季。

2.2.3 影响秋季黑潮水体碳分布的因素

秋季黑潮主流径各层水体中 CO_2 水平依然可由 DIC/Talk 高低来指示, 即 DIC/Talk 越高则表明水体中游离 CO_2 含量越高。黑潮主流径各站位水体中 DIC/Talk 垂直分布如图 12 (见文后彩图)所示。总体而言, DIC/Talk 在表层最低, 随着水深的增加, 其由表层水至中层水逐渐升高, 并在 800~1000m 左右水深处达到最高值, 在 1000m 以深的黑潮深层水中, DIC/Talk 较为恒定并略有回落。这一分布趋势与春季相似, DIC/Talk 与春季相比整体偏小, 但差距不大。

同春季相似, 秋季黑潮表层水中 Talk、DIC 含量和 DIC/Talk 较低, 而 pH、DOC 和 POC 含量较高; 表层水中 DIC、Talk 含量和 DIC/Talk 随水深的增加而上升, 而 pH、DOC 和 POC 含量则随水深的增加而下降。由此可知, 秋季黑潮表层水中各碳参数分布依然受生物活动、光合作用产物的原位循环, 以及海-气交换等多种过程的综合影响。黑潮主流径表层水各无机碳、有机碳参数与 chl *a* 含量相关性不显著(图 13, 图 14)。各无机碳参数中 pH、DIC 含量和 DIC/Talk 同 chl *a* 含量的相关性在秋季略大于春季, 说明秋季黑潮表层水无机碳体系中游离 CO_2 含量受浮游生物活动的影响更为明显。各有机碳参数中 DOC 含量与 chl *a* 含量相关性略强于春季, 而 POC 含量与 chl *a* 含量相关性弱于春季。黑潮表层水中各无机碳参数与海水盐度相关性较弱(图 15),

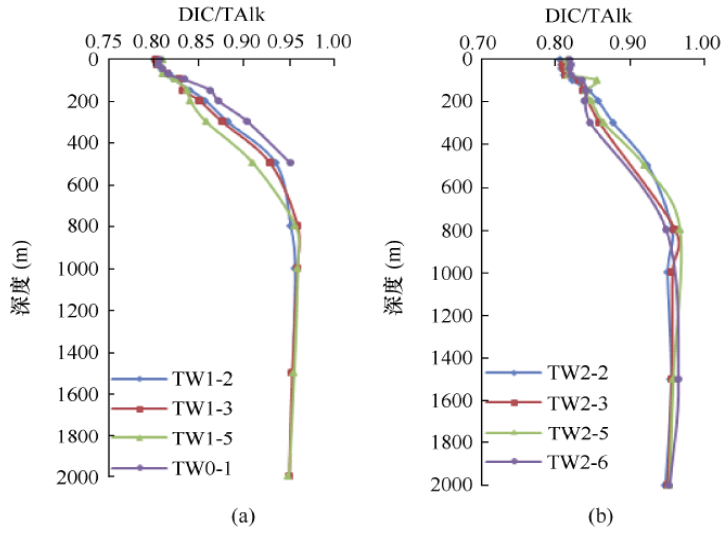


图 12 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径各站 DIC/TALK 比值的垂直分布

Fig.12 Vertical distributions of DIC/TALK in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the fall, 2014

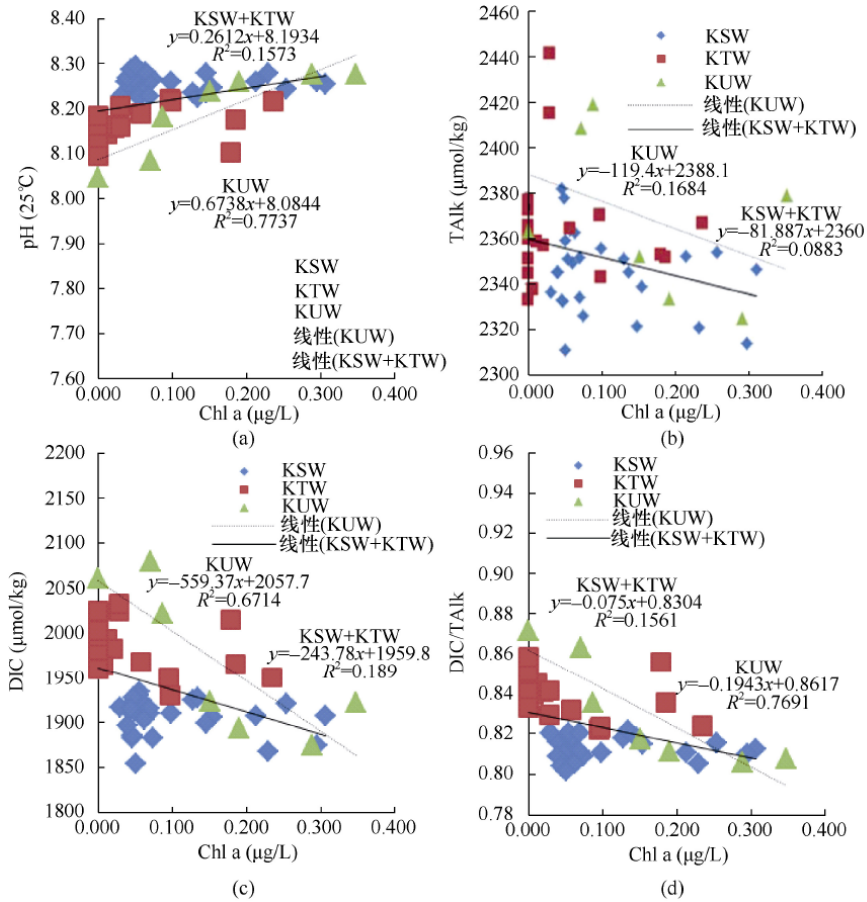


图 13 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径无机碳参数与 chl a 的关系

Fig.13 Relationships between inorganic carbon parameters and chl a in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the fall, 2014

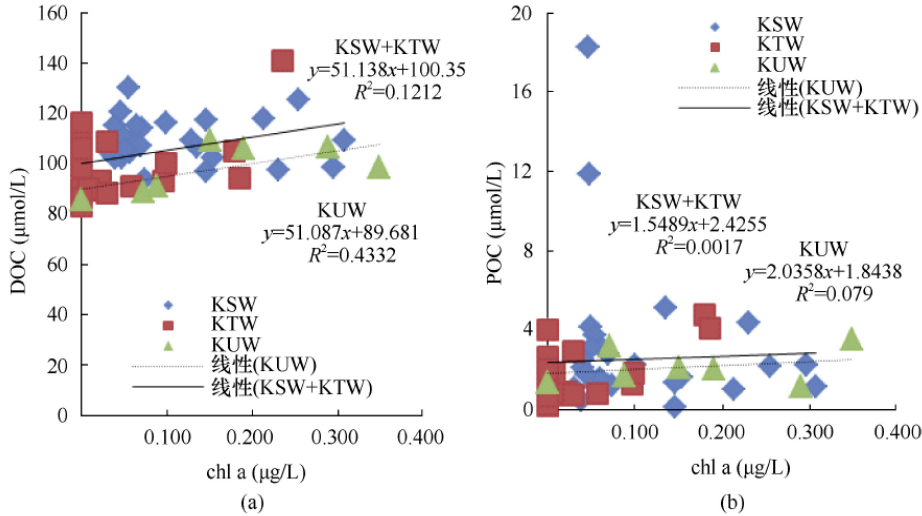

 图 14 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径有机碳与 chl *a* 关系

 Fig.14 Relationships between organic carbon and chl *a* in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the fall, 2014

而与温度相关性较强(图 16), 这可能是因为较高海水温度促进了生物生长和海-气界面交换对 CO_2 的移除。表层水中 DOC 和 POC 含量与海水温度、盐度相关性均较弱(图 17), 也说明了原位再循环、光化学分解等非初级生产过程对表层水中有机碳的影响。与春季相比, 秋季黑潮表层水中 POC 含量与盐度无明显负相关, 可能是因为秋季东海陆架水输出对黑潮表层水 POC 含量影响较小的缘故。

秋季黑潮次表层热带水中, DIC 含量和 DIC/Talk 随水深的增加而有所升高, Talk 含量随水深的增加略有下降且变化较小, pH、DOC 和 POC 含量则随水深的增加而降低, 各碳参数分布趋势与春季相似。在这一水层中, 随着水深的增加, 温度降低而盐度升高, 有机物开始分解并释放游离 CO_2 , 因此 pH 与各有机碳参数(尤其 DOC)均呈下降趋势, 而 DIC 含量和 DIC/Talk 逐渐升高, 且上述碳参数分布与 chl *a* 含量相关性较弱, 与水体温度、盐度则有较显著的相关性(图 15~图 17)。根据化学平衡公式, 有机物降解过程中 $\Delta\text{Talk} : \Delta\text{DIC} \approx -17 : 106$, 由此可以解释热带水中 DIC 与 Talk 相反的变化趋势。

秋季黑潮中层水中, pH 仍随水深的增加而显著降低, DOC 和 POC 含量略有下降, Talk、DIC 含量和 DIC/Talk 则显著升高。与春季相同, 中层水中 CaCO_3 溶解过程的开始是 Talk 升高的主要原因, 而中层水中有机物降解过程的持续是 DIC 含量和 DIC/Talk 升高, 以及 pH 和有机碳含量降低的主要原因。秋季, DOC/POC 自热带水至中层水有所降低, 即在秋季黑潮水 200~800m 水层中, DOC 可能比 POC 降解更迅速。黑潮中层水中盐度变化范围较小, 因此中层水中各碳参数与盐度的相关性较弱(图 15, 图 17), 但随着水深的增加, 中层水温度继续下降, 因此各无机参数和 DOC 含量与水体温度均有较显著的相关性(图 16, 图 17), POC 含量因变化幅度较小, 因而与温度的相关性并不明显。

与春季相似, 秋季黑潮深层水中有着各水层中最高的 Talk、DIC 含量和 DIC/Talk, 以及最低的 pH, 有机碳含量也为低值。随着水深的增加, 深层水中 pH、Talk 和 DIC 含量略有升高, DIC/Talk 有所回落, DOC 和 POC 含量变化较小, 在一些站位底层略有回升。黑潮深层水中温度变化较小而盐度略有回升。各碳

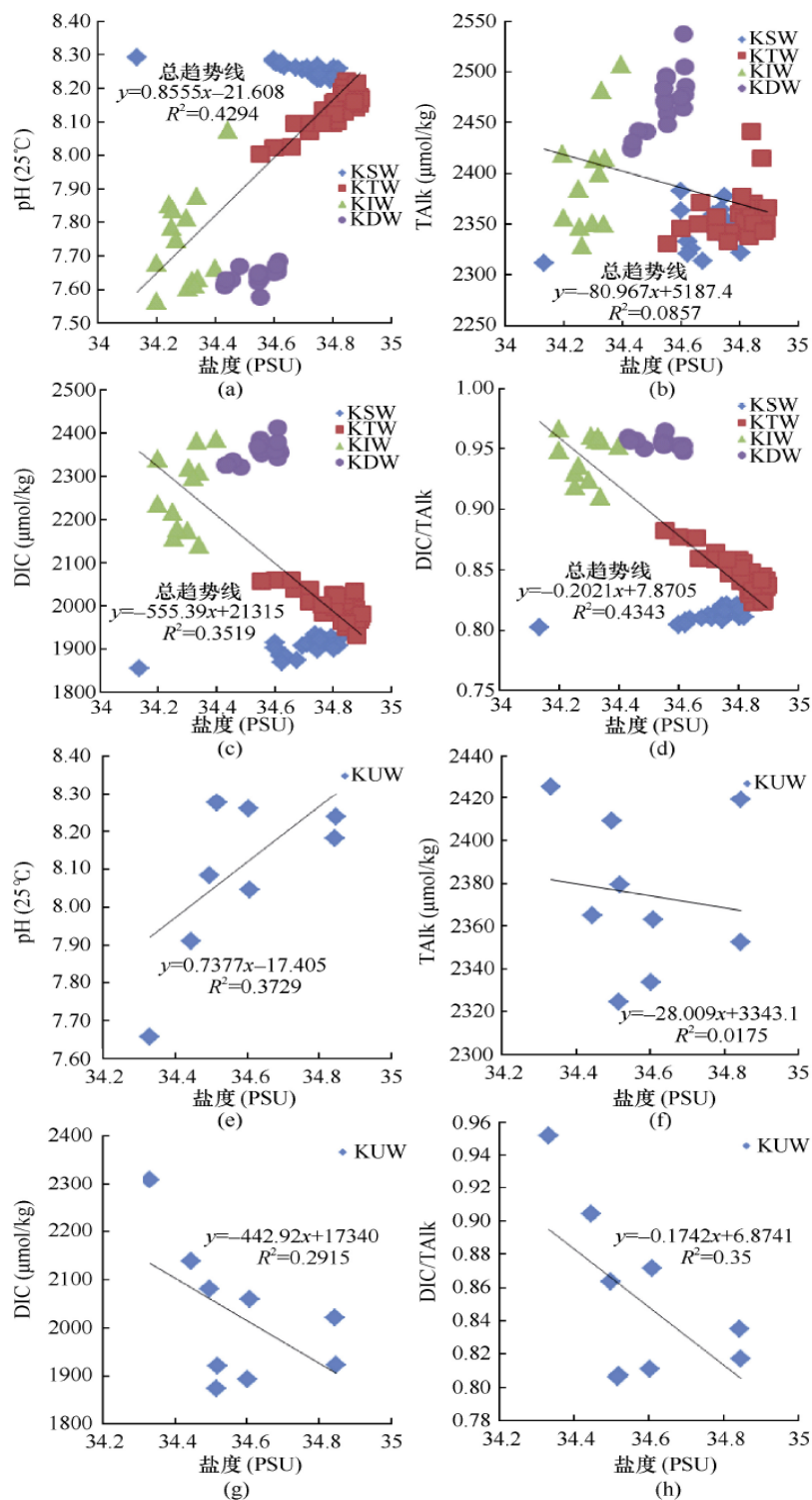
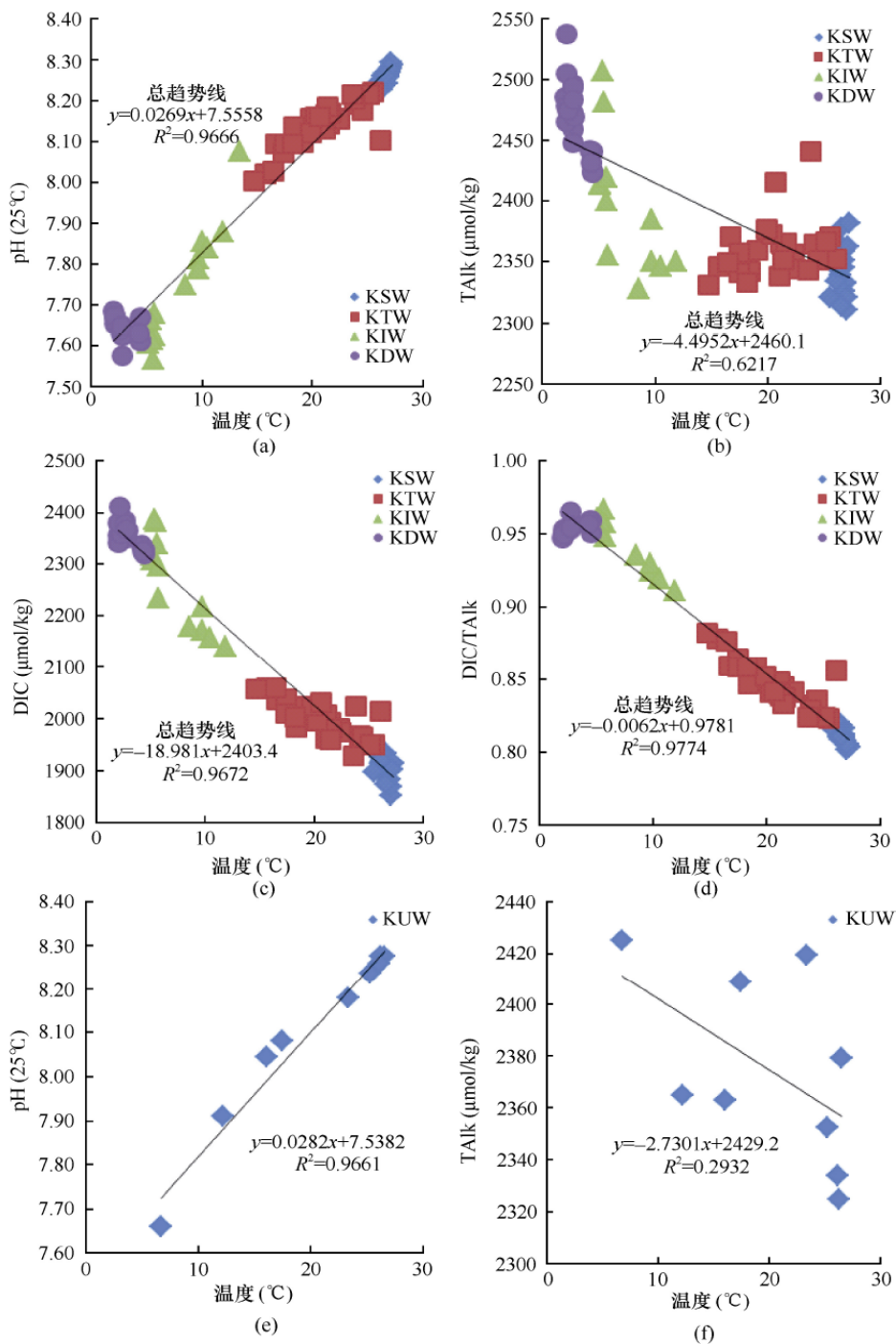


图 15 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径无机碳参数与盐度的关系

Fig.15 Relationships between inorganic carbon parameters and salinity in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the fall, 2014

参数中, TAlk 和 DIC 含量与盐度有一定正相关性, 而与温度有一定负相关性; 其余各碳参数与温度、盐度相关性均不显著。由此可知, 在黑潮深层水中, 有机物降解基本结束,

CaCO_3 的溶解是影响各无机碳参数分布的主要因素, 而水平输运和水-沉积物界面交换可能是影响有机碳参数在底层分布的主要因素。



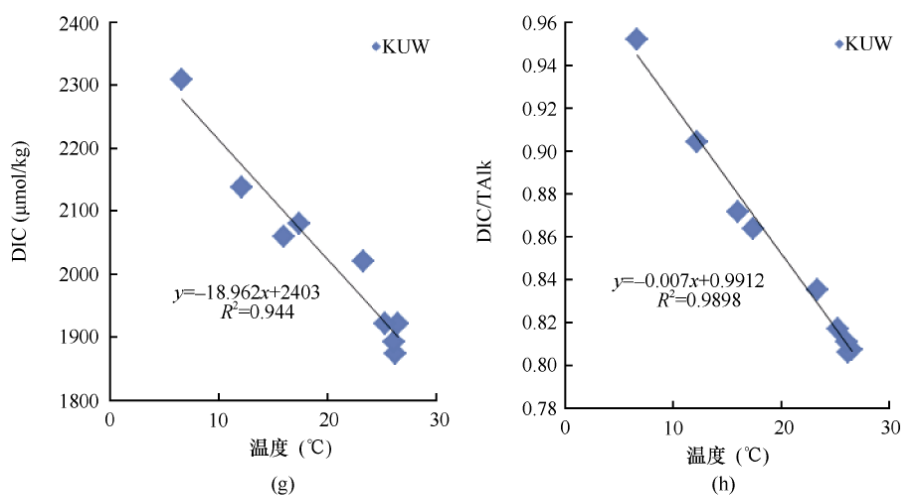
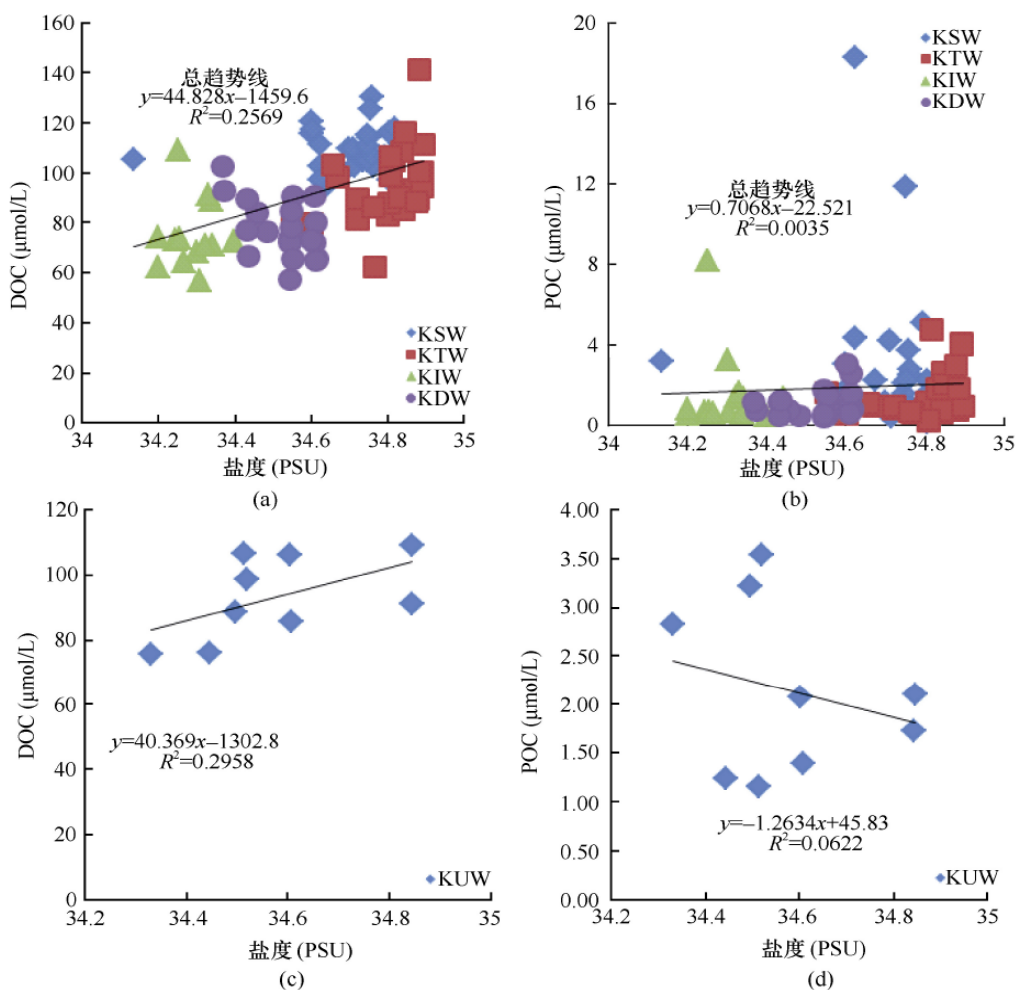


图 16 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径无机碳参数与温度的关系

Fig.16 Relationships between inorganic carbon parameters and temperature in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the fall, 2014



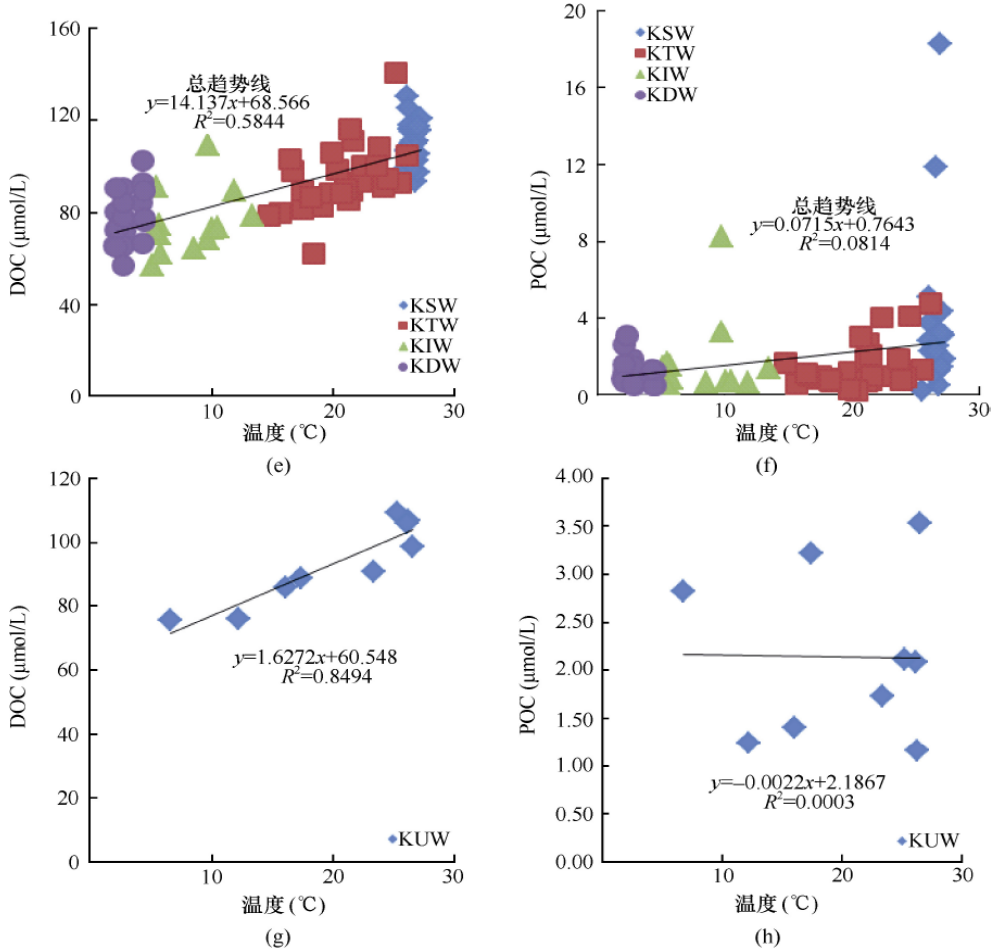


图 17 2014 年秋季台湾岛东部黑潮主流径有机碳与盐度、温度的关系

Fig.17 Relationships between organic carbon and S and T in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in the fall, 2014

与春季相比, 秋季位于上升流区的 TW0-1 站位, 各无机碳、有机碳参数虽同样受较深层水体上涌的影响, 但与 TW1 和 TW2 断面各站位 DOC 含量差距较小。考虑到秋季黑潮主流径及 TW0-1 站位浮游植物活动弱于春季(chl *a* 含量明显低于春季), 因此 TW0-1 站位 200m 以浅水体中出现高于春季的 DOC 含量可能是由于秋季较低的细菌生物量、细菌生产力 (Shiah et al., 2000)。TW0-1 站位 200m 以浅各碳参数分布与 chl *a* 含量相关性高于 TW1 和 TW2 断面站位, 说明上升流中心的 TW0-1 站位表层和次表层水体碳分布受浮游植物生产的影响高于黑潮主流径其余站位。

秋季, 黑潮主流径一些站位在 600~800m 水深出现高 TAlk、高 DIC 含量和高有机碳含量的异常值, 其原因可能同春季相似, 出于陆坡区沉积物水平运输的影响, 这些站位的相应水深中往往伴有 TSM 高值。此外, TW2 断面外侧站位在 1500m 水深也出现 TSM 高值, 同样可能是受到水平输送的影响。秋季黑潮流域各站位碳参数分布与春季略有不同, 其可能的原因有较低的浮游植物生产、利用, 以及较低的微生物分解量。秋季黑潮水体中 DIC 含量和 DIC/TAlk 与春季差异较小, 但 pH 和 TAlk 高于春季, 考虑到海水碳酸盐体系次级解离过程中 $\text{pH} = \text{pK}_2 + \lg([\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-])$ 和 $\text{TAlk} =$

$2 \times [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] + c_{\text{其余}}$, 式中, K_2 为二级电离常数; $2 \times [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$ 为碳酸碱度; $[\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$ 为水碱度; $[\text{B}(\text{OH})_4^-]$ 为硼酸碱度; $c_{\text{其余}}$ 为其他弱酸碱度, 可以推测秋季黑潮水体中有着较高的 $[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$ 。

3 结语

2014 年春季, 黑潮主流径水体垂直方向上可由 30~50m、300~400m 和 800~1000m 3 个界面划分为黑潮表层水、热带水、中层水与深层水。春季黑潮水体中 DIC 平均含量为 2078.1 $\mu\text{mol/kg}$, DOC 和 POC 平均含量分别为 98.59 $\mu\text{mol/L}$ 和 1.62 $\mu\text{mol/L}$ 。黑潮表层水中有着较高的 pH, 较低的 TAlk、DIC 含量和 DIC/TAlk, DOC 和 POC 含量也有高值, 体现了浮游植物生产和海-气界面交换等过程的影响, 陆源颗粒物输出对黑潮表层水 POC 分布也有一定影响。黑潮次表层热带水中, pH 随水深的增加而下降, DIC 含量和 DIC/TAlk 升高, TAlk 含量则相对均一, DOC 和 POC 在 200m 以浅含量较高, 在 200m 以深降为低值, 其原因在于热带水中浮游植物生产逐渐减弱至 200m 左右水层消失, 大部分海洋自生有机碳在 200m 以浅被分解再循环, 剩余有机物则随水深的增加而开始不断分解。黑潮中层水中 pH 随水深的增加而明显下降, TAlk、DIC 含量和 DIC/TAlk 随水深的增加明显升高, 同时 DOC 和 POC 含量有所下降; 这一水层中 CaCO_3 开始溶解, 其与有机物的降解共同影响了水体中碳参数的分布。黑潮深层水有着 4 个水层中最高的 TAlk、DIC 含量和 DIC/TAlk, 及最低的 pH, DOC 和 POC 含量也为低值; 这一水层中有机物分解基本结束, 因此 CaCO_3 的溶解是影响各无机碳参数分布的主要因素, 而底层沉积物释放与水平输运则可能是各有机碳参数在底层有所回升的原因。位于上升流中心的 TW0-1 站位各参数均受到较深层次水体挟游离 CO_2 与营养盐上涌的影响, 与黑潮主流径其他站位略有不同。

2014 年秋季, 黑潮主流径水体垂向上依

然能够划分为表层水、热带水、中层水和深层水 4 层; 水层间的界面分别为 75~100m、300~500m 和 800~1000m。总体而言, 秋季黑潮水体中 DIC 平均含量为 2078.7 $\mu\text{mol/kg}$, DOC 和 POC 平均含量分别为 92.36 $\mu\text{mol/L}$ 和 1.93 $\mu\text{mol/L}$ 。黑潮主流径各层水体中各水文、碳参数分布规律与春季相似, 影响因素也类似。秋季黑潮流域各站位碳参数量值与春季略有不同, 其可能的原因有较低的浮游植物生产、利用及较低的微生物分解量。秋季黑潮水体中 DIC 含量和 DIC/TAlk 与春季差异较小, 但 pH 和 TAlk 高于春季, 由此可以推测秋季黑潮水体中有着较高的 $[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$ 。

参考文献

- 陈鑫, 宋金明, 袁华茂, 等. 2014. 东海 2012 年夏季海气界面碳交换及其区域碳汇强度变化趋势初探. 海洋学报, 36(12): 18-31
- 刘诚刚, 宁修仁, 郝镭, 等. 2010. 海洋浮游植物溶解有机碳释放研究进展. 地球科学进展, 25(2): 123-132
- 卢汐, 宋金明, 袁华茂, 等. 2015. 黑潮与毗邻陆架海域的碳交换. 地球科学进展, 30(2): 214-225
- 卢汐, 宋金明, 袁华茂, 等. 2016. 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. 海洋与湖沼, 47(1): 16-28
- 宋金明. 2011. 中国近海生态系统碳循环与生物固碳. 中国水产科学, 18(3): 703-711
- 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
- 宋金明, 徐永福, 胡维平, 等. 2008. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学. 北京: 科学出版社
- Cauwet G, Mackenzie F T. 1993. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yang Tze and Yellow rivers (China). Marine Chemistry, 43(1-4): 235-246
- 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, Wang S L, Chou W C, et al. 2006. Carbonate chemistry and projected future changes in pH and CaCO_3 saturation state of the South China Sea. Marine Chemistry, 101(3-4): 277-305
- 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
- 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): C07026
- 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
- Gao X L, Song J M. 2006. Main geochemical characteristics and key biogeochemical carbon processes in the East China Sea. *Journal of Coastal Research*, 22(6): 1330-1339
- 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
- Hung J J, Lin P L. 1995. Distribution of dissolved organic carbon in the continental Margin off Northern Taiwan. *TAO*, 6: 13-26
- Lewis E, Wallace D W R. 1998. Program developed for CO₂ system calculations//ORNL/CDIAC-105. Oak Ridge, Tennessee: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy
- Liu K K, Lai Z L, Gong G C, et al. 1995. Distribution of particulate organic matter in the Southern East China Sea: implications in production and transport. *TAO*, 6: 27-45
- Liu K K, Peng T H, Shaw P T, et al. 2003. Circulation and biogeochemical processes in the East China Sea and the vicinity of Taiwan: an overview and a brief synthesis. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(6-7): 1055-1064
- 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, Lee W Y, Wang C H, et al. 1996. Depth distribution of $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved ΣCO_2 in seawater off eastern Taiwan: effects of the Kuroshio current and its associated upwelling phenomenon. *Continental Shelf Research*, 16(12): 1609-1619
- Shiah F K, Liu K K, Kao S J, et al. 2000. The coupling of bacterial production and hydrography in the southern East China Sea: spatial patterns in spring and fall. *Continental Shelf Research*, 20(4-5): 459-477
- Song J M. 2010. *Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas*. Berlin Heidelberg & Hangzhou: Springer-Verlag & Zhejiang University Press
- 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

Vertical Distributions and Controlling Factors of Carbon in the Main Kuroshio Region Near the Eastern Taiwan Island

SONG Jin-Ming^{1,2*}, DUAN Li-Qin^{1,2}, LU Xi¹

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

*Corresponding author, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

Abstract Vertical distributions of inorganic carbon parameters (pH, TA, DIC and DIC/TALK ratio) and organic carbon parameters (DOC and POC) in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island were investigated during spring and fall, 2014. The major results were as follows:

In spring 2014, waters in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island could be divided into four types, *i.e.*, the Kuroshio Surface Water (KSW), the Kuroshio Tropical Water (KTW), the Kuroshio Intermediate Water (KIW) and the Kuroshio Deep Water (KDW), and the boundaries separating each two adjacent water types were located at 30~50m, 300~400m and 800~1000m, respectively. The average DIC, DOC and POC concentrations of Kuroshio waters in spring were 2078.1 $\mu\text{mol/kg}$, 98.59 $\mu\text{mol/L}$ and 1.62 $\mu\text{mol/L}$, respectively. Generally, TALK, DIC and DIC/TALK ratio increased and pH decreased with the increasing water depth in Kuroshio main stream; DOC and POC had high values above 200m water depth, then dropped back to relatively low and stable values below 200m. Carbon distribution in KSW was affected by multiple processes, such as primary production, bacterial decomposition, air-sea exchanges and terrestrial inputs. In waters between KTW and KIW, the impact of phytoplankton production decreased, and the degradation of organic matters had important influence on the carbon system in this layer. In waters between KIW and KDW, degradation of organic matters almost finished, thus, the carbon distribution was controlled by dissolution of CaCO_3 and lateral transportation of shelf slope sediments. All parameters in Kuroshio Upwelling Water (KUW) were affected by upwelling deeper water, which maintained high CO_2 and nutrients levels. In fall 2014, waters in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island still were divided into KSW, KTW, KIW and KDW, and the boundaries between each two adjacent water types were located at 75~100m, 300~500m and 800~1000m, respectively. The average DIC, DOC and POC concentrations of Kuroshio waters in fall were 2078.7 $\mu\text{mol/kg}$, 92.36 $\mu\text{mol/L}$ and 1.93 $\mu\text{mol/L}$, respectively. Generally, the distributions of all hydrographic and carbon parameters followed the same trends as those in spring, and they were also influenced by similar processes as in spring. The values of carbon parameters in fall were slightly different from spring. The potential reasons of these differences could be the lower phytoplankton production and lower bacterial production in fall. The DIC and DIC/TALK levels in fall were similar to that in spring, but the pH and TALK in fall were higher, indicating a higher ratio of $[\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-]$ in the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island in fall.

Key words carbon; seawater; vertical distribution; controlling factors; the main Kuroshio region near the eastern Taiwan Island