

东海甲藻赤潮前后典型断面营养盐变化及其补充初探

李京¹ 石晓勇^{1*} 张传松¹ 宋国栋¹ 朱德弟²

(¹中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

(²国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要 根据2005年春、夏季东海赤潮高发区两个航次的综合调查资料,对调查海域大规模甲藻赤潮过程中典型断面的营养盐变化特征进行了分析,并在此基础上初步探究了营养盐补充的主要来源。结果表明,营养盐持续补充在该海区甲藻赤潮过程中起到了重要作用,调查海区表层主要受长江冲淡水等陆源淡水补给作用的影响,而底层主要受台湾暖流补给作用的影响,且陆源补给作用对调查海区北部的影响强于南部,台湾暖流对调查海区南部的影响强于北部;长江冲淡水等陆源影响对硅酸盐、氮盐补给程度较高,其次是磷酸盐;台湾暖流对调查海区底层磷酸盐补给程度最高,对氮盐和硅酸盐的补给作用不明显;此外,底层沉积物释放作用可能也是硅酸盐补给的重要来源之一。

关键词 东海 甲藻赤潮 营养盐 典型断面

中图分类号 P734.4⁺4;P722.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2009)02-0094-06

Preliminary study on variation and supply of nutrients in typical sections of the East China Sea before and after Dinoflagellate blooms

LI Jing¹ SHI Xiao-yong^{1*} ZHANG Chuan-song¹

SONG Guo-dong¹ ZHU De-di²

(¹ College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(² The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012)

ABSTRACT Two comprehensive surveys were conducted in the frequent Harmful Algal Bloom (HAB) areas of the East China Sea in spring and summer of 2005. Based on the analysis of the variation of nutrients in typical sections, the supply of nutrients was discussed. The results show that the constant nutrient supply is very important for the occurrence of HABs in the surveyed areas. The surface water of these areas were mainly influenced by terrestrial source of nutrients, such as Changjiang diluted water (CDW); while the bottom water were mainly influenced by Taiwan warm current (TWC). Moreover, the influence of terrestrial source is stronger on the northern part than on the southern part, and the influence of the TWC is stronger on the southern part than on the northern part. The quantities of SiO₃-Si and DIN supply were

国家重点基础研究发展规划项目(2005CB422305)、国家自然科学基金重大项目(40490262)和国家科技合作重点项目计划(2004DFA03600)共同资助

* 通讯作者。E-mail: shixy@ouc.edu.cn

收稿日期: 2008-03-10; 接受日期: 2008-06-11

作者简介: 李京(1983-), 男, 硕士, 主要从事营养盐动力学研究。E-mail: dajingqdh@163.com

higher than $\text{PO}_4\text{-P}$ in CDW, while TWC supplied more $\text{PO}_4\text{-P}$ than the other nutrients. Moreover, the release of sediment is one of the important source of supply for $\text{SiO}_3\text{-Si}$.

KEY WORDS East China Sea The Dinoflagellate blooms Nutrients
Typical section

海洋中的营养盐 N, P, Si 等与生物的生长、繁殖密切相关, 其中氮和磷是细胞原生质的重要组成部分, 它们按一定比例被浮游植物所摄取, 当任何一种要素含量低于或高于一定比值时, 都会抑制生物的生长和繁殖甚至中毒死亡, 它们调节着整个生态系的平衡(任玲等 2000; 过锋等 2005)。海水中的营养元素主要由沿岸径流带人, 其次是降雨和海洋生物的排泄以及尸体腐解, 因此有明显季节性和区域性变化(过锋等 2005)。

东海赤潮高发区是我国营养盐超标最严重的海区, 我国环境质量公报多次将这一海区水质质量划分为严重或中等污染(国家海洋局 2000、2001、2002、2003、2004)。近年来, 我国东海近海海域每年春季均会暴发以东海原甲藻为主的甲藻赤潮, 且暴发规模呈逐年增加的趋势(张春雷等 2006)。2005 年春、夏季节, 在舟山群岛及其南部海域发生了大规模甲藻赤潮, 优势种为东海原甲藻和有毒藻种米氏凯伦藻, 发生面积超过了 10 000 km^2 , 并且造成了海水养殖区养殖鱼类的大量死亡(张传松等 2008)。为了研究营养盐在东海海域大规模赤潮过程中的变化及其补充情况, 2005 年春、夏季甲藻赤潮发生前后, 分别在东海赤潮高发区进行了两个航次的综合调查。本文在对该海区甲藻赤潮过程中营养盐水平初步分析的基础上, 选取典型断面对调查海区营养盐结构(DIN/P、DIN/Si)变化情况进行了进一步的分析, 并初步探究了该海区营养盐补充的主要来源, 为研究我国东海赤潮发生机理提供必要的科学基础。

1 材料与方 法

1.1 调查站位设计

2005 年甲藻赤潮暴发前后两个航次的现场调查分别于 5 月 3~9 日(MC2005-3)和 6 月 22~24 日(MC2005-5)进行, 两航次调查断面分别为 MC2005-3: HB、RA、RB、ZA、ZB、ZC、ZD 和 ZE 断面; MC2005-5: HB、RA、RB、ZA 和 ZB 断面, 调查区域主要集中在 $27^{\circ}00'\sim 31^{\circ}30'\text{N}$, $121^{\circ}00'\text{E}\sim 123^{\circ}30'\text{E}$ 之间的海区。每航次均分别重复进行了 3 次大面调查。具体采样站位如图 1 (图 1 中虚线框标注为两航次调查重叠断面)。

1.2 取样与测定

调查过程中使用 Niskin 采水器采集水样, 样品经 GF/F (Whatman) 滤膜过滤后, 直接在船上实验室进行现场分析测定。各项营养盐的测定均采用分光光度法(国家海洋局 1998), 其中氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)用次溴酸钠氧化法, 硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)用镉铜还原法, 亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)用重氮偶氮比色法, 磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)用磷钼蓝法, 硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)用硅钼蓝法。 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的测定精度分别为: ± 0.3 , ± 0.02 , ± 0.1 , ± 0.02 和 $\pm 0.2 \mu\text{mol/L}$ 。

2 结果与讨论

调查区域位于东海西北部的陆架浅海区, 主要受长江冲淡水、江浙沿岸流和台湾暖流影响(蒲新明等 2001;

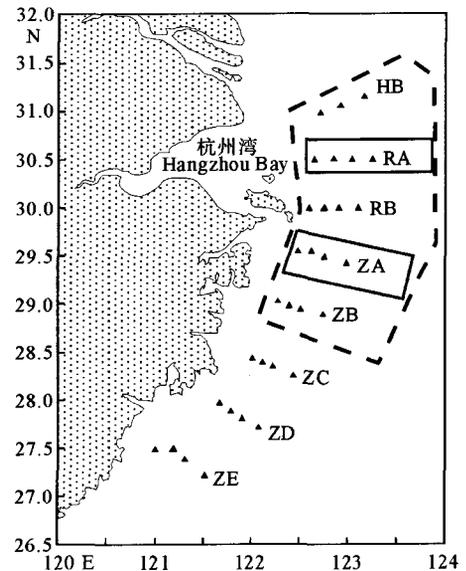


图 1 调查海区及站位

Fig. 1 The surveyed area and sampling stations

孙霞 2005)。2005年3月底到6月下旬调查海区发生了大规模的赤潮,3月底,调查海区表层和中层硅藻的细胞密度约为 10^5 cells/L,甲藻只有较低密度的零星分布,4月下旬至5月上旬,硅藻赤潮消散,甲藻赤潮开始孕育发展,优势种为东海原甲藻和米氏凯伦藻,细胞密度约为 10^4 cells/L;5月下旬至6月中上旬,大规模甲藻赤潮暴发,部分站位细胞密度高达 10^7 cells/L 以上;6月下旬,甲藻赤潮进入消散阶段(张传松等 2008)。

根据调查过程中所调查海域发生甲藻赤潮时的生消变化,选取两条典型断面 RA 和 ZA(见图1),从以下两个阶段对甲藻赤潮过程中调查海区营养盐的变化情况及其补充来源进行初步探讨:(1)4月下旬至5月上旬(MC2005-3),硅藻赤潮消散,甲藻赤潮开始孕育发展,此时为甲藻赤潮暴发前期;(2)6月下旬(MC2005-5),甲藻赤潮进入消散阶段,同时硅藻细胞密度开始有所回升,此时为甲藻赤潮暴发后期。

2.1 调查海区营养盐分布特征概况

甲藻赤潮暴发前期,由于调查海域刚刚暴发了较大规模的硅藻赤潮,因此各项营养盐均较3月底4月初有较大幅度的降低,调查海域的北部海区靠近杭州湾,受长江冲淡水补充等影响,各项营养盐等值线密集,仍处于较高的富营养化状态。而南部海域由于受硅藻赤潮消耗的影响,除底层浓度变化不明显外,表、中层各项营养盐均大幅降低,已处于较低的营养盐水平($DIN < 6 \mu\text{mol/L}$ 、 $PO_4\text{-P} < 0.2 \mu\text{mol/L}$ 、 $SiO_3\text{-Si} < 3 \mu\text{mol/L}$),高浓度等值线已贴近岸边;甲藻赤潮暴发后期,调查海区营养盐分布呈现出明显北高南低的特征,等值线分布特征已由3月份南北差异不大且与岸线基本平行,转变为以杭州湾为中心的扇状分布(胡 信等 2007)。

2.2 典型断面(RA、ZA)的营养盐分布特征比较

调查后期,营养盐等值线分布呈现出以杭州湾为中心的扇状分布,RA断面(调查过程前期未发现大面积甲藻赤潮,后期随着赤潮的北移而到达该区域)位于杭州湾外,处于调查海域的北部,受长江冲淡水影响较强烈;ZA断面(甲藻赤潮前期暴发区域)位于虾峙门水道以南,基本处于MC2005-5航次调查区域的南部,且为东海赤潮高发区域,在前后两次调查过程中,皆作为重点断面进行调查。故分别选取RA和ZA断面对甲藻赤潮前后营养盐变化情况进行系统分析,以初步说明该调查海区营养盐来源的补充程度。

图2为甲藻赤潮暴发前后,RA、ZA断面盐度及营养盐、营养盐结构剖面分布图,由图中两断面前期、后期比较可以看出:

(1)甲藻赤潮暴发后期,两断面表、中层盐度水平层化现象明显增强,跃层已经形成;底层水体盐度较赤潮前期明显升高。表层水体RA断面较ZA断面在相同经度位置处盐度低,说明调查海域北部的RA断面表层受陆源淡水影响要强于调查海区南部的ZA断面;赤潮后期两断面底层均出现一明显的高盐度区($S > 34.4$),该高盐度等值线呈现由外海底层向近岸表层扩张的趋势,说明此时(6月下旬)调查海区底层已受到外海高盐水的占据,而且在地形的影响下形成上升流。此外,ZA断面底层区域在同一经度、相同深度处比RA断面盐度要高,说明ZA断面底层海域受外海高盐水的影响要强于RA断面。

(2)两断面表层、中层DIN在甲藻赤潮暴发后期均较赤潮暴发前期有明显下降,RA断面DIN平均值由前期的 $13.27 \mu\text{mol/L}$ 降至后期的 $8.96 \mu\text{mol/L}$,ZA断面由前期的 $20.73 \mu\text{mol/L}$ 降至后期的 $11.54 \mu\text{mol/L}$,两断面DIN下降幅度分别达到32.5%和44.3%。通过甲藻赤潮前后两个阶段等值线分布特征比较可以看出,两断面表、中层DIN低浓度等值线分布均出现了后期向近岸推移的特点,而外海底层区域由于生物作用较小变化不大,结合表、中层磷酸盐前后变化情况该区域叶绿素数值(Chl-a 赤潮暴发前期达到 $2.96 \mu\text{g/L}$),进一步推测表、中层的DIN浓度下降是由于生物吸收作用所致;结合盐度变化情况,虽然赤潮后期两断面底层区域受到外海高盐水入侵的影响,但对应的底层区域DIN数值变化不明显,这在一定程度上说明影响该调查海区的外海底层高盐水并不具有高氮的特点。

此外,甲藻赤潮暴发前期ZA断面 122.75°E 、10m等深线处出现一高值区($DIN > 30 \mu\text{mol/L}$),其对应的表层区域出现一相对低值区($DIN < 14 \mu\text{mol/L}$),结合盐度分布图可以看出,该区域盐度出现相对低盐区($S < 30.1$)向下扩张的趋势,说明该区域由于受到陆源淡水补给作用的影响而出现DIN高值区,但由于该海区之前暴发过大规模的硅藻赤潮(持续至5月上旬)的消耗作用而导致表层DIN相对较低,另一方面该中层区域高值

区的存在也为甲藻赤潮暴发提供了充足的氮源。

(3) RA 断面表层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 由甲藻赤潮前期的 $0.43\mu\text{mol/L}$ 降至后期的 $0.11\mu\text{mol/L}$, 下降 74.42%, ZA 断面表层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 由甲藻赤潮前期的 $0.23\mu\text{mol/L}$ 升高至后期的 $0.37\mu\text{mol/L}$, 上升 60.89%; 两断面底层磷酸盐浓度在赤潮后期皆出现明显的升高趋势: RA 断面底层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 由甲藻赤潮前期的 $0.56\mu\text{mol/L}$ 升高至后期的 $0.71\mu\text{mol/L}$, 上升 26.8%; ZA 断面底层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 由甲藻赤潮前期的 $0.50\mu\text{mol/L}$ 升高至后期的 $0.78\mu\text{mol/L}$, 上升 56%。从前后两阶段等值线变化情况看, RA 断面表层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 等值线变化趋势与 DIN 基本相似, 虽然调查前期在该断面并未发现大规模的甲藻赤潮发生, 但后期随着赤潮的北移而到达该区域, 由于生物吸收作用而导致表层磷酸盐水平出现大幅降低; ZA 断面赤潮后期表层区域呈现明显的以表层近岸为中心向外海扩散的扇状分布特征, 由于 ZA 断面地处虾峙门水道以外, 受到较大流量的淡水影响, 使得该断面表层海域磷酸盐在甲藻赤潮北移后得以快速补充; 两断面底层区域等值线分布均呈现出赤潮后期水平化现象加强的特征。

此外, ZA 断面由于甲藻赤潮暴发之前曾发生过大规模的硅藻赤潮(细胞密度曾达到 10^6 cells/L 以上), 致使该断面表层外海区域在甲藻赤潮前期出现了一磷酸盐低值区, 部分站位 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度甚至已位于检测限以下, 但由于 5 月底 6 月初长江开始进入丰水期, 其营养盐通量随径流量增加而增大(刘新成等 2002; Li *et al.* 2007), 使得调查海区表层磷酸盐能在甲藻赤潮期间(该区域 $\text{Chl-a} > 2\mu\text{g/L}$) 得到有效的补充, 所以即使是处在较低浓度水平, 磷酸盐仍能维持东海甲藻赤潮大规模的发生、发展, 这在一定程度上说明营养盐持续补充在赤潮过程中起到了重要作用。ZA 断面底层磷酸盐升高幅度远超过 RA 断面底层区域, 根据影响两断面底层区域的水体具有高盐度($S > 34.4$) 和高磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P} > 0.7\mu\text{mol/L}$) 的特点, 结合文献(王 辉 1995; 李徽翡等 2001) 初步判断影响该海区底层水体的水团为台湾暖流, 且其对调查海区南部底层磷酸盐的补给作用要强于北部。

(4) $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 由于在甲藻赤潮过程中消耗较少(甲藻无消耗, 夹杂的硅藻有消耗), 且有来源补充的影响, 其浓度值出现上升趋势: RA 断面由甲藻赤潮前期的 $13.35\mu\text{mol/L}$ 升至后期的 $14.64\mu\text{mol/L}$; ZA 断面由甲藻赤潮前期的 $10.36\mu\text{mol/L}$ 升至后期的 $14.31\mu\text{mol/L}$ 。从等值线分布前后变化情况来看: 两断面表层区域赤潮后期均呈现出高浓度等值线向外海推移的趋势, 结合表层盐度分布变化趋势, 进一步证明了表层海区主要受陆源淡水补给作用的影响, 这同时导致了中层等值线呈现出向近岸扭曲的分布特征, 同时也说明影响该海域底层的外海水团不具有高硅酸盐的特点; 两断面底层区域赤潮后期均出现高浓度等值线由近岸底层向外海表层扩张的特点, 说明该海域底层 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 补给可能受底层沉积物释放作用的影响, 这与文献(胡 估等 2007; 石 峰 2003) 中的结果基本一致。

(5) 两断面底层区域赤潮后期 DIN/P 略有下降, 主要是由于底层营养盐因难于被浮游植物吸收利用, DIN/P 数值变化相对较小。甲藻赤潮过程中, ZA 断面外海表层、中层 DIN/P 随甲藻赤潮的发生、发展迅速下降, 而 RA 断面表层却呈现出相反的变化趋势, 其可能原因是赤潮后期, 长江已进入丰水期, 随着长江径流量的增大(刘新成等 2002; Li *et al.* 2007), RA 断面受到长江冲淡水的补充作用更加强烈, 且由于近年来受大量使用氮肥流失的影响, 长江冲淡水中的溶解无机氮含量成倍增加, DIN/P 可超过 100(沈志良等 2001), 从而导致 RA 断面表层 DIN/P 上升(由赤潮前期的 42.24 升至后期的 80.81), 而 ZA 断面由于刚刚暴发了大规模的甲藻赤潮, 对氮盐、磷酸盐大量吸收, 从而导致了该区域表层 DIN/P 迅速下降(由赤潮前期的 170.03 降至后期的 42.31), 这说明甲藻赤潮过程中甲藻对氮盐的吸收速率快于磷酸盐。

(6) 从两断面前后阶段 DIN/Si 变化的比较可以看出, 甲藻赤潮过程中氮硅比呈现下降趋势(RA 断面由甲藻赤潮前期的 1.00 降至后期的 0.53; ZA 断面由甲藻赤潮前期的 2.24 降至后期的 0.78), 结合之前暴发的硅藻赤潮及硅藻与甲藻的演替现象推测: 低的氮硅比或较高浓度的硅酸盐将更有利于硅藻在与甲藻竞争中占据优势。

综合比较两断面前后阶段营养盐及营养盐结构剖面图(图 2) 可以发现, 调查海区表层受长江冲淡水等陆源影响较为强烈, 其对硅酸盐、氮盐补给程度较高, 其次是磷酸盐; 调查海区底层主要受台湾暖流的补给作用, 其对磷酸盐补给程度最高, 而对氮盐和硅酸盐的补给作用不明显。此外, 底层沉积物释放作用也是该海区硅酸盐补给的重要来源。

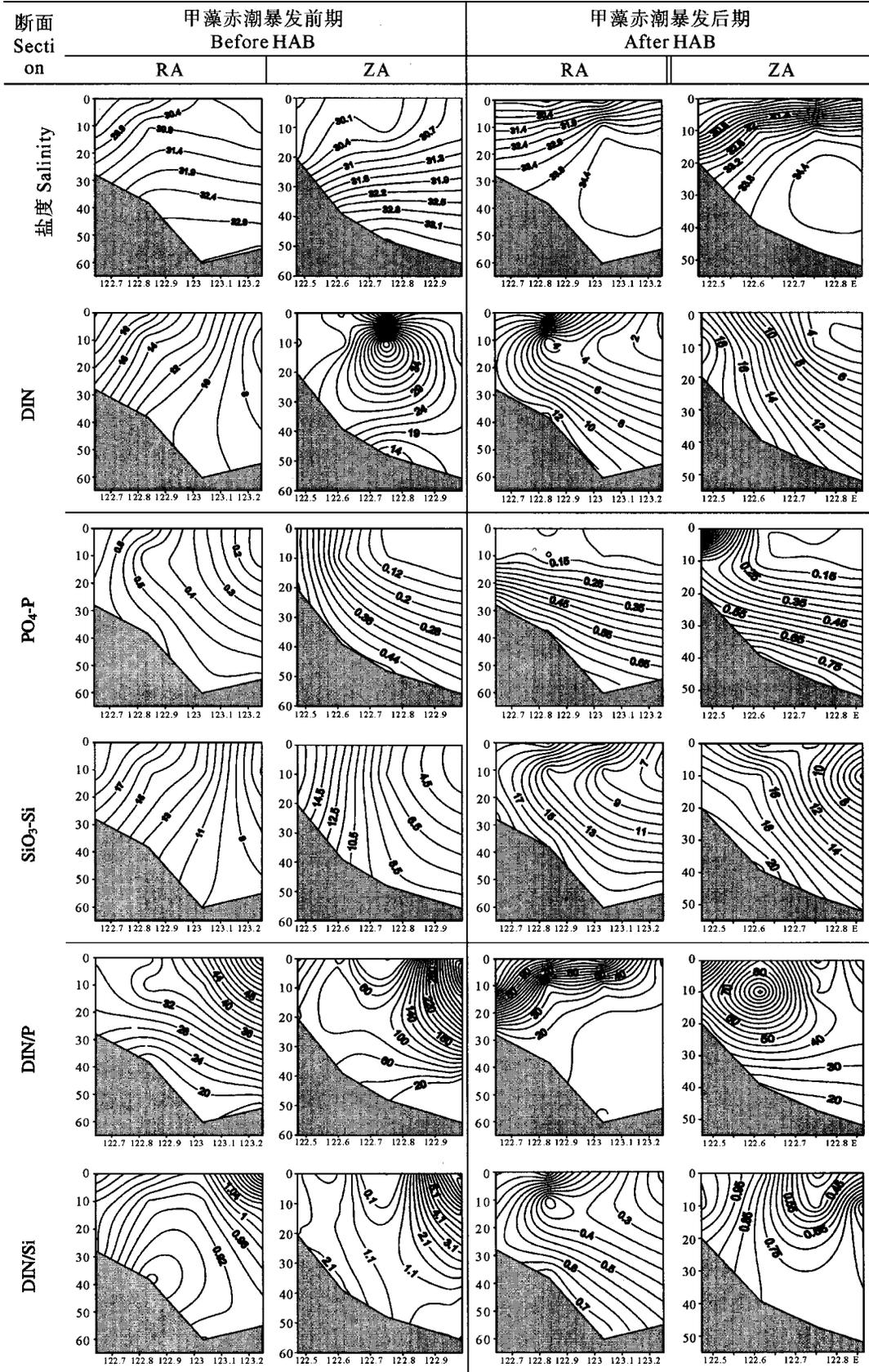


图 2 RA 和 ZA 断面相关参数赤潮前后剖面分布比较(DIN,PO₄-P 和 SiO₃-Si 单位:μmol/L)

Fig. 2 Comparison of relevant parameters before and after HAB at RA and ZA sections

3 结论

综合该海区甲藻赤潮暴发前后典型断面(RA、ZA)盐度、营养盐及营养盐结构变化情况,可以看出:

(1)甲藻赤潮暴发前期,调查海区南部海域表、中层虽因之前暴发的硅藻赤潮消耗的影响,已处于较低的营养盐水平($\text{DIN} < 6 \mu\text{mol/L}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P} < 0.2 \mu\text{mol/L}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si} < 3 \mu\text{mol/L}$),而部分叶绿素高值区($\text{Chl-a} > 2 \mu\text{g/L}$)虽然已处于较低的营养盐水平,但仍能维持较长时间,这在一定程度上说明营养盐持续补充在甲藻赤潮过程中起到了重要作用。

(2)两断面表、中层 DIN 在赤潮暴发后期均较赤潮暴发前期有明显下降(RA 断面下降 32.5%,ZA 断面下降 44.3%),底层区域 DIN 数值变化不明显;两断面表层磷酸盐呈现出相反的变化趋势(RA 断面下降 74.4%,ZA 断面上升 60.9%),底层海区磷酸盐均较赤潮前期明显升高(RA 断面上升 26.8%,ZA 断面上升 56%);硅酸盐在甲藻赤潮后期浓度值出现上升趋势。

(3)调查海区表层主要受长江冲淡水等陆源淡水补给作用的影响,底层主要受台湾暖流高盐水补给作用的影响,且陆源补给作用对调查海区北部的影响强于南部,台湾暖流对调查海区南部的补给作用强于北部。长江冲淡水等陆源补给作用,对硅酸盐、氮盐补给程度较高,其次是磷酸盐;台湾暖流对调查海区底层磷酸盐补给程度最高,而对氮盐和硅酸盐的补给作用不明显;底层沉积物释放作用可能也是该海区硅酸盐补给的重要来源之一。

致谢:本文盐度数据由国家海洋局第二海洋研究所朱德弟研究员提供,叶绿素数据由中国科学院南海海洋研究所霍文毅研究员提供,在此表述诚挚的感谢!

参 考 文 献

- 王 辉. 1995. 东海和南黄海夏季环流的斜压模式. 海洋与湖沼, 27(1): 73~78
- 石 峰. 2003. 营养盐在东海沉积物-海水界面交换速率和交换通量的研究. 青岛: 中国海洋大学, 5
- 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, 3
- 刘新成, 沈焕庭, 黄清辉. 2002. 长江入河口区生源要素的浓度变化及通量估算. 海洋与湖沼, 33(3): 332~340
- 李徽翥, 赵宝人. 2001. 渤、黄、东海夏季环流的数值模拟. 海洋科学, 25(1): 28~32
- 任 玲, 杨 军. 2000. 海洋中氮营养盐循环及其模型研究. 地球科学进展, 15(1): 180~187
- 过 锋, 陈聚法. 2005. 胶州湾北部氮、磷营养盐的分布及变化特征. 海洋水产研究, 26(6): 35~40
- 张传松, 王江涛. 2008. 2005 年春季东海赤潮过程中营养盐作用初探. 海洋学报(待出版)
- 张春雷, 石晓勇. 2006. 营养盐对东海赤潮优势藻种生长影响的船基围隔实验. 海洋水产研究, 27(4): 29~35
- 沈志良, 刘 群, 张淑美, 苗 辉, 张 平. 2001. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素. 海洋与湖沼, 32(5): 465~473
- 国家海洋局. 2001. 2000 年中国海洋环境质量公报. [Http://www.soa.gov.cn](http://www.soa.gov.cn)
- 国家海洋局. 2002. 2001 年中国海洋环境质量公报. [Http://www.soa.gov.cn](http://www.soa.gov.cn)
- 国家海洋局. 2003. 2002 年中国海洋环境质量公报. [Http://www.soa.gov.cn](http://www.soa.gov.cn)
- 国家海洋局. 2004. 2003 年中国海洋环境质量公报. [Http://www.soa.gov.cn](http://www.soa.gov.cn)
- 国家海洋局. 2005. 2004 年中国海洋环境质量公报. [Http://www.soa.gov.cn](http://www.soa.gov.cn)
- 国家海洋局. 1998. 海洋监测规范. 北京: 海洋出版社(GB 17378. 7-1998), 3~25, 55~59
- 胡 洁, 张传松, 王修林. 2009. 东海春季赤潮前后沉积物-海水界面营养盐交换速率的研究. 环境科学, 28(7): 1 442~1 449
- 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 2001. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究. 海洋学报, 23(3): 57~66
- LI, M. T., XU, K. Q., Watanabf, M. *et al.* 2007. Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71: 3~12