

# 夏季台湾暖流的水文化学特性及其对东海赤潮高发区影响的初步探讨\*

石晓勇<sup>1,2</sup> 李鸿妹<sup>1</sup> 王 颢<sup>3</sup> 王丽莎<sup>1</sup> 张传松<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学化学化工学院 青岛 266100; 2. 国家海洋局减灾中心 北京 100194;  
3. 福建省海洋环境与渔业资源监测中心 福州 350003)

**提要** 依据 2006 年夏季对东海区水文化学数据的现场调查,对台湾暖流的水文化学特性进行了初步分析,并对台湾暖流自身的水文化学特性对东海赤潮高发区的影响进行了初步探讨。结果表明,夏季,台湾暖流水具有台湾海峡水和黑潮次表层涌升水两个来源,分别构成台湾暖流的表层水和深层水。通过亚硝酸盐含量的多少能够对表层水和深层水进行明显的区分。此外,通过对台湾暖流水文特征的分析,发现夏季台湾暖流在浙江沿海出现的上升流给赤潮生物提供了适宜的温度。并通过对台湾暖流的营养盐含量进行分析,发现相对于硝酸盐含量,台湾暖流含有较高的磷酸盐浓度,能够缓解海区“过剩氮”导致的磷限制。

**关键词** 台湾暖流;水文;营养盐;赤潮;夏季

**中图分类号** O661.1

我国是世界上赤潮发生比较频繁的国家之一,长江口及邻近东海海域则是我国赤潮灾害最为严重的区域(申力等, 2010),其赤潮发生频率和发生面积居于我国四大海域之首。根据 2002—2008 年的中国海洋环境质量公报公布的有关数据(国家海洋局, 2002—2008),东海赤潮发生的次数及累积面积一直居高不下,有害赤潮(HAB)成为严重影响我国东海海洋环境和水产事业的灾害之一(刘录三等, 2011)。对东海赤潮高发区长时间的调查已使人们对生源要素在该海域的分布状况及长江冲淡水对该海区的营养盐补给作用有了较为深入的了解。研究表明,有害赤潮的发生受物理(如海流等)、化学(如营养物质)、生物(如物种)和气候(如风速风向)等多方面因素综合的影响(唐永奎, 1992; 暨卫东等, 1996; Bricelj *et al.*, 1997)。其中,长江冲淡水为长江口及其邻近海域提供了丰富的营养盐(王保栋, 1998),但对于来自外海的台湾暖流对该海域生源要素所存在的影响仍不清楚。为此本研究通过于 2006 年夏季对东海区水文化学数

据的调查,对台湾暖流的水文化学特性进行了分析,并对台湾暖流自身的水文化学特性对东海赤潮高发区的影响进行了初步探讨。这些研究可为了解台湾暖流的特性和行为,并对东海赤潮高发区生源要素在赤潮中的作用的进一步研究提供一定的参考依据。

## 1 调查与方法

### 1.1 研究区域

2006 年 6—7 月对东中国海海域进行了现场调查,调查区域主要集中在东中国海陆架区,共有大面站 56 个, 25 小时连续站 5 个, 12 小时连续站 1 个。根据需要,本研究的分析区域主要集中在长江口以南海域,包括 S05、S07、S08、S09、S10 断面。此外,为考察台湾暖流穿越长江口后的情形,在分析时附加 S04 断面的情形。站位图如图 1 所示。

### 1.2 样品采集与测定

现场调查使用直读式温盐深仪(Seabird 911-plusCTD)对温度、盐度进行测定。使用 CTD 附带的

\* 国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2010CB428701 号; 国家重点基础研究发展计划(973)项目——中国东部陆架边缘海洋物理环境演变及其环境效应, 2005CB422305 号。石晓勇, 教授, E-mail: shixy@ouc.edu.cn

收稿日期: 2012-06-23, 收修改稿日期: 2012-09-28

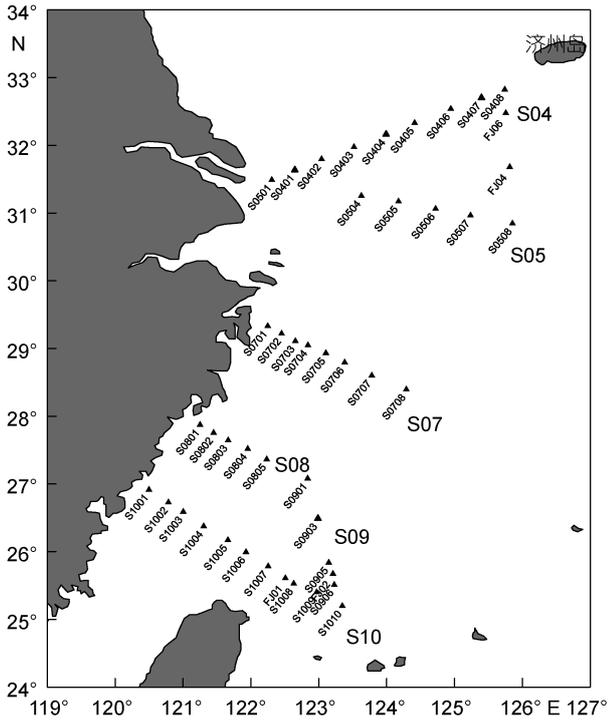


图 1 调查站位  
Fig.1 Sampling stations

12 联装 12dm<sup>3</sup> 电控 Niskin 采水系统按照《海洋调查规范》(GB 12763.4-91)中规定的标准层次进行采水。营养盐在现场水样过滤后使用 Bran+Luebbe 公司生

产的 QuAatro 连续流动注射自动分析仪进行测定, 其中磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法, 标准偏差为 0.012 $\mu\text{mol/L}$ , 检测限 0.024 $\mu\text{mol/L}$ ; 亚硝酸盐/硝酸盐采用重氮-偶氮分光光度法, 其标准偏差为 0.03 $\mu\text{mol/L}$ , 检测限 0.03 $\mu\text{mol/L}$ 。

## 2 调查海域典型断面的水文分布特征

### 2.1 典型断面的温度分布

由于本次调查的断面较多, 在对每个断面的水文及营养盐分布特征进行分析后, 本研究仅列出了较为典型断面的分布示意图。调查海域 S10、S09、S08、S04 断面的温度分布如图 2 所示。从中可以看出: S10 断面, 在陆架区夏季表层海水温度较高, 普遍在 25 $^{\circ}\text{C}$  以上, 陆架靠外一侧可达 28 $^{\circ}\text{C}$  以上。近岸海区中底层由于受北向流动的海峡水的影响, 该断面在近表层出现一个温跃层, 跃层强度为 0.71 $^{\circ}\text{C/m}$ 。在黑潮区夏季黑潮表层水的温度在 26 $^{\circ}\text{C}$  以上, 至 100m 黑潮次表层水处温度下降至 20 $^{\circ}\text{C}$ , 垂向梯度为 0.08 $^{\circ}\text{C/m}$ ; S09 断面, 在陆架区夏季表层至 25m 水深的水温在 26 $^{\circ}\text{C}$  以上, 等值线为笔直的水平分布, 表明太阳辐射是影响温度的主要因素。在其下方, 20.5—25 $^{\circ}\text{C}$  等温线则有向陆坡区倾斜的趋势, 如 25 $^{\circ}\text{C}$  等温线在陆架边缘深度为 30m, 而深入陆架后降至 50m,

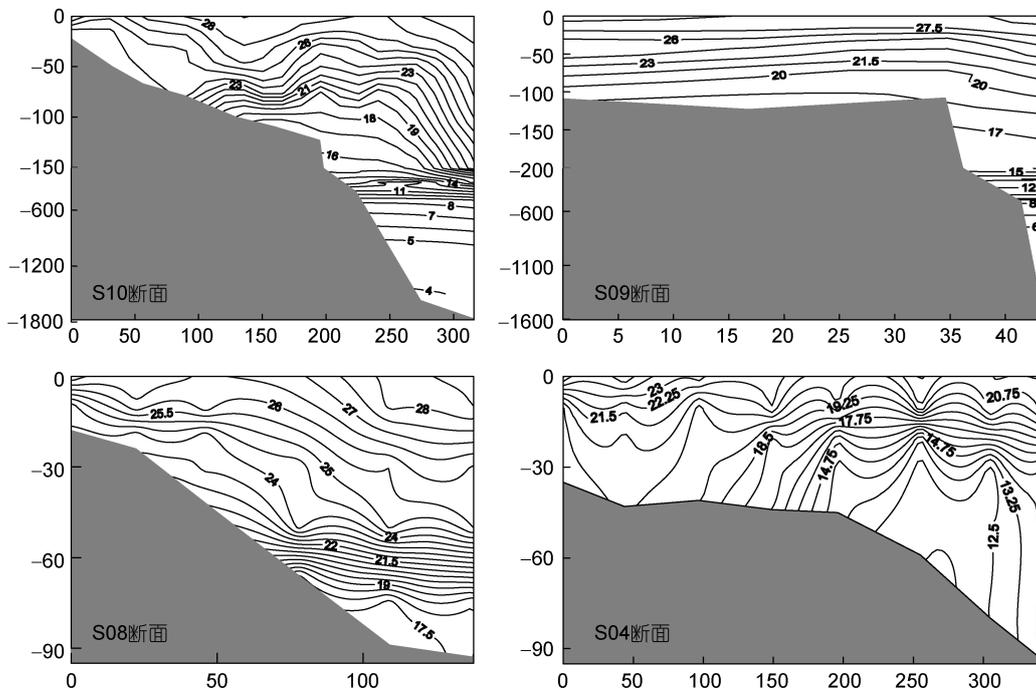


图 2 2006 年夏季东海 S10、S09、S08、S04 断面的温度分布

Fig.2 Vertical distributions of temperature of S10, S09, S08, S04 sections in the East China Sea in summer, 2006

系黑潮次表层水涌升的表现。在黑潮区则与 S10 断面类似, 该断面 50m 以内水温均在 25℃ 以上, 在冲绳海槽区, 黑潮表层与次表层间的过渡区较厚, 垂向水温梯度较小, 为 0.04℃/m(40m 层); S08 断面, 陆架区表层温度普遍在 26℃ 以上, 其中外陆架区高一些, 为 28℃ 以上, 内陆架稍低, 在 26.5℃ 左右。该断面台湾暖流的双层结构已经形成, 除去混合层, 则表层水在 15—50m 深, 温度为 23—24.5℃, 这与 S07 断面陆架波折区存在的上升流导致的冷水抬升现象明显不同; S04 断面, 该断面温度较低, 表层温度仅在长江冲淡水区可达 23℃ 以上, 其余海区都在 22℃ 以下。在 122.5°E—123°E 的海区 20℃ 的低温区仍然存在, 表明台湾暖流水能够穿越长江口。

2.2 典型断面的盐度分布

调查海域 S10、S09、S07、S04 断面的盐度分布如图 3 所示。从中可以看出: S10 断面, 在内陆架区该断面表层盐度在 32—33 之间。受沿岸水的影响, 近岸海区表层盐度在 32 附近, 陆架外侧稍高, 为 33.2 左右。在下层, 台湾海峡北向流具有较高的盐度, 在 34 以上, 最高可达 34.2。在黑潮区该断面表层的盐度相对较低, 在 34.3—34.5 之间。在向次表层水过渡的区域盐度增加, 垂向梯度为 0.012/m; S09 断面, 在陆架区该断面表层盐度较低, 在 34 以下。黑潮在该断面涌升较为强烈, S10 断面内仅出现在冲绳海槽内的 34.6 等盐线可出现在陆架区的 30m 层附近。在黑潮

区该断面表层水盐度在 34—34.4 之间, 由于黑潮次表层水的涌升, 表层水在靠近陆坡时被压缩得很薄, 而据文献报道夏季黑潮表层水难以进入陆架区(苏纪兰等, 1990); S07 断面, 该断面表层盐度普遍较低。在近岸海区沿岸水的势力增强, 122.5°E 以西海域的表层盐度在 30 以下, 向外扩展可达 123.2°E。陆架外侧受大气输入影响, 表层盐度也在 33.2 以下。台湾暖流在该层发生明显的抬升, 抬升主要集中在陆架的坡折区, 高度可达水深 20m 以浅。涌升区盐度普遍在 34.3 以上, 内部有高于 34.4 的水块出现, 表明主要为台湾暖流深层水; S04 断面, 该断面长江冲淡水扩展范围接近 125°E, 厚度不超过 10m。在其下方, 仍然能够发现盐度超过 33 的高盐水抬升区。这表明台湾暖流能够穿越长江口到达苏南海域, 这与以往研究相一致(唐晓晖等, 2004)。

2.3 典型断面的现场密度超量  $\gamma_{(s,t,p)}$  分布

由于现场密度  $\gamma_{(s,t,p)}$  对于研究水团的运动具有重要的指示作用, 同时密度差异是引发海水运动的重要因素之一。为初步了解台湾暖流的行为及其结构变化过程, 有必要对台湾暖流的现场密度进行分析。由于海水密度的前两位(即千位和百位)数字通常相同, 均为  $10 \times \times . \times \times$ , 故通常使用“密度超量( $\gamma$ )”表示海水密度。密度超量  $\gamma = \rho_{(s,t,p)} - 1000$ , 其单位与密度单位一致, 均为  $\text{kg/m}^3$ , 根据 CTD 测得的温盐数据, 采用 1980 年国际海水状态方程(EOS80)对密度超量进

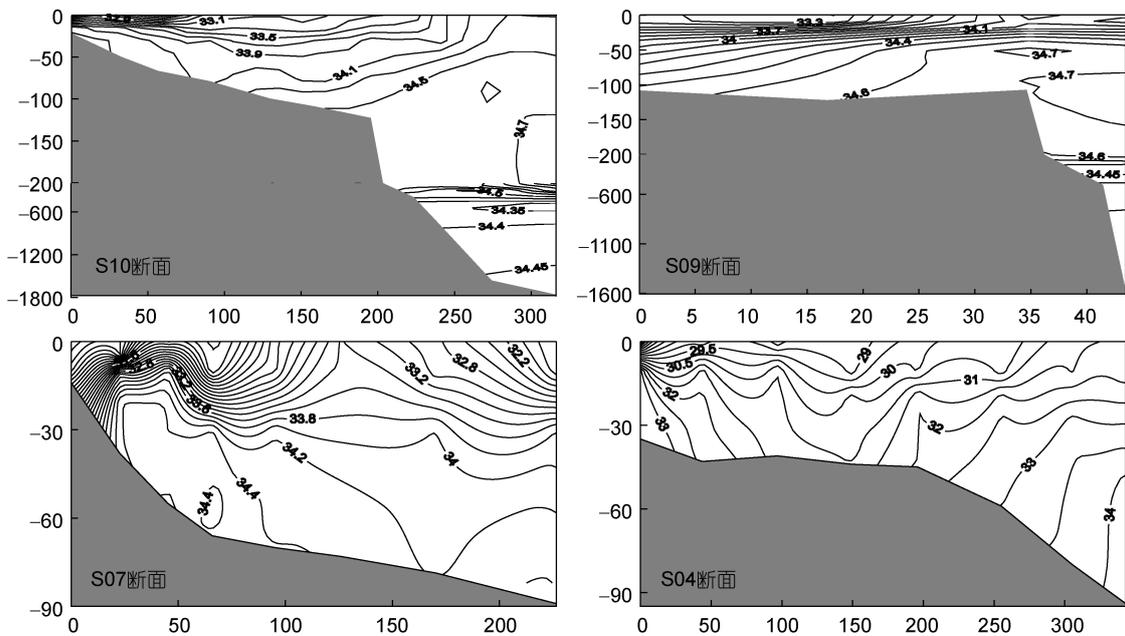


图 3 2006 年夏季东海 S10、S09、S07、S04 断面的盐度分布

Fig.3 Vertical distributions of salinity of S10, S09, S07, S04 sections in the East China Sea in summer, 2006

行了计算。进行计算的国际海水状态方程如下:

$$\rho_{(S,t,p)} = \rho_W + AS + BS^{3/2} + CS^2$$

适用范围为: 温度 $-2\sim 40^\circ\text{C}$ , 实用盐度 $0\sim 42$ 。

此外, 深海区需要进行压力校正, 需要用到高压国际海水状态方程, 高压下海水密度 $\rho_{(S,t,p)}$ 与实用盐度 $S$ 、温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 和海压 $p(\text{Pa})$ 的关系式为:

$$\rho_{(S,t,p)} = \frac{\rho_{(S,t,0)}}{1 - \frac{(np)}{K_{(S,t,p)}}}$$

式中,  $\rho_{(S,t,0)}$ 由一个大气压国际海水状态方程求得;  $K_{(S,t,p)}$ 为割线体积模量, 由下式给出:

$$K_{(S,t,p)} = K_{(S,t,0)} + A_{(np)} + B_{(np)}^2$$

该方程的适应范围是: 温度 $-2\sim 40^\circ\text{C}$ , 实用盐度 $0\sim 42$ , 海压 $0\sim 10^8 \text{ Pa}$ , 压力匹配因数 $n=10^{-5}$ 。计算出的 $\gamma_{(S,t,p)}$ 与旧密度单位中的 $\sigma_{(S,t,p)}$ 具有相同的数值。

通过计算, 调查海域 S10、S07、S05、S04 断面的密度超量分布如图 4 所示。从中可以看出: S10 断面, 夏季表层海水的密度超量较小, 通常在  $21\text{kg/m}^3$  以下。在 80m 等深线内侧的海区由于存在沿岸水和强盛台湾海峡水的垂向对峙, 在近表层( $<5\text{m}$ )形成了较强的密跃层, 跃层强度可达  $0.519\text{kg/m}^4$ 。在黑潮区, 该断面密度超量的分布呈现出较为均匀的层状分布并随深度平稳增加。表层密度超量在  $22\text{kg/m}^3$  以下, 但随深度增加较快。注意到黑潮水的等密线存在向陆架一侧倾斜的趋势, 它反映了黑潮的斜压性质, S09

断面在 500m 及其以深的密度结构与 S10 断面相同; S07 断面, 该断面表层盐度普遍较低。在近岸海区沿岸水的势力增强,  $122.5^\circ\text{E}$  以西海域的表层盐度在 30 以下, 向外扩展可达  $123.2^\circ\text{E}$ 。陆架外侧受大气输入影响, 表层盐度也在 33.2 以下。台湾暖流在该层发生明显的抬升, 抬升主要集中在陆架的坡折区, 高度可达水深 20m 以浅。涌升区盐度普遍在 34.3 以上, 内部有高于 34.4 的水块出现, 表明主要为台湾暖流深层水; S05 断面, 该断面最显著的特征是长江冲淡水所形成的强密度锋, 在 5m 层的跃层强度达  $0.668\text{kg/m}^4$ , 仅次于上升流密度锋。在该断面, 盐度是控制密度的主要因素; S04 断面, 长江冲淡水所形成的强密度锋同样是该断面最显著的特征, 由于夏季长江冲淡水主要向东北方向扩展, 故密度锋在该断面达到了最盛, 其中水深 5m 跃层强度高达  $0.804\text{kg/m}^4$ , 为本次调查的最大值。

通过对调查海域典型断面的水文分布特征进行分析, 作者发现, 夏季的台湾暖流水具有台湾海峡水和黑潮次表层涌升水两个来源, 分别构成台湾暖流的表层水和深层水。对于台湾暖流的来源问题以及台湾海域附近的主要海流, 近年来的研究也取得很大进展。最早由日本学者(松宫义晴等, 1977)提出台湾暖流是缘自黑潮的一个分支; 而管秉贤(1978)则认为台湾暖流至少在上层来自台湾海峡水。后续的一些研究表明台湾暖流水的组成不是单一的。其表层水在冬

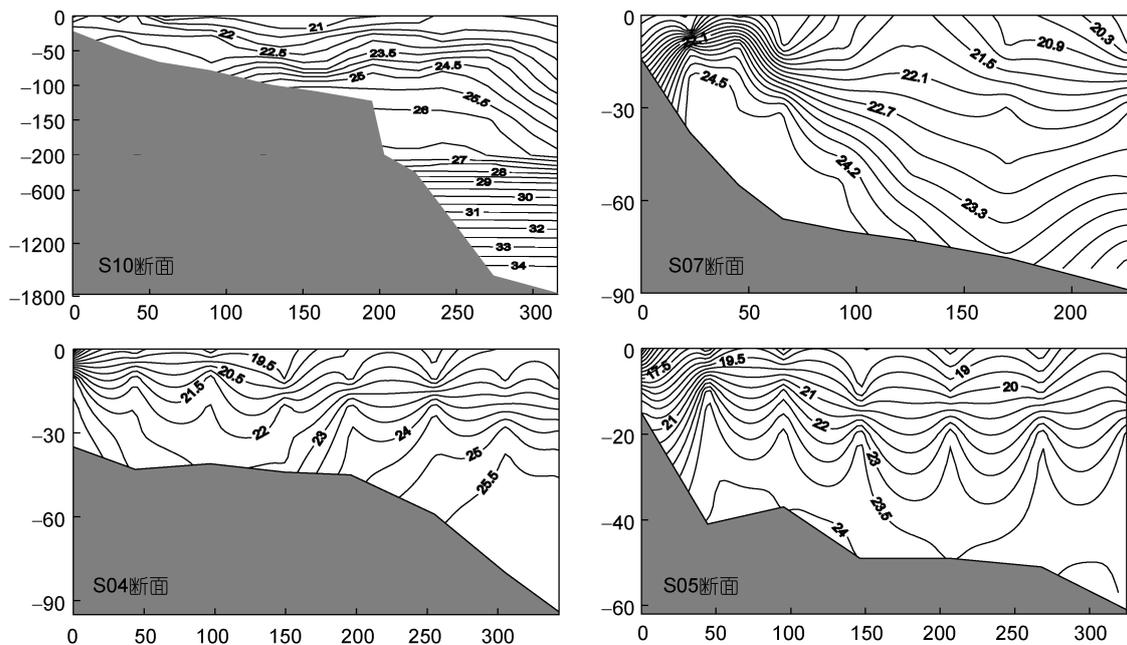


图 4 2006 年夏季东海 S10、S07、S05、S04 断面的密度超量分布

Fig.4 Vertical distributions of excess quantity of density of S10, S07, S05, S04 sections in the East China Sea in summer, 2006

半年来自于黑潮表层水, 夏半年则来自于流经台湾海峡北上的南海表层水。台湾暖流的深层水则终年来自于黑潮次表层水在东海陆坡区的涌升(翁学传等, 1985, 1988)。在夏季, 台湾海峡水由南海水和部分黑潮水混合而成, 在台湾海峡内流速较快。在海峡北部, 势力较强的海峡水甚至有进入黑潮区的迹象。

### 3 调查海域典型断面的营养盐分布特征

#### 3.1 典型断面磷酸盐的分布特征

图 5 为调查海域 S10、S08、S07、S04 断面磷酸盐( $PO_4\text{-P}$ )的分布示意。从中可以看出: S10 断面, 在陆架区夏季表层  $PO_4\text{-P}$  浓度极低, 除近岸受沿岸水影响  $PO_4\text{-P}$  可达  $0.3\mu\text{mol/L}$  外, 大部分海区的  $PO_4\text{-P}$  浓度在  $0.1\mu\text{mol/L}$  以下。而在台湾海峡水所盘踞的区域,  $PO_4\text{-P}$  浓度可达  $0.4\mu\text{mol/L}$ 。121.2°E 以东的“澎—花—棉冷水区”, 由于黑潮次表层水的涌升, 使得  $PO_4\text{-P}$  在底层急剧升高至  $0.9\mu\text{mol/L}$ 。在黑潮区, 黑潮表层

水的  $PO_4\text{-P}$  含量极低, 在  $0.1\mu\text{mol/L}$  以下, 但受次表层水涌升的影响,  $PO_4\text{-P}$  在 50m 深度就可达到  $0.4\mu\text{mol/L}$ ; S08 断面, 该断面台湾暖流已经形成, 其垂向双层结构使得  $PO_4\text{-P}$  的分布比 S09 和 S10 断面陆架区都要复杂些。台湾暖流深层水的  $PO_4\text{-P}$  含量很高, 在  $0.7\mu\text{mol/L}$  以上, 内部  $PO_4\text{-P}$  的分布较为均匀, 垂直梯度只有  $0.099\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{hm})$ , 水平梯度更是只有  $0.003\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{km})$ 。由此可以看出, 同样隶属台湾暖流的表层和深层水在  $PO_4\text{-P}$  含量上存在明显差别; S07 断面, 该断面出现的上升流使得含有高浓度  $PO_4\text{-P}$  的台湾暖流深层水急剧抬升, 其顶端可达 12m。与上升流锋对应的是磷酸盐锋, 垂向梯度高达  $9.910\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{hm})$ 。此时涌升水中心底层 35m 处的  $PO_4\text{-P}$  浓度可高达  $1.1\mu\text{mol/L}$ 。这对东海近海区的  $PO_4\text{-P}$  限制存在潜在的缓解作用; S04 断面, 与 S05 断面类似, 长江冲淡水在该断面所占据的表层  $PO_4\text{-P}$  浓度仍然较低, 这与河口区  $PO_4\text{-P}$  的沉降有关。

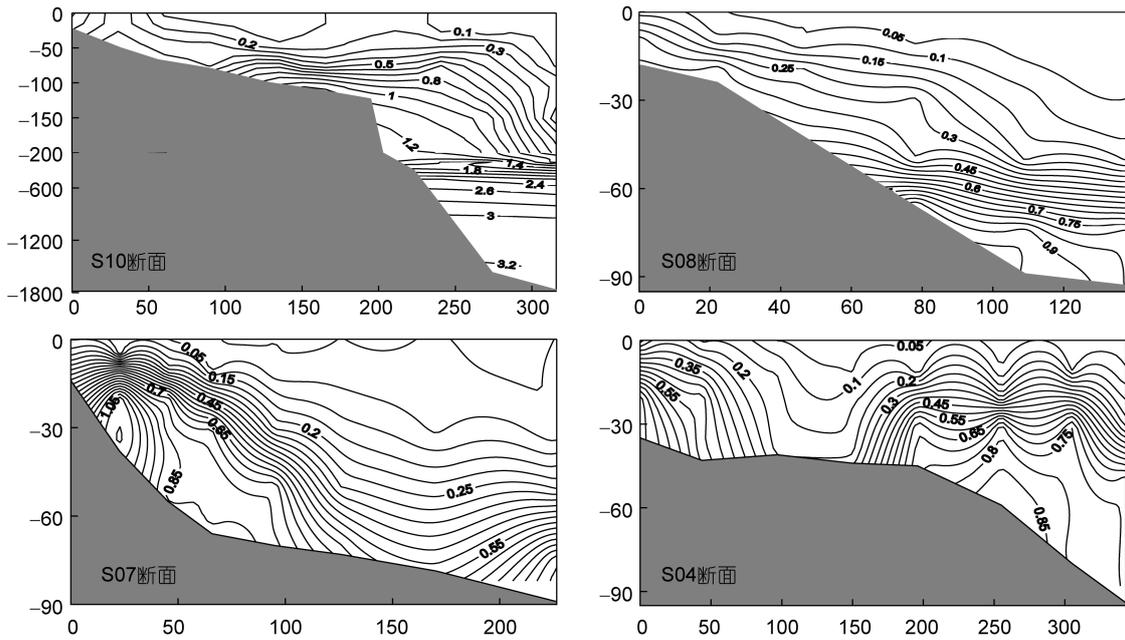


图 5 2006 年夏季东海 S10、S08、S07、S04 断面的磷酸盐分布

Fig.5 Vertical distributions of  $PO_4\text{-P}$  of S10, S08, S07, S04 sections in the East China Sea in summer, 2006

#### 3.2 典型断面硝酸盐的分布特征

图 6 为调查海域 S10 及 S05 断面硝酸盐( $NO_3\text{-N}$ )的分布示意。从中可以看出: S10 断面, 在陆架区夏季受浮游植物吸收的影响, 陆架区表层的  $NO_3\text{-N}$  浓度极低, 在  $1\mu\text{mol/L}$  以下。台湾海峡水的  $NO_3\text{-N}$  含量更低一些, 在  $3\mu\text{mol/L}$  左右。这就造成了福建沿海常常产生的“氮限制”。在黑潮区, 该断面次表层水区

$NO_3\text{-N}$  含量为  $10\text{—}25\mu\text{mol/L}$  之间, 并随水深的增加而平稳增长, 增幅为  $7\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{hm})$  左右; S05 断面, 该断面  $NO_3\text{-N}$  分布较为复杂。近岸海区长江冲淡水对  $NO_3\text{-N}$  含量影响非常强烈,  $NO_3\text{-N}$  仍呈现出垂直分布的趋势, 长江口区的  $NO_3\text{-N}$  含量可达  $26.849\mu\text{mol/L}$ , 几乎是台湾暖流水的 3 倍。值得注意的是,  $NO_3\text{-N}$  在长江冲淡水中的分布并未像盐度和密度那样呈层状

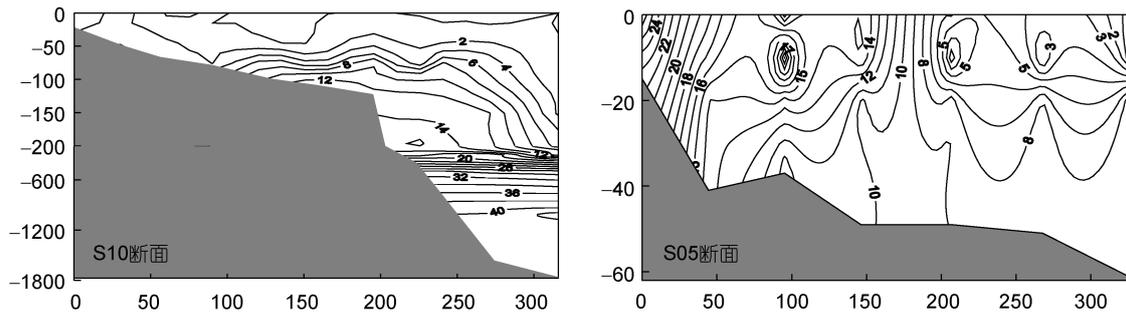


图 6 2006 年夏季东海 S10 及 S05 断面的硝酸盐分布

Fig.6 Vertical distributions of  $\text{NO}_3\text{-N}$  of S10 and S05 sections in the East China Sea in summer, 2006

向外扩展, 而是出现了不连续的高值区域。究其原因, 与当时在该海域发生的赤潮不无联系。

### 3.3 典型断面亚硝酸盐的分布特征

图 7 为调查海域 S10、S08、S07、S04 断面亚硝酸盐( $\text{NO}_2\text{-N}$ )的分布示意。从中可以看出: S10 断面, 在陆架区, 由于  $\text{NO}_2\text{-N}$  来源于生物的反硝化作用, 而反硝化过程在真光层是受到限制的, 故表层的  $\text{NO}_2\text{-N}$  含量在  $0.1\mu\text{mol/L}$  以下。由于沿岸水在该断面的势力很小, 故看不出其对  $\text{NO}_2\text{-N}$  的贡献。在台湾海峡水区  $\text{NO}_2\text{-N}$  具有很高的浓度, 尤其是 60m 的底层区域,  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度高达  $1.00\mu\text{mol/L}$ 。这种现象与文献报道的“闽中渔场亚硝酸盐层化现象”(蔡清海, 1991)是一致的。在黑潮区, 该断面除黑潮次表层水在陆架的涌升区外, 黑潮各层水体的  $\text{NO}_2\text{-N}$  含量都处于极

低的水平, 这与 S09 断面在黑潮区的分布特征相似; S08 断面, 该断面表层的营养盐含量极低, 在  $0.05\mu\text{mol/L}$  以下。近岸由于受沿岸水的影响,  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度较高, 可超过  $1\mu\text{mol/L}$ 。在台湾暖流区, 由于台湾暖流的表底层水的来源迥异, 而  $\text{NO}_2\text{-N}$  在其来源水中的浓度差别甚大, 因此  $\text{NO}_2\text{-N}$  的断面分布能够较为清楚的揭示台湾暖流表层水和深层水在台湾暖流中的配置情况; S07 断面, 该断面陆架区外侧表层的  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度仍然很低( $<0.05\mu\text{mol/L}$ ), 反映出生物活动比较微弱。在近岸, 随着沿岸水势力的加强, 近海海区  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度普遍在  $0.5\mu\text{mol/L}$  以上。垂直方向分布均匀, 未出现较大的梯度。在沿岸水以下, 台湾暖流深层水出现明显的抬升, 低亚硝酸盐的区域可达 20m 以浅。与此同时, 高亚硝酸盐的台湾暖流表层

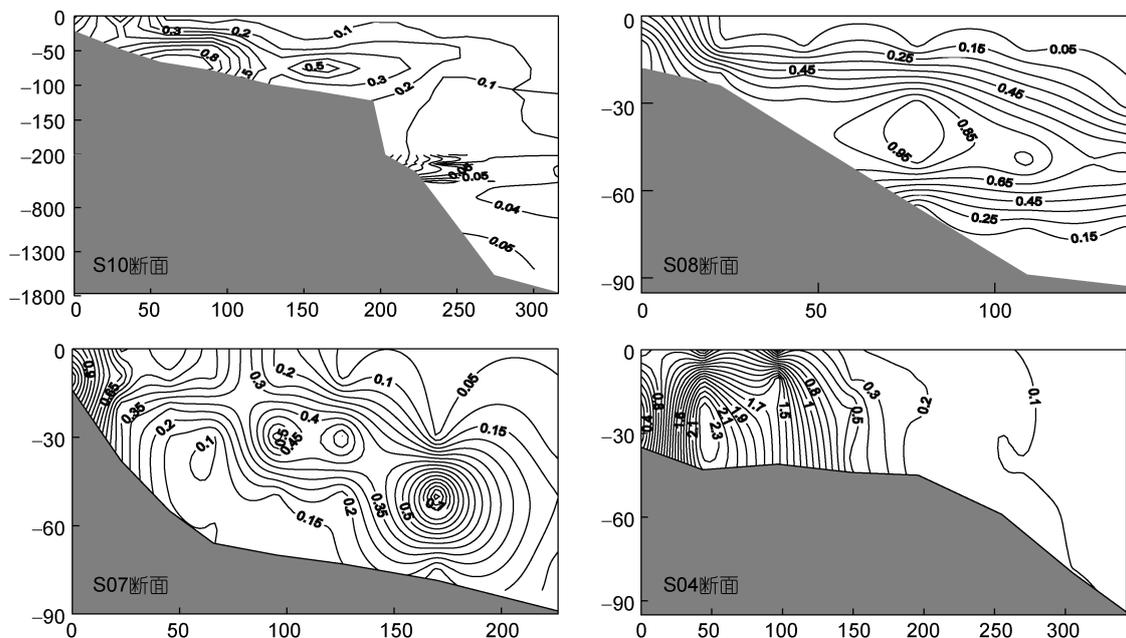


图 7 2006 年夏季东海 S10、S08、S07、S04 断面的亚硝酸盐分布

Fig.7 Vertical distributions of  $\text{NO}_2\text{-N}$  of S10, S08, S07, S04 sections in the East China Sea in summer, 2006

水向外运动并出现下沉的现象。同时台湾暖流深层水外侧存在  $\text{NO}_2\text{-N}$  高值区增大并相互分隔的趋势, 这表明台湾暖流表层水有向东海外陆架区分散和扩散的迹象。借助于  $\text{NO}_2\text{-N}$  的分布, 可清楚的对台湾暖流水的配置情况进行分析, 从而有助于进一步了解台湾暖流在东海赤潮高发区的行为; S04 断面, 该断面  $\text{NO}_2\text{-N}$  的分布极为奇特, 长江冲淡水使得近岸  $\text{NO}_2\text{-N}$  浓度较高, 仍呈垂直分布, 与其外侧低  $\text{NO}_2\text{-N}$  的台湾暖流水形成鲜明的对比。台湾暖流的  $\text{NO}_2\text{-N}$  含量在该断面保持恒定, 仍为  $0.3\text{—}0.4\mu\text{mol/L}$ 。而在其东侧, 存在一个高  $\text{NO}_2\text{-N}$  的区域, 中心浓度可超过  $2.3\mu\text{mol/L}$ 。这个现象是首次发现(经过验证, 排除了仪器操作或人员的失误), 目前尚未有文献对此进行报道。本研究给出可能的解释如下: 根据盐度和密度的分布, 可判断出该断面仍然有下降流的存在。混浊的长江冲淡水在向底层输送的过程中容易发生反硝化作用, 即由硝酸态氮转化亚硝态氮, 并进一步转化为氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )和氮气, 从而在海气交换中充当氮源。目前对此方面的报道已为数不少(张桂玲, 2004)<sup>1)</sup>, 但其过程仍有待研究, 因为本次调查结果显示, 该区部分存在于长江口外的低氧区内, 而反硝化过程对低氧区的厌氧环境是有依赖性的。

#### 4 台湾暖流对赤潮高发区影响的初步探讨

结合上述台湾暖流的水文化学特征, 对赤潮发生区相关参数的影响做如下分析。根据海洋学中辐射吸收的基本原理, 夏季陆地升温快, 在大陆的影响下近岸海区的温度应较远海高。但在夏季调查时作者发现东海靠外的陆架区表层至 50m 处的温度非常高, 而近岸海区的表层温度则普遍较低, 在  $24^\circ\text{C}$  以下, 趋势正好相反。之所以出现这个现象, 是台湾暖流深层冷水爬升造成的。由于台湾暖流深层水的温度在  $18\text{—}20^\circ\text{C}$ , 恰恰是某些赤潮生物的最佳生长温度。因此冷水的爬升为赤潮暴发创造了有利的温度条件。反观外陆架区,  $26\text{—}30^\circ\text{C}$  的高温区对赤潮生物的生长是明显不利的, 因此夏季陆架外海一侧暴发赤潮的几率是很小的。

此外, 台湾暖流水与沿岸水或长江冲淡水交界处形成的密跃层可能会为赤潮的暴发提供了良好的

水动力学环境。由于跃层下方海水密度较大, 浮力也较大, 浮游植物能够较快的向上移动。而当其到达密跃层上方时, 密度的减小可能会使得浮游植物移动减缓, 加之密跃层经常与营养盐的跃层发生重叠, 很容易发生浮游植物在密跃层附近堆积的现象。这与赤潮发生之前经常能在  $10\text{—}15\text{m}$  层发现叶绿素 *a* 的最大值现象相符合。一旦存在外力的搅动(如风、大型船舶螺旋桨的搅动)或其它因素导致的跃层升降或消失, 则很容易将已经发生聚集的赤潮生物带至表层, 从而引发赤潮。

赤潮暴发时营养盐被大量消耗, 很容易造成表层的营养盐限制, 从而对后续赤潮的暴发产生抑制作用, 但自 2005 年以来的调查结果却发现赤潮在发生藻种更替的情况下能够长时间的暴发。本研究认为, 除去上升流补给的因素, 密跃层内的营养盐内循环作用也可能成为维持赤潮暴发的因素之一。随着赤潮进入后期, 伴随浮游植物大规模的死亡, 其残骸将向海底沉积, 但密跃层的存在使得残骸在达到密跃层时被跃层截留而无法下沉。在夏季, 高温和光照会促使残骸较快的分解, 从而在密跃层附近释放出溶解态的营养盐(有机和无机态), 进一步被后续的赤潮生物直接利用, 维持了赤潮的长时间暴发。当然, 密跃层的存在对赤潮的形成同样具有负面作用, 由于长江冲淡水和沿岸水携带的大量泥沙在温跃层处不能完全沉积, 较轻的粉沙会悬浮在跃层以上。真光层的厚度因此降低, 影响了浮游植物的光合作用, 很有可能成为限制浮游植物生长的因素。目前关于该海区光照对浮游植物的影响已有研究(孙霞, 2005)<sup>2)</sup>, 但仍需要加强。

长期的研究结果表明, 东海海区为磷限制海区(屠建波等, 2004), 这与长江冲淡水具有较高的氮磷比有关。而通过调查海区营养盐的分布特征可以看出, 相对于硝酸盐含量, 台湾暖流整体具有较高含量的磷酸盐, 其营养盐的运输与冲淡水相比具有互补作用。“长江主要向东海提供氮, 而台湾暖流主要提供磷”的观点是有道理的。由于台湾暖流也存在月际变化和年际变化, 其强弱可影响到东海尤其是赤潮高发区的营养盐结构, 进一步对赤潮暴发的规模, 甚至种群结构都能构成影响。

1) 张桂玲, 2004. 中国近海部分海域溶解甲烷和氧化亚氮的生物地球化学研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 67—78

2) 孙霞, 2005. 光照对东海赤潮高发区赤潮藻类生长的影响. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 38—56

## 5 结论

(1) 夏季的台湾暖流水具有台湾海峡水和黑潮次表层涌升水两个来源, 分别构成台湾暖流的表层水和深层水。台湾暖流表层水具有较低的磷酸盐、硝酸盐, 而其亚硝酸盐含量极高, 台湾暖流深层水则完全相反。亚硝酸盐能够对表层水和深层水进行很好的区分。

(2) 夏季台湾暖流在浙江沿海出现的上升流给赤潮生物提供了适宜的温度, 密跃层的出现一方面可促使赤潮生物的聚集而引发赤潮, 而另一方面其可使陆地径流输入的颗粒物难于下沉, 降低真光层的厚度, 限制赤潮生物的生长, 因此具有两面性。

(3) 通过对台湾暖流的营养盐含量进行分析, 发现相对于硝酸盐含量, 台湾暖流含有较高的磷酸盐, 可能对东海赤潮高发区的营养盐结构进行调整, 能够缓解海区“过剩氮”导致的磷限制。

### 参 考 文 献

- 王保栋, 1998. 长江冲淡水扩展及其营养盐的运输. 黄渤海海洋, 16(2): 41—47
- 申 力, 许惠平, 2010. 长江口及东海赤潮海洋环境特征综合探讨. 海洋环境科学, 29(5): 631—635
- 刘录三, 李子成, 2011. 长江口及其邻近海域赤潮时空分布研究. 环境科学, 32(9): 2497—2504

- 苏纪兰, 潘玉球, 1990. 台湾以北黑潮入侵陆架途径的探讨. 黑潮调查研究论文选(二). 北京: 海洋出版社, 187—197
- 国家海洋局, 2002—2008. 2002—2008 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 翁学传, 王从敏, 1985. 台湾暖流的研究. 海洋科学, 9(1): 7—10
- 翁学传, 张以愚, 王从敏等, 1988. 黄海冷水团的变化特征. 海洋与湖沼, 19(4): 368—379
- 唐永奎, 1992. 中国沿岸和近海海水水质状况的分析. 海洋环境科学, 11(3): 9—11
- 唐晓晖, 王 凡, 2004. 长江口邻近海域夏、冬季水文特征分析. 海洋科学集刊, 北京: 科学出版社, 46: 42—66
- 屠建波, 王保栋, 2004. 长江口营养元素生物地球化学研究. 海洋环境科学, 23(4): 10—13
- 蔡清海, 1991. 闽中渔场的温盐跃层分布与亚硝酸盐的层化现象. 热带海洋, 10(2): 33—40
- 管秉贤, 1978. 我国台湾及其附近海底地形对黑潮途径的影响. 海洋科学集刊, 北京: 科学出版社, 14: 1—21
- 暨卫东, 黄自强, 黄尚高, 1996. 厦门西海域富水体营养化与赤潮关系的研究. 海洋学报, 18(1): 51—60
- 松宫义晴, 和田时夫, 1977. 水型から見た东シナ海黄海の水塊解析と底魚漁場にノリテ. 长崎大学水产学部研究报告, 43: 1—21
- Bricelj V M, Lonsdale D J, 1997. *Aureococcus anophagefferens*: causes and ecological consequences of brown tides in U.S. mid Atlantic coastal waters. *Limnology and Oceanography*, 42(5): 1023—1038

## TAIWAN WARM CURRENT AND ITS IMPACT ON THE AREAS OF FREQUENT HARMFUL ALGA BLOOM IN THE EAST CHINA SEA IN SUMMER

SHI Xiao-Yong<sup>1,2</sup>, LI Hong-Mei<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>3</sup>, WANG Li-Sha<sup>1</sup>, ZHANG Chuan-Song<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100; 2. National Marine Hazard Mitigation Service, Beijing, 100194; 3. Fujian Marine Environment and Fishery Resource Monitoring Center, Fuzhou, 350003)

**Abstract** With field data of the continental shelf of the East China Sea in summer 2006, characteristics of hydrology and chemistry of the Taiwan Warm Current (TWC) were analyzed, and its influence on the area of high-frequency harmful alga blooms (HABs) in the East China Sea was discussed. The results show that, the TWC in summer had two origins: Taiwan Strait Water and Kuroshio subsurface water, which constituted the surface water and deep water of TWC respectively. In addition, we distinguished the surface and deep water according to the content of nitrite. Moreover, the upwelling of the TWC off Zhejiang Province could bring more phosphate, which promoted the HAB outbreak, regulated the nutrient structure of the HAB-outbreak area in the East China Sea, and relaxed the phosphate limitation that caused by excessive nitrogen.

**Key words** Taiwan Warm Current; hydrology; nutrients; Harmful Alga Blooms; summer