

东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其与赤潮的关系

张传松, 王修林, 石晓勇, 唐洪杰, 韩秀荣, 辛宇

(中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 根据 2002-04 ~ 2003-02 期间在长江口及其邻近海域进行的 4 个综合航次的调查资料, 分析了该海区营养盐季节变化及分布特征, 并初步探讨了海区营养盐状况与赤潮的关系. 结果表明, 各项营养盐的平均浓度分别为: 溶解无机氮(DIN) (17.93 ± 2.46) $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) (0.59 ± 0.11) $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和硅酸盐($\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$) (15.34 ± 3.23) $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 调查海区处于富营养化状态; 海区营养盐含量存在明显的季节变化, 表现为秋冬季节高于春夏季节, 其平面分布特征呈现近岸高、外海低, 沿岸方向向离岸方向逐渐降低的特点; 调查海区 DIN 和 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 主要来源于长江冲淡水等陆源输入, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 主要来源于长江冲淡水和台湾暖流; 调查海区的赤潮发生区域主要集中在营养盐浓度相对较高, 而总悬浮颗粒物(TSP)含量相对较低的区域.

关键词: 营养盐; 东海; 赤潮; 分布

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)11-2416-09

Seasonal Variation and Spatial Distribution of Nutrients and Their Relationships with Harmful Algal Blooms in Coastal Area of the East China Sea

ZHANG Chuan-song, WANG Xiu-lin, SHI Xiao-yong, TANG Hong-jie, HAN Xiu-rong, XIN Yu

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the data from four cruises that carried out in the Changjiang River estuary and its adjacent areas from 2002-04 to 2003-02, the seasonal variation and spatial distribution of nutrients were analyzed, and the relationship between nutrients condition and the harmful algal blooms (HABs) was also discussed. Results showed that the annual average concentration of nutrient was (17.93 ± 2.46) $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ for DIN, (0.59 ± 0.11) $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ for $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, (15.34 ± 3.23) $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ for $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$, and the study area was in the state of eutrophication. The average concentration of nutrient showed a remarkable seasonal fluctuation with the higher value in autumn and winter and lower value in spring and summer. The spatial distribution of the nutrients was typically such that the concentrations of DIN, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ decreased from inshore to offshore area, and the contours generally decreased rapidly in down-coast directions. DIN and $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ of the study area were largely contributed by Changjiang River diluted water and other terrigenous inputs, while $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ mainly by Changjiang River diluted water and the Taiwan Warm Current. The following HABs showed that its occurrences were usually laid in the areas with higher nutrients and lower total suspended particles (TSP).

Key words: nutrient; the East China Sea; harmful algal bloom; distribution

随着长江流域尤其是长江三角洲地区及江浙沿海地区工农业经济的高速发展, 每年大量工农业废水和城市生活污水通过河流输入到我国东海海域, 使得输入到该海域的营养盐数量不断增加. 据统计, 从 20 世纪 60 ~ 90 年代末, 每年仅通过长江输入到东海的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总量就增加了 7 倍左右^[1,2]. 同时, 长江输入东海的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 总量也呈缓慢增长的趋势^[3]. 此外, 由于海洋渔业资源的锐减, 20 世纪 80 年代以来我国东海海域海水养殖业迅猛发展, 大量养殖生物排泄物、残留饲料等有机污染物被排放到海水和海底沉积物中, 进一步加重了东海海区的富营养化程度.

近年来长江口及其邻近海域富营养化范围逐年扩大, 部分海区常年处于富营养化状态^[4], 这直接导

致了该海区成为我国赤潮发生状况最为严重的海区. 据不完全统计, 进入 20 世纪 90 年代后, 长江口及其邻近海域赤潮发生的次数占全国赤潮总数的 50% 以上. 尤其是近几年来, 我国东海赤潮发生频率剧增. 例如, 1999 年东海发生赤潮仅仅 2 次, 2000 年就上升为 13 次, 2001 年 34 次, 2002 年 51 次, 2003 年跃升为 86 次^[5]. 同时, 该区域赤潮还呈现出持续时间不断加长, 发生面积不断扩大的特点^[6,7].

无论是其发生时间、地点, 还是其发生频率与规模, 赤潮在很大程度上都与营养盐时空分布状况密

收稿日期: 2006-12-25; 修订日期: 2007-04-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB409703); 国家自然科学基金项目(40376033); 国际科技合作重点项目(2004DFA03600)

作者简介: 张传松(1972 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为海洋环境科学, E-mail: zcsong@mail.ouc.edu.cn

切相关^[8].受其所处地理位置的影响,长江口及其邻近海域营养盐的分布状况及其控制过程非常复杂^[9,10].本实验通过对 2002~2003 年春夏秋冬 4 个季节海上大面调查数据的分析,研究了该海域营养盐的季节变化和分布规律,并初步探讨了营养盐分布的控制过程,以期为我国东海大面积赤潮的发生机理及其相关研究提供必要的科学基础.同时,也对我国近年来东海海域营养盐分布的季节变化做了补充.

1 研究区域与分析方法

现场调查分别于春季(2002-04-26~2002-05-02)、夏季(2002-08-26~2002-09-04)、秋季(2002-11-05~2002-11-10)和冬季(2003-02-25~2003-03-18),在经度122°00'E~124°00'E、纬度29°00'N~32°00'N之间的东海海区进行,共布设 7 个断面,28 个综合大面站,调查区域包括长江口、杭州湾口及其邻近海域(图 1).

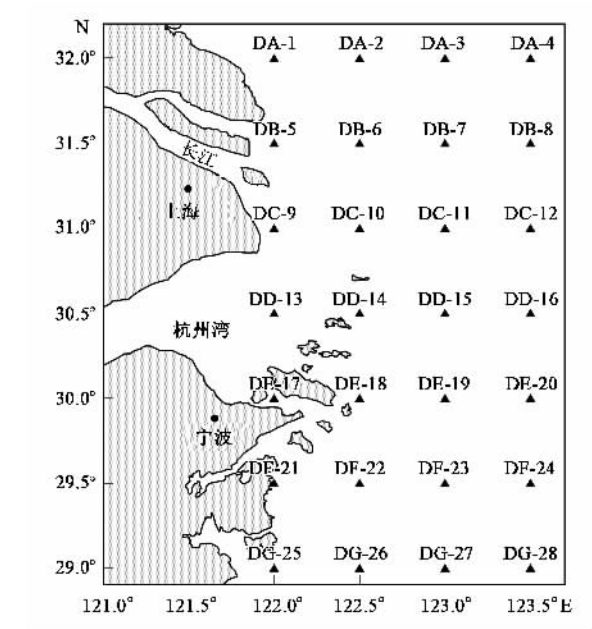


图 1 东海调查站位分布

Fig.1 Sampling stations in the East China Sea

调查过程中应用 YSI 现场测定海水温度和盐度等参数.使用 20 L Niskin 采水器分别采集表、中、底层水样(中层水样取决于现场 YSI 的叶绿素跃层或温盐跃层),水样经 GF/F(0.7 μm)滤膜过滤后,于 -20℃下保存.在陆地实验室以 Technicon AAI 营养盐自动分析仪,采用光度分析法分别测定各项溶解无机态营养盐: PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 和

SiO_3^{2-} -Si. 测量精度分别是: PO_4^{3-} -P 为 98.02%、 NO_3^- -N 为 99.41%、 NO_2^- -N 为 99.05%、 NH_4^+ -N 为 99.69% 和 SiO_3^{2-} -Si 为 99.05%^[11]. $\text{DIN} = \text{NO}_3^-$ -N + NO_2^- -N + NH_4^+ -N.

2 结果与讨论

2.1 营养盐浓度变化

表 1 列出了调查海区春夏秋冬 4 个季节及全年表、中、底层海水中, DIN 、 PO_4^{3-} -P 和 SiO_3^{2-} -Si 的平均浓度及其变化范围.其中,全年 DIN 的浓度在 $1.63 \sim 78.89 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度为 $(17.93 \pm 2.46) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P 的浓度在 $0.25 \sim 1.70 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度为 $(0.59 \pm 0.11) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, SiO_3^{2-} -Si 的浓度在 $0.55 \sim 81.49 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度为 $(15.34 \pm 3.23) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.各项营养盐的平均浓度与 20 世纪 80~90 年代相比均有不同程度的提高^[12~14].同时,与中国其它赤潮高发区,如与渤海湾、大连湾相比浓度偏低,而与胶州湾、大鹏湾相比则浓度偏高^[15,16].

如表 1 所示,调查海区年度和各个季节 DIN 和 PO_4^{3-} -P 的平均浓度均超过了国家一类海水水质标准 (DIN : $14.29 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; PO_4^{3-} -P: $0.47 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)^[17],调查海区整体上处于富营养化状态.年度 DIN 浓度在 $(1.63 \sim 78.89) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化, PO_4^{3-} -P 在 $(0.25 \sim 1.70) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,调查海区内富营养化区域与贫营养化区域共存,且富营养化区域具有一定的集中性.经统计,在年度所有站位中, DIN 和 PO_4^{3-} -P 含量超过一类海水水质标准的百分比分别达 47% 和 65%,甚至有 10% 站位的 DIN 和个别站位的 PO_4^{3-} -P 浓度超过四类海水水质标准 (DIN : $35.71 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; PO_4^{3-} -P: $1.41 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),说明该调查海区部分区域富营养化程度较为严重.

调查海区不同水层之间营养盐浓度表现出一定的变化特征:表层和底层的营养盐含量较高,中层营养盐浓度较低.具体而言,全年 DIN 表层浓度的平均值为 $(19.73 \pm 0.95) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,明显高于底层 $(18.76 \pm 1.88) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和中层 $(15.26 \pm 1.74) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.对于 SiO_3^{2-} -Si,表层 $(15.77 \pm 3.66) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和底层 $(16.90 \pm 2.99) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 又明显高于中层 $(13.33 \pm 2.65) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.至于 PO_4^{3-} -P 浓度,底层最高,为 $(0.66 \pm 0.13) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,表层 $(0.55 \pm 0.10) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 与中层 $(0.55 \pm 0.07) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 相差不大.造成这一现象是因为,表层海水有低盐高营养盐的

表 1 东海海域各项营养盐浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 1 Values of nutrient concentration in the East China Sea/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

层次	时间	DIN		$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$		$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	
		平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
表层	5 月	19.32 ± 18.61	2.50 ~ 56.74	0.50 ± 0.16	0.31 ~ 0.86	13.55 ± 12.50	1.77 ~ 45.16
	8 月	18.58 ± 15.97	2.16 ~ 57.93	0.47 ± 0.24	0.25 ~ 1.15	12.89 ± 14.93	0.73 ~ 46.87
	11 月	20.44 ± 13.92	4.64 ~ 52.52	0.69 ± 0.32	0.31 ~ 1.70	20.96 ± 20.51	0.55 ~ 74.13
	2 月	20.58 ± 16.82	5.46 ~ 65.29	0.55 ± 0.15	0.39 ~ 0.84	15.66 ± 13.88	2.49 ~ 54.08
	全年	19.73 ± 0.95	2.16 ~ 65.29	0.55 ± 0.10	0.25 ~ 1.70	15.77 ± 3.66	0.55 ~ 74.13
中层	5 月	12.72 ± 10.26	1.63 ~ 41.95	0.48 ± 0.11	0.32 ~ 0.74	11.53 ± 8.09	1.77 ~ 27.22
	8 月	16.01 ± 12.63	3.07 ~ 45.74	0.53 ± 0.22	0.34 ~ 1.15	14.25 ± 14.99	0.99 ~ 54.30
	11 月	16.66 ± 11.20	4.02 ~ 46.17	0.64 ± 0.27	0.32 ~ 1.23	16.65 ± 16.92	1.34 ~ 81.49
	2 月	15.65 ± 10.32	5.03 ~ 38.08	0.53 ± 0.12	0.37 ~ 0.81	10.89 ± 8.15	1.93 ~ 28.94
	全年	15.26 ± 1.74	1.63 ~ 46.17	0.55 ± 0.07	0.32 ~ 1.23	13.33 ± 2.65	0.99 ~ 81.49
底层	5 月	16.55 ± 11.44	3.44 ~ 50.08	0.56 ± 0.11	0.39 ~ 0.94	15.99 ± 8.04	6.89 ~ 38.38
	8 月	17.86 ± 8.91	8.72 ~ 42.55	0.76 ± 0.29	0.34 ~ 1.23	17.31 ± 9.48	3.39 ~ 40.75
	11 月	20.28 ± 11.66	5.15 ~ 53.19	0.79 ± 0.24	0.40 ~ 1.54	20.74 ± 14.93	2.35 ~ 67.76
	2 月	20.36 ± 19.41	5.43 ~ 78.89	0.53 ± 0.15	0.35 ~ 0.93	13.56 ± 12.76	2.46 ~ 54.33
	全年	18.76 ± 1.88	3.44 ~ 78.89	0.66 ± 0.13	0.34 ~ 1.54	16.90 ± 2.99	2.35 ~ 67.76
全年	5 月	16.20 ± 3.31	1.63 ~ 56.74	0.51 ± 0.04	0.31 ~ 0.94	13.69 ± 2.23	1.77 ~ 45.16
	8 月	17.48 ± 1.33	2.16 ~ 57.93	0.59 ± 0.15	0.25 ~ 1.23	14.82 ± 2.26	0.73 ~ 54.30
	11 月	19.13 ± 2.14	4.02 ~ 53.19	0.71 ± 0.08	0.31 ~ 1.70	19.45 ± 2.43	0.55 ~ 81.49
	2 月	18.86 ± 2.79	5.03 ~ 78.89	0.54 ± 0.01	0.35 ~ 0.93	13.37 ± 2.39	1.93 ~ 54.33
	全年	17.93 ± 2.46	1.63 ~ 78.89	0.59 ± 0.11	0.25 ~ 1.70	15.34 ± 3.23	0.55 ~ 81.49

冲淡水持续补充,底层有海底沉积物界面间的营养盐释放作用^[18]以及高盐高营养盐的外海海水入侵,如台湾暖流^[19]、上升流等,而中层水样主要取自叶绿素跃层,浮游植物生长对营养盐的消耗起到重要作用.

此外,各项营养盐浓度平均值呈现明显的季节性变化,整体表现为秋季最高、夏季最低,秋冬季节普遍高于春夏季节.以表层为例:除秋、冬季 DIN 浓度基本相同外(秋季: 20.44 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 冬季: 20.58 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),各项营养盐浓度平均值的大小顺序表现为:秋季 > 冬季 > 春季 > 夏季.中层营养盐浓度的季节变化与表层变化特征基本一致,不同之处表现为春季各营养盐浓度最低.至于底层,除秋季最高外,其它季节差异不大.

调查海区各项营养盐平均浓度秋冬季节高于春夏季节的变化特点与中国东海河流入海径流量的大小相反.如长江干支流每年 5 月入汛,7、8 月进入主汛期,至 10 月起转入枯水期,5 ~ 10 月份的径流量占全年入海总径流量的 70% 以上,其它月份的径流量不到全年径流的 30%^[20].由于长江淡水中营养盐含量非常高,其中硝酸盐和硅酸盐的浓度有时可高达 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上^[3,20-22],强大的径流为调查海域输送了大量营养盐,夏季东海海域应为营养盐的高值期.事实恰好相反,这是因为,在春夏季节,调查海

区虽然有大量的营养盐补充,但由于此时有适宜的环境因素,如水温、盐度、光照强度、水动力、降雨、风场等,浮游植物会迅速生长繁殖,进而形成赤潮消耗掉大量营养盐.例如,在夏季远离海岸的 DC11 站,叶绿素含量高达 63.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硅藻的细胞丰度高达 $1.0\times 10^7\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$.同时,春夏季节海水层化现象加强,减弱了底层对上层营养盐的补充.而在秋冬季节,浮游植物生长繁殖速度会减缓或停止,营养盐消耗会大大降低.同时,调查海域水温降低,海水垂直交换逐渐加强,各层之间营养盐可以相互交换(如上升流),使得该区域营养盐含量处于相对较高的水平.调查海区营养盐的陆源输入量最大而整体平均浓度最低,这一相互矛盾的现象说明浮游植物的生长繁殖是影响春、夏季水体营养盐含量的一个重要因素,调查海区营养盐的实际水平取决于营养盐补充和生物活动彼此之间的消长和平衡.

2.2 营养盐浓度平面分布特征

图 2 ~ 5 为调查海区春、夏、秋、冬 4 个季节各项营养盐浓度的平面分布,经过对其综合分析可知,每一季节各类营养盐平面分布特征基本相同:均表现为近岸高、外海低,沿岸向离岸方向呈逐渐降低的特点.同时,在长江口以东至舟山群岛区域终年存在一个范围很大的营养盐高值区,其等值线以长江口和杭州湾为中心,呈扇面状向外海扩展分布.

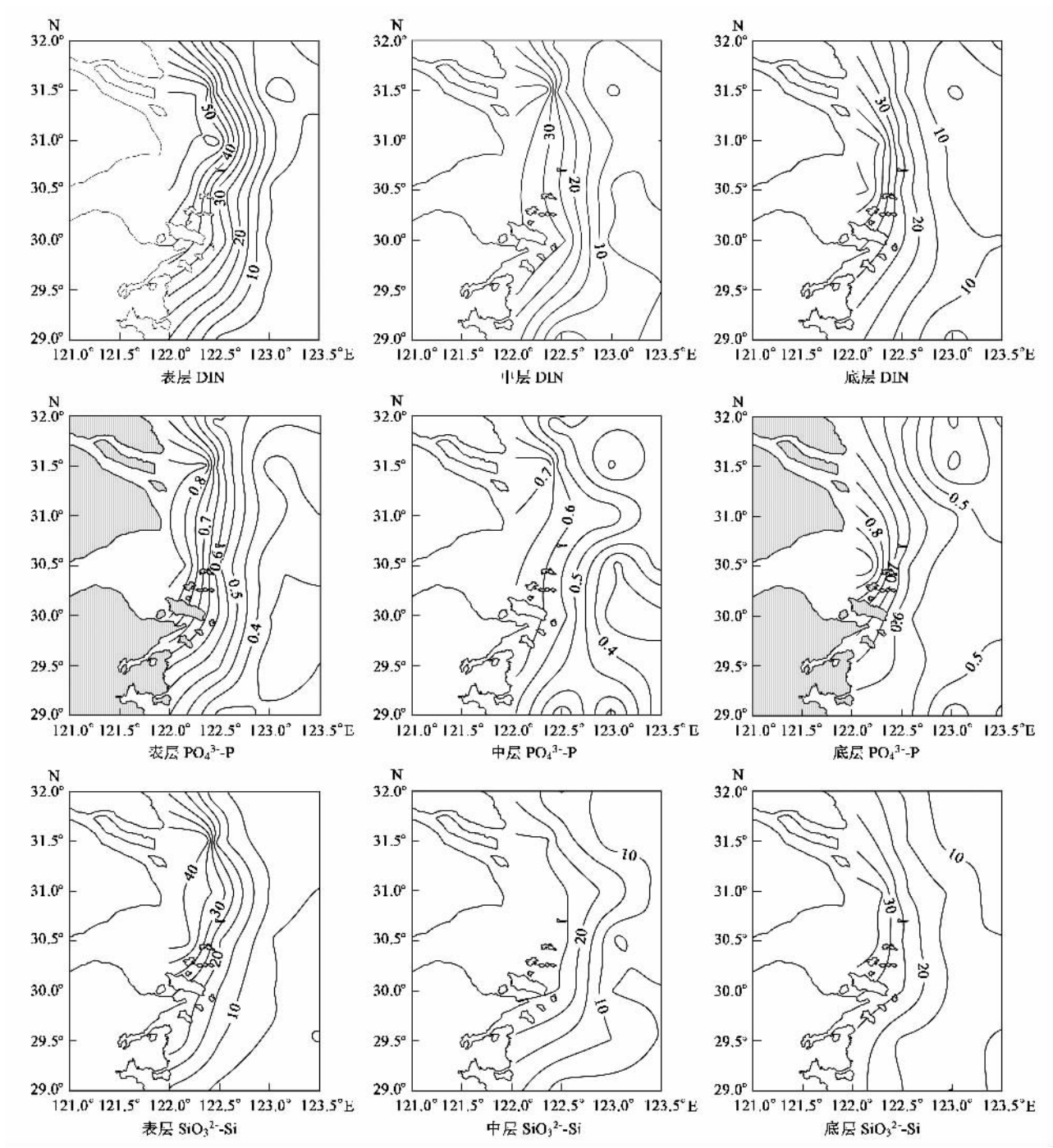


图 2 2002 年春季东海表、中、底层 DIN 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平面分布

Fig. 2 Horizontal distributions of DIN , $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ at the surface, middle and bottom layer in the East China Sea in spring, 2002

具体而言,春季 DIN 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均具有相似的平面分布特征:整体上各营养盐等值线走向基本与海岸线平行,整个海区营养盐的高值区主要集中在沿岸至 122.7°E 之间.表层 DIN 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等值线外扩且均呈现双舌状的分布态势,在长江口和杭州湾附近海域分别出现 2 个高值区并呈舌状向东延伸.中层 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 DIN 只在长江口附近

呈舌状向东伸展, $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 则南北 2 个高值区连片并呈钝舌状向东延伸.底层 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 DIN 高值区向南偏移,靠近杭州湾附近海域,呈舌状向外海伸展.同时,高浓度营养盐等值线舌状峰的特点为表层峰形尖锐突出,中层舌状峰延伸逐渐变宽,底层舌状峰不明显.此外,在中层和底层, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在调查海区的东南部出现北向的极大值区.

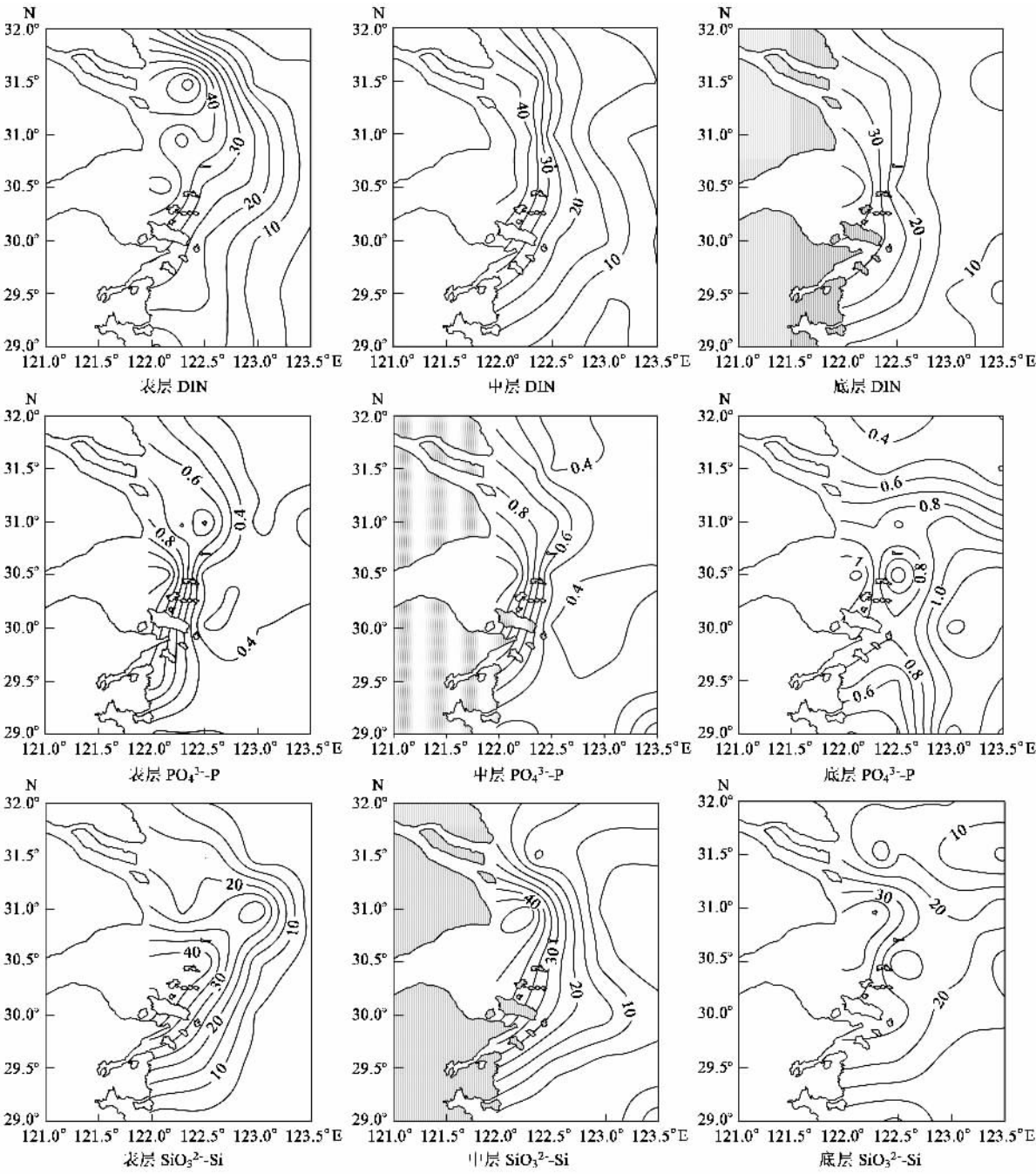


图 3 2002 年夏季东海表、中、底层 DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平面分布

Fig.3 Horizontal distributions of DIN, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ at the surface, middle and bottom layer in the East China Sea in summer, 2002

夏季调查海区各营养盐平面分布特点与春季基本一致,同样表现出近岸浓度高、远岸低的特点,但营养盐等值线走向明显由春季的基本与海岸线平行转变为以长江口和杭州湾为中心的舌状分布,高浓度营养盐等值线水舌从长江口和钱塘江口向外海推移,除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 外,表层营养盐高值区的舌状峰已向东扩展并超过 123°E .同时,各营养盐的高值区由表层至底层整体向北偏移,而且表层明显的双舌状分布

也演变为东北方向典型的单舌状分布.在底层,除 DIN 外,浓度分布特征较为复杂, $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的分布出现以 DD14 站为中心,东、南、西、北向均出现峰值,呈现出数个高值舌状峰互相冲撞的现象. 秋季,整个调查海区营养盐的分布特征与夏季相比,高浓度营养盐等值线的舌状峰继续外扩并向外海推进,其前锋已抵达 123.5°E 附近.此外,浙江近岸营养盐含量明显提高,存在明显的营养盐锋面,

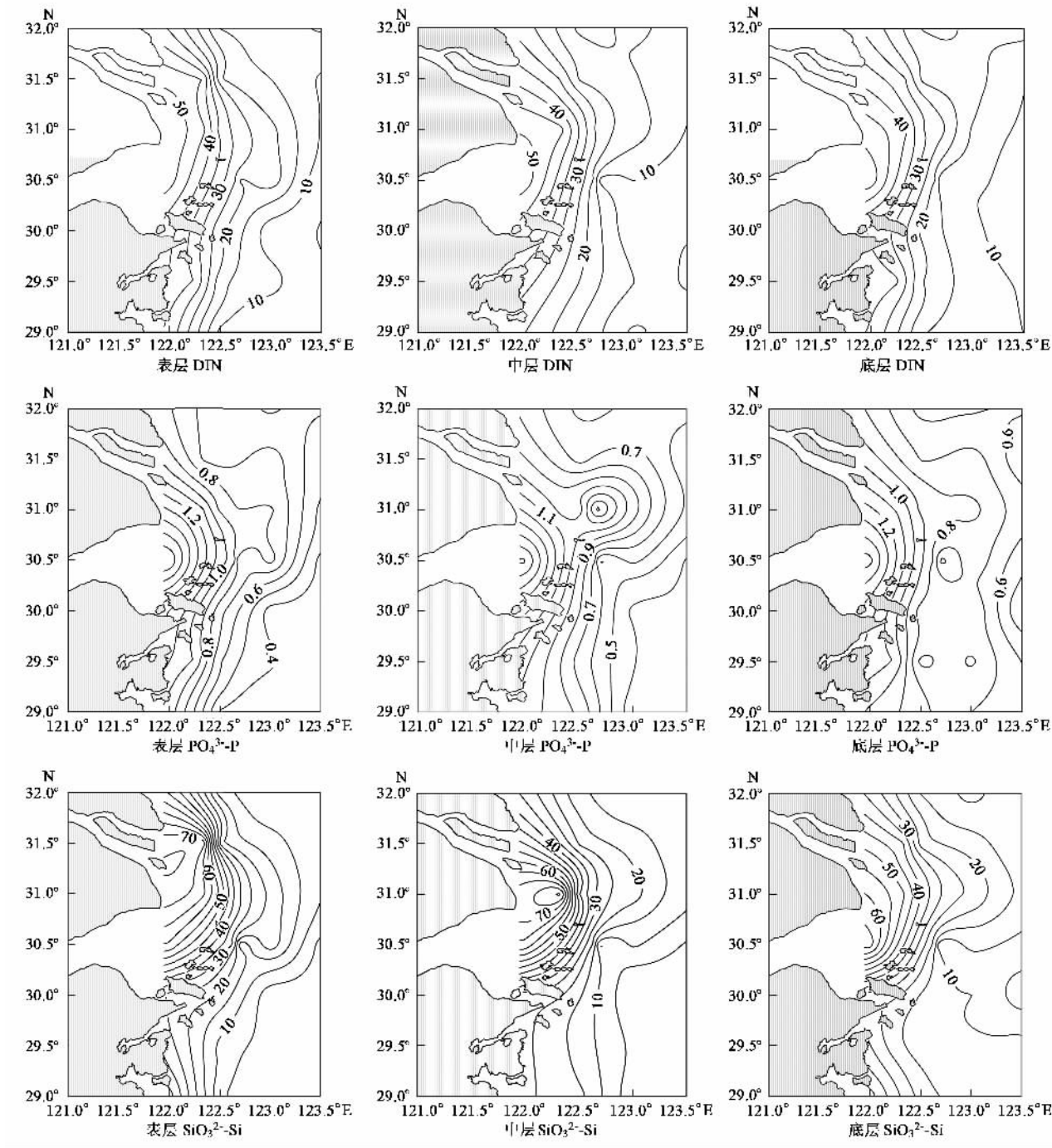


图 4 2002 年秋季东海表、中、底层 DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平面分布

Fig.4 Horizontal distributions of DIN, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ at the surface, middle and bottom layer in the East China Sea in autumn, 2002

自里向外营养盐含量快速递减。

与秋季相比,冬季长江口附近的高浓度营养盐等值线的舌状峰已经明显回缩,其前锋已由 123.5°E 退缩至 122.5°E 附近.整体而言,东海近岸海域营养盐浓度较高,但仅限于靠岸的狭小地带,且此处等值线十分密集,形成明显的营养盐锋面,自此向外营养盐含量快速递减.营养盐的分布特点由秋季的呈宽

大水舌分布演变为等值线几乎与海岸线平行分布,而且其营养盐锋面较春季离岸更近.同时,调查海域高浓度营养盐南侵现象明显,与秋季相比,南部调查海区营养盐浓度的高值区向外扩大了约 1 个经度单位,其中以表层尤为明显。

整个调查海区营养盐的分布主要是受长江冲淡水影响.由调查海区各个季节的营养盐平面分布图

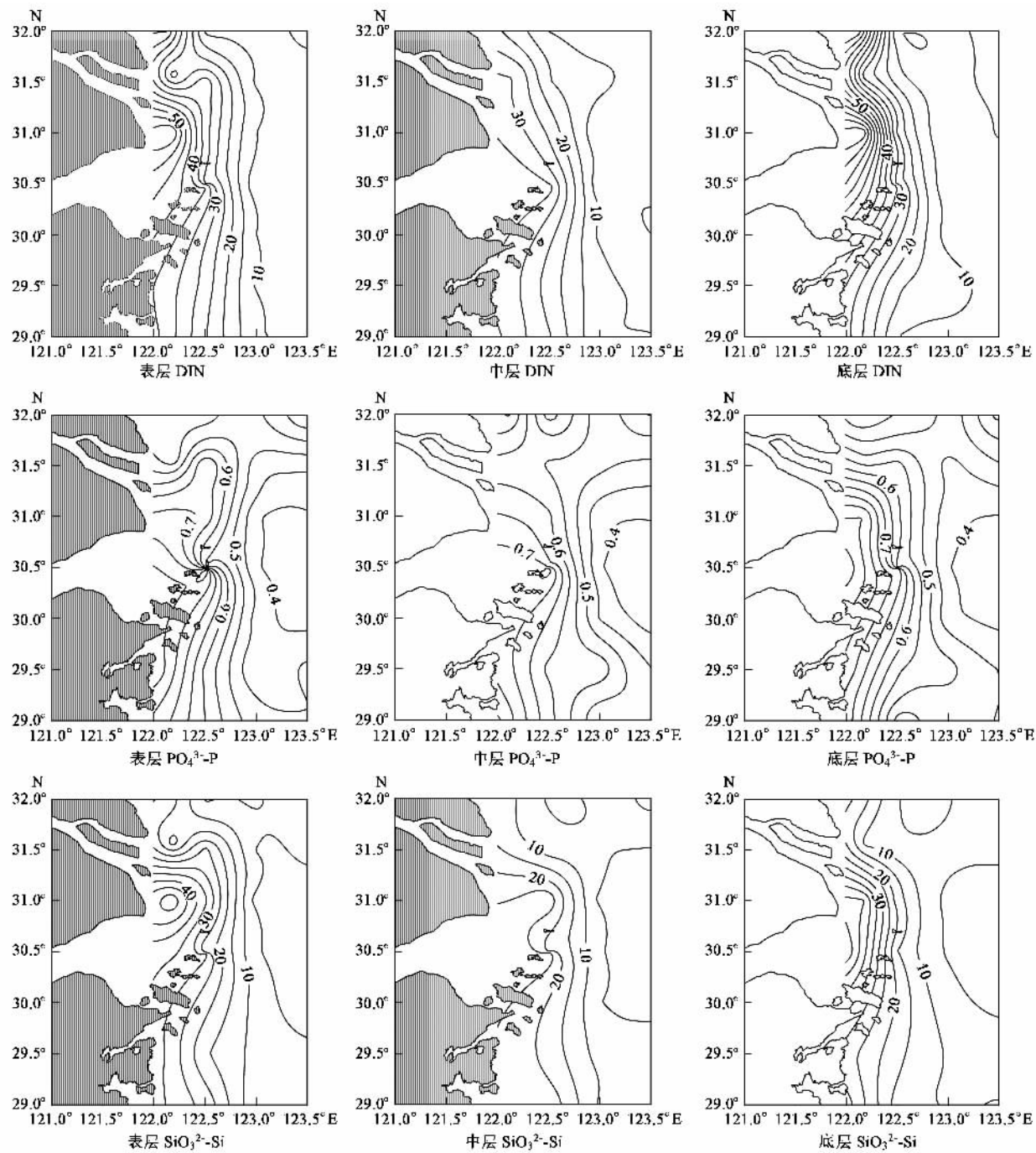


图 5 2002 年冬季东海表、中、底层 DIN 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的平面分布

Fig.5 Horizontal distributions of DIN , $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ at the surface, middle and bottom layer in the East China Sea in winter, 2002

可以看出,营养盐扩散形态与长江冲淡水扩散形态十分吻合,高浓度营养盐的舌状峰随长江径流总量的变化而变化^[23].夏秋季节,长江径流流量加大,高浓度营养盐前锋逐渐向外海推进,甚至到达 123.5°E 以东,超出了调查范围;当进入冬春季节,河流径流流量较小,高浓度营养盐前锋退缩至 122.5°E 附近,长江对营养盐的输运范围也仅限于浙江近岸的狭小

地带,分布表现出浙江近岸营养盐含量很高,等值线几乎与海岸线平行的特征.

调查海域营养盐的分布特征说明,除受长江冲淡水外扩影响外,还明显受到其它水团运动和季风风向变化等因素的影响.秋冬季节,台湾暖流北向能力减弱,在强劲偏北季风的作用下,长江冲淡水主体右转,穿过杭州湾口及舟山群岛一带贴岸南下,造成

营养盐等值线与岸线平行和高值区南侵的现象.春夏季节,台湾暖流北向能力增强,在东南季风的作用下,长江径流出口门后转向东北,造成营养盐分布状况由等值线与岸线平行转向东北向水舌分布的特点,同时营养盐高值区南侵现象消失.

此外,夏季底层 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在远离海岸的 DF23 和 DG27 站一带出现极大峰,说明 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的来源除长江和钱塘江的径流量外,在调查海域南部,台湾暖流对调查海区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的分布也有很大贡献,台湾暖流的输送是调查海域 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的重要补充^[24].

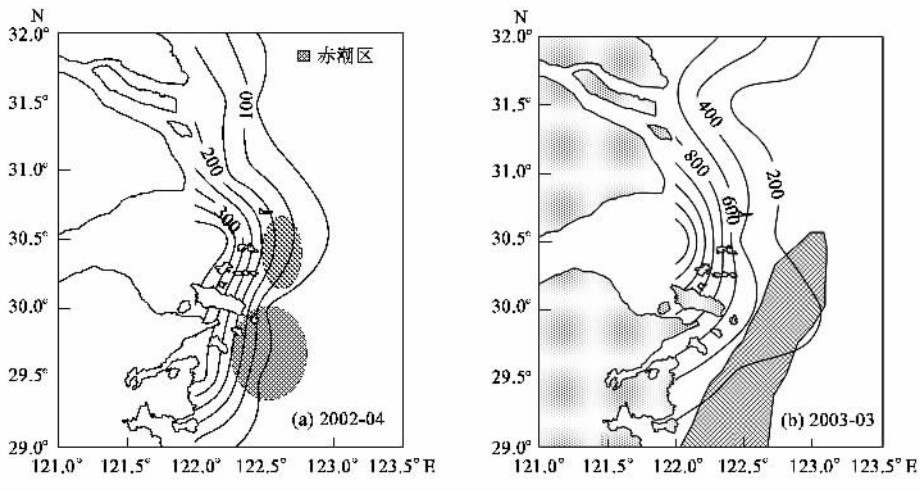


图 6 东海表层 TSP 平面分布图

Fig.6 Horizontal distributions of TSP at the surface layer in the East China Sea

为了了解营养盐在东海大规模赤潮形成过程中的作用,对大面调查期间赤潮发生区域的营养盐状况(表 2)进行了分析.通过对表 2 与表 1 的比较可知,调查海区赤潮的爆发主要集中在营养盐浓度相对较高、富营养化水平相对较重的区域.以 2002 年为例,赤潮发生前区域内表层海水 DIN 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 浓度的平均值分别为 34.15、0.57 和 19.48 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,明显高于整个调查海区的 19.32、0.50 和 13.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 DIN 尤为突出.同时,区域内营

2.3 赤潮发生区域营养盐状况赤潮的关系

2002 年春季航次大面调查结束后,5 月 3 日在调查海区南部和北部发生了面积超过 1 000 km^2 ,优势种为甲藻和硅藻的大规模赤潮[图 6(a)].而在大面调查期间,赤潮发生区域的叶绿素浓度均低于 0.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,无赤潮发生迹象;在随后进行的追踪调查期间,该区域内部分站位叶绿素浓度高达 60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,赤潮藻密度高达 $6\times 10^7\text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上.同样,2003 年航次结束后,4 月底 5 月初在该区域同样发生了更大规模的甲藻赤潮[图 6(b)].

养盐的浓度范围分别为 19.86 ~ 56.74、0.50 ~ 0.63 和 9.82 ~ 34.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,也均处于整个调查海区较高的水平(DIN :2.50 ~ 56.74 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$:0.31 ~ 0.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$:1.77 ~ 45.16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$).在浮游植物易于生长繁殖的表、中层水体,赤潮发生前区域内营养盐的浓度普遍高于调查海区整体水平,且超过了国家一类海水水质标准,处于富营养化水平,具备了后期赤潮发生的物质基础.

对赤潮发生地点的进一步分析表明,赤潮并没

表 2 赤潮发生区表层和中层营养盐浓度范围/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Nutrient concentration of the surface layer and middle layer in the red tides area/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

时间	营养盐	表层		中层	
		平均值	范围	平均值	范围
2002-04-26 ~ 2002-04-30	DIN	34.15	19.86 ~ 56.74	25.18	19.17 ~ 30.25
	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.57	0.50 ~ 0.63	0.56	0.50 ~ 0.63
	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	19.48	9.82 ~ 34.54	22.94	13.67 ~ 27.22
2003-02-25 ~ 2003-03-10	DIN	23.14	6.53 ~ 41.31	25.46	6.64 ~ 38.08
	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.57	0.41 ~ 0.83	0.58	0.41 ~ 0.78
	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	17.5	5.95 ~ 31.66	16.31	5.22 ~ 28.50

有发生在营养盐浓度最高的长江口和杭州湾附近,而是发生在营养盐浓度相对较低的桃花岛及普陀山外部,这说明营养盐浓度的高低并不是决定东海赤潮发生的唯一要素,其中光照强度也是影响赤潮发生的关键环境要素之一^[25]。如图 6 所示,受长江冲淡水外扩影响,调查海区表层 TSP 浓度由近岸向远岸快速递减。在长江口及杭州湾等近岸海域,尽管营养盐浓度较高,但水体中 TSP 含量较高(部分站位可高达 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上),影响了海水浊度并造成海水水体透光性较差,进而限制了浮游植物光合作用的进行。而在离岸相对较远的舟山群岛附近海域,虽然水体营养盐浓度有所降低,但 TSP 含量较低,海水透光性好,宜于浮游植物的生长。因此,在调查海域的赤潮发生区,不仅需要有较高浓度的营养盐, TSP 含量也必须处于中等水平,可以为浮游植物的快速生长提供适宜的物质基础和光照条件。

3 结论

(1)调查海区整体上处于富营养化状态,营养盐浓度呈现明显的季节变化,表现为秋冬季节高于春夏季节,调查海区营养盐水平取决于营养盐补充和生物活动彼此之间的消长和平衡。

(2)营养盐平面分布特征主要表现为近岸高、外海低,沿岸方向向离岸方向逐渐降低,调查区域终年存在 1 个以长江口和杭州湾为中心的营养盐高值区。

(3)海水中溶解 DIN 、 SiO_3^{2-} -Si 和 PO_4^{3-} -P 主要来源于长江冲淡水等陆源输入,在夏、秋季节,台湾暖流对调查海区 PO_4^{3-} -P 存在明显的补充。

(4)调查海区赤潮发生区域主要集中在 TSP 含量处于中等水平,营养盐浓度相对较高、富营养化水平相对较重的区域。

参考文献:

- [1] 段水旺,章申,陈喜保,等. 长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 53 ~ 56.
- [2] 刘新成,沈焕庭,黄清辉. 长江入河口区生源要素的浓度变化及通量估算[J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(5): 332 ~ 340.
- [3] Edmond J M, Spivack A, Spivack B, *et al.* Chemical dynamics of the Changjiang estuary[J]. Continental Shelf Research, 1985, **4**: 17 ~ 36.
- [4] 钟霞芸,杨鸿山,赵立清,等. 长江口水域氮、磷的变化及其影响[J]. 中国水产科学, 1999, **6**(5): 6 ~ 9.
- [5] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报[M]. 北京: 海洋出版社, 1999 ~ 2005.
- [6] 周名江,朱明远,张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. 生命科学, 2001, **13**(2): 54 ~ 60.
- [7] 苏纪兰. 中国的赤潮研究[J]. 中国科学院院刊, 2001, **5**: 339 ~ 342.
- [8] Hodgkiss I J. Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide bloom[J]. Hydrobiologia, 1997, **852**: 141 ~ 147.
- [9] 焦念志,王荣,李超伦. 东海春季初级生产力与新生生产力的研究[J]. 海洋与湖沼, 1998, **29**(2): 135 ~ 140.
- [10] 刘兴泉. 东海 PN 断面夏季温盐及化学要素的分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2001, **32**(2): 204 ~ 212.
- [11] Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M. Methods of seawater analysis [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 1999. 203 ~ 223.
- [12] 沈志良. 长江口海区理化环境对初级生产力的影响[J]. 海洋湖沼通报, 1993, **1**: 47 ~ 51.
- [13] 石晓勇,王修林,韩秀荣,等. 长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1086 ~ 1092.
- [14] 郑元甲,陈雪忠,程家骅,等. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003. 78 ~ 115.
- [15] 阎玲,李锦蓉. 大鹏湾盐田海域环境因子变化与赤潮生物相互关系研究[J]. 海洋通报, 1993, **12**(2): 7 ~ 12.
- [16] 邹景忠,吴玉霖,洪君超,等. 中国沿海赤潮[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 104 ~ 207.
- [17] 国家环保局. 海水水质标准(GB 3097-1997)[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [18] 戚晓红,刘素美,张经,等. 东海赤潮高发区沉积物中营养盐再生速率的研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1112 ~ 1116.
- [19] 赵保仁,任广法,曹德明,等. 长江口上升流海区的生态环境特征[J]. 海洋与湖沼, 2001, **32**(3): 327 ~ 333.
- [20] 沈志良,刘群,张淑美,等. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素[J]. 海洋与湖沼, 2001, **32**(5): 465 ~ 473.
- [21] Zhang J. Nutrient elements in large Chinese estuaries [J]. Continental Shelf Research, 1996, **16**: 1023 ~ 1045.
- [22] 孟伟,秦延文,郑丙辉,等. 长江口水体中氮、磷含量及其化学耗氧量的分析[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 65 ~ 68.
- [23] 王保栋,战闰,藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径[J]. 海洋学报, 2002, **24**(1): 53 ~ 58.
- [24] Chung S W, Jan S, Liu K K. Nutrient fluxes through the Taiwan Strait in spring and summer, 1999[J]. Journal of Oceanography, 2001, **1**(57): 47 ~ 53.
- [25] 刘子琳,宁修仁,蔡昱明. 杭州湾-舟山渔场秋季浮游植物现存量 and 初级生产力[J]. 海洋学报, 2001, **23**(2): 93 ~ 99.