

## 2002 年春、夏季东海赤潮高发区营养盐结构 及分布特征的比较\*

王修林 孙霞 韩秀荣 祝陈坚 张传松 辛宇 石晓勇

(中国海洋大学化学化工学院 青岛 266003)

**提要** 2002 年 8 月 26 日—9 月 4 日在东海赤潮高发区(29°00′—32°00′N、122°00′—123°30′E)进行了夏季航次的调查,利用春、夏季东海赤潮高发区的调查数据,系统分析比较了其营养盐结构和分布特征,并初步探讨了夏季爆发的中肋骨条藻赤潮与营养盐的关系。与 2002 年春季相比,2002 年夏季调查海区中  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DON 和 PN 平均浓度比春季有所增加,而  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DOP 和 PP 浓度则有所减小。夏季各种形态磷营养盐主要由  $\text{PO}_4\text{-P}$  和 PP 组成,其中  $\text{PO}_4\text{-P}$  比春季明显增加,PP 略有减少,DOP 显著减少;各种氮形态营养盐主要由 DIN 和 DON 组成,与春季相比 DON 比例略有增加,DIN 略有减少。DIN 仍以  $\text{NO}_3\text{-N}$  为主并有所增加,而  $\text{NH}_4\text{-N}$  比例基本不变, $\text{NO}_2\text{-N}$  有所减少。主要溶解无机态营养盐,如  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,以及 PP 的平面分布整体上呈沿岸海域浓度高、外海浓度低的趋势,等值线与海岸线平行的趋势已减弱,甚至消失。 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  具有明显的水团分布特征,与春季有所不同;DON 和 PN 与春季具有相同的斑点状分布趋势。另外,本航次调查中在 11 站发现中肋骨条藻赤潮,该站表层  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度较高, $\text{PO}_4\text{-P}$  很低,其余溶解态氮营养盐及 PP 与调查海区表层平均浓度接近,PN 较高。营养盐结构中 11 站表层颗粒态比例高于调查海区表层平均比例,溶解态比例低于后者。

**关键词** 东海,赤潮高发区,营养盐,夏季

**中图分类号** P734.2

自 20 世纪 80 年代,随着富营养化程度的不断加剧(郭卫东等,1998;沈志良等,2001,2003a,b;Paerl,1997),东海近海海域,尤其是长江口和舟山渔场附近海区已成为我国典型的赤潮高发区(洪君超等,1989;徐初等,1994;缪锦来等,2002)。近年来,尽管我国海洋环境监测等部门加强了东海近海海域赤潮发生的现场监测(徐初等,1994;国家海洋局,2001—2003<sup>1)</sup>;国家海洋局,2001—2003<sup>2)</sup>),但并没有对东海近海海域主要形态营养盐分布、结构组成等进行系统调查。这不仅无法

深入了解东海近海海域富营养化程度,如主要营养盐浓度、分布和结构组成等与赤潮发生范围、规模和频率等之间的内在联系,同时也在很大程度上制约了有害赤潮防治和预测方法的研究(周名江等,2001;缪锦来等,2002),为此,作者根据 2002 年春、夏季东海赤潮高发区的调查数据,系统分析比较了调查海域营养盐结构和分布特征等,并初步探讨了夏季爆发的中肋骨条藻赤潮与营养盐的关系,为有害赤潮发生机制研究提供基础调查资料。

\* 国家重点基础研究发展规划项目,2001CB409703 和 2002CB714008 号;国家自然科学基金项目,40136020 和 40376033 号;教育部科学技术研究重点项目,01110 号;山东省自然科学基金项目,L2000E01 号;教育部博士点基金项目,20020423006 号;国家科技攻关计划资助项目,2002BA904B06 号。王修林,教授,E-mail:xlwang@mail.ouc.edu.cn

1) 国家海洋局,2001—2003. 中国海洋环境质量公报

2) 国家海洋局,2001—2003. 中国海洋灾害公报

收稿日期:2002-10-05,收修改稿日期:2003-12-24

### 1 海上调查与营养盐分析

2002年8月26日—9月4日在东海近海海域赤潮高发区(29°00'—32°00'N, 122°00'—123°30'E)进行夏季航次营养盐调查,调查海区共设7个断面27个大面站(图1)。调查中使用20L Niskin 采水器分别采集表层、中层和底层海水,其中表层是海面以下1m处,中层指叶绿素跃层或温盐跃层或半水深水层,底层是海底以上2m处。样品采集后立即经GF/F滤膜(450℃烘3h)过滤,过滤水样和滤膜在-20℃下保存至分析。过滤水样用于溶解无机态营养盐(SiO<sub>3</sub>-Si、PO<sub>4</sub>-P、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N和NH<sub>4</sub>-N)、总溶解氮(DTN)和总溶解磷(DTP)分析,滤膜用于颗粒氮(PN)和颗粒磷(PP)分析(Grasshoff *et al.*, 1999)。

样品解冻后,采用Technicon AAII营养盐自动分析仪测定溶解无机态营养盐(Fiz F Pérez *et al.*, 1998),测量精度分别是SiO<sub>3</sub>-Si 99.1%、PO<sub>4</sub>-P 98.0%、NO<sub>2</sub>-N 99.1%、NO<sub>3</sub>-N 99.4%、NH<sub>4</sub>-N 99.7%;采用碱性过硫酸钾法氧化海水和膜样品(Pujo-Pay *et al.*, 1994; Grasshoff *et al.*, 1999),然后使用Technicon AAII营养盐自动分析仪测定DTN、DTP、PN和PP,测量精度分别是DTN 98.9%、DTP 96.3%、PN 98.9%、PP 96.3%。氧化过程中分别以EDTA(Grasshoff *et al.*, 1999)和5'腺苷-磷酸

(AMP)(谭加强等,2001)作为有机氮和有机磷标准,其回收率分别为90.0%和95.0%。根据上述测定结果可以估算溶解有机氮(DON)和磷(DOP)浓度(Grasshoff *et al.*, 1999)。

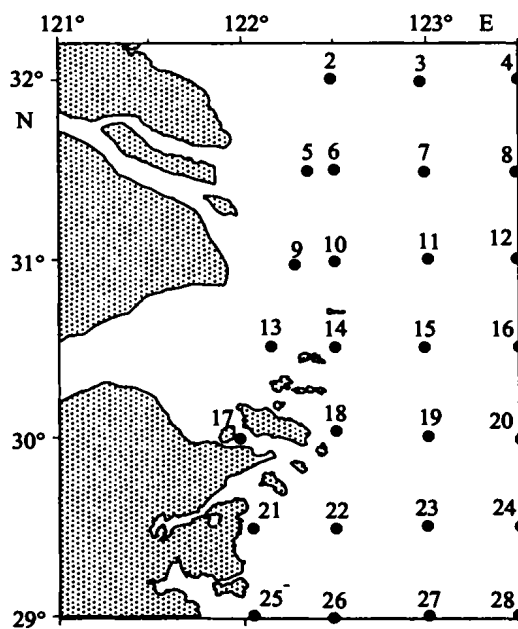


图1 2002年8月东海调查站位分布

Fig.1 Site map in the East China Sea in Aug. 2002

### 2 结果与讨论

#### 2.1 营养盐平均浓度和变化范围

表1 2002年夏季东海近海海域营养盐平均浓度和浓度范围(μmol/dm<sup>3</sup>)

Tab.1 The concentration range and average(μmol/dm<sup>3</sup>) of macronutrients in the East China Sea inshore area in summer 2002

营养盐	表层		中层		底层		调查海区 (± S.D.)
	平均值 (± S.D.)	范围	平均值 (± S.D.)	范围	平均值 (± S.D.)	范围	
SiO <sub>3</sub> -Si	12.89 ± 14.93	0.73—46.87	14.25 ± 14.99	0.99—54.30	17.31 ± 9.48	3.39—40.75	14.83 ± 13.33
PO <sub>4</sub> -P	0.47 ± 0.24	0.25—1.15	0.54 ± 0.22	0.34—1.15	0.76 ± 0.29	0.34—1.23	0.59 ± 0.28
NO <sub>3</sub> -N	16.06 ± 15.66	0.10—53.10	12.43 ± 12.62	0.96—42.89	14.09 ± 9.07	5.62—41.14	14.35 ± 12.55
NO <sub>2</sub> -N	0.94 ± 0.38	0.21—1.62	1.14 ± 0.43	0.38—2.66	1.15 ± 0.34	0.53—1.94	1.07 ± 0.39
NH <sub>4</sub> -N	2.76 ± 1.56	0.79—7.12	2.45 ± 1.55	1.01—8.01	2.62 ± 2.53	0.32—12.49	2.61 ± 1.92
DON	20.86 ± 6.14	6.45—41.32	19.15 ± 5.29	6.03—26.54	19.39 ± 8.20	1.21—48.83	19.80 ± 6.64
PP	0.39 ± 0.47	0.05—2.55	0.42 ± 0.76	0.05—3.07	0.95 ± 1.50	0.10—5.10	0.59 ± 1.03
PN	4.59 ± 3.26	0.56—17.46	4.05 ± 2.81	0.88—11.64	6.58 ± 8.00	0.98—33.82	5.09 ± 5.32
DIN/PO <sub>4</sub> -P	38.66 ± 28.64	4.91—94.97	28.79 ± 17.55	6.98—62.00	26.70 ± 14.10	8.73—56.52	31.60 ± 21.49
PN/PP	16.78 ± 9.04	1.80—40.25	18.38 ± 11.10	3.31—58.83	10.59 ± 4.17	2.98—20.56	15.21 ± 9.11

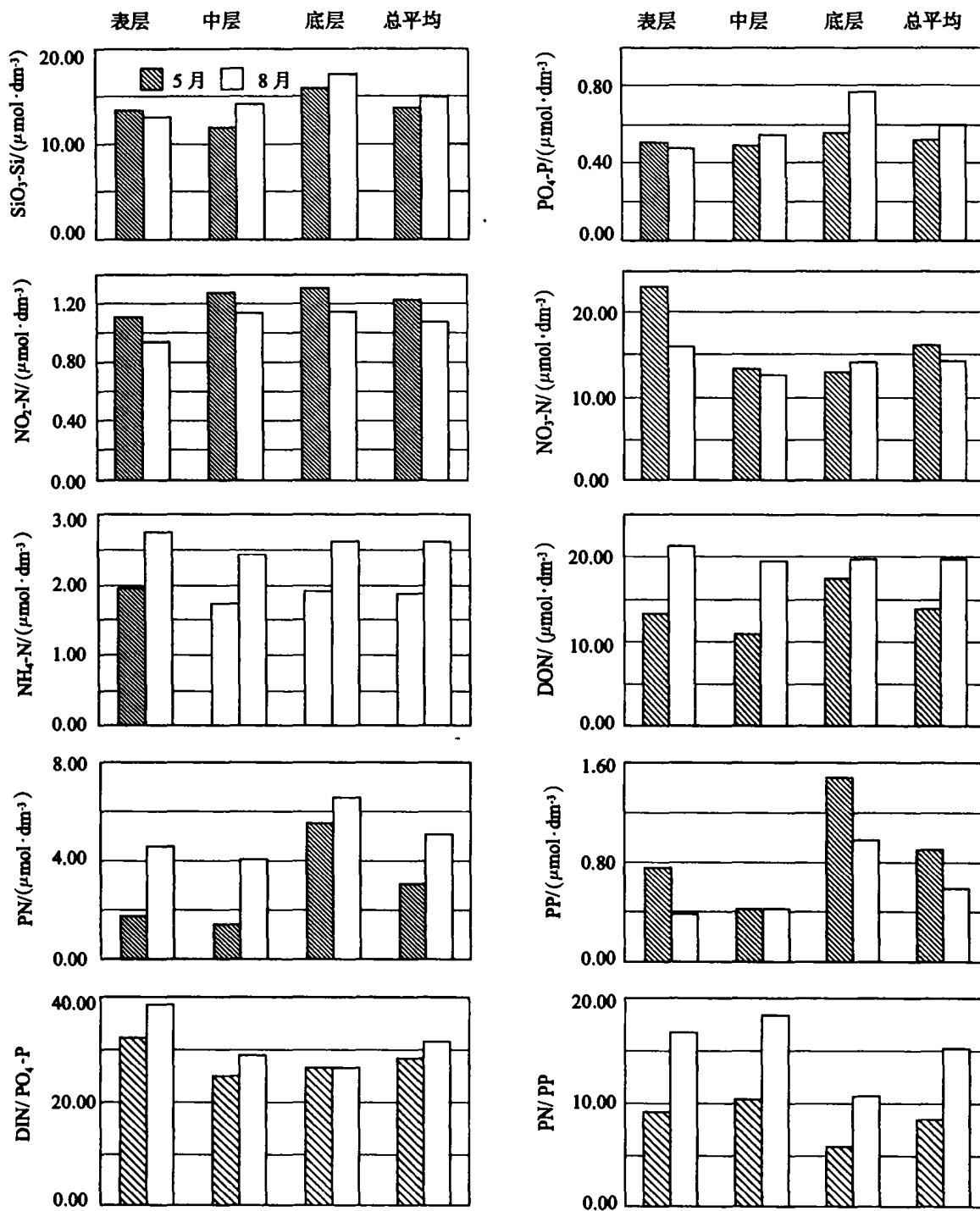


图 2 2002 年春、夏季调查海区各形态营养盐平均浓度的比较

Fig.2 Comparison of macronutrient concentrations between spring and summer in 2002

表 1 表示 2002 年夏季调查海域各种形态营养盐的平均浓度和变化范围等。2002 年 4—5 月期间在该调查海域发生了两次规模较大的赤潮, 在赤潮发生前曾于 2002 年 4 月 25 日—5 月 2 日在同一海域进行了同样内容的春季航次海上调查

(韩秀荣等, 2003)。与 2002 年春季调查结果比较 (图 2) 表明, 2002 年夏季在整个调查海区中 SiO<sub>3</sub>-Si 的平均浓度为  $(14.83 \pm 13.33) \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季高 8%, 变化范围为  $0.73\text{—}54.30 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 大于春季; PO<sub>4</sub>-P 为  $(0.59 \pm 0.28) \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1),

比春季高 13%, 变化范围为  $0.25\text{--}1.23\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比春季大。 $\text{NO}_3\text{-N}$  为  $(14.35 \pm 12.55)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季低 11%, 变化范围为  $0.10\text{--}53.10\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 与春季基本相同; $\text{NO}_2\text{-N}$  为  $(1.07 \pm 0.39)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季低 13%, 变化范围为  $0.21\text{--}2.66\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 大于春季; $\text{NH}_4\text{-N}$  平均浓度为  $(2.61 \pm 1.92)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季高 39%, 变化范围为  $0.32\text{--}12.49\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 大于春季, 尤其最大值是春季的 3 倍多; DOP 平均浓度低于检出限 ( $0.01\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ), 说明夏季浓度远远低于春季; DON 为  $(19.80 \pm 6.64)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季高 45%, 变化范围为  $1.21\text{--}48.83\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 均比春季小, 其中最大浓度也仅为春季的 2/3 左右; PP 为  $(0.59 \pm 1.03)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季低 34%, 变化范围为  $0.05\text{--}5.10\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比春季小; PN 为  $(5.09 \pm 5.32)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季高 63%, 变化范围为  $0.56\text{--}33.82\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比春季小, 最大值是春季的 63%。此外,  $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  平均值为  $(31.60 \pm 21.49)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季高 11%, 变化范围为  $4.91\text{--}94.97\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 与春季相似;  $\text{PN}/\text{PP}$  为  $(15.21 \pm 9.11)\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  (表 1), 比春季高 83%, 变化范围为  $1.80\text{--}58.83\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 均比春季高, 最大值是春季的 2.5 倍。

进一步分析表明, 夏季  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  平均浓度垂直变化规律基本相同, 由表层、中层到底层逐渐增大, 其中表层平均浓度比春季略低, 而中层和底层略高于春季。夏季  $\text{NO}_2\text{-N}$  与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  具有同样的变化规律, 但与前两者相比增加趋势趋缓, 且各层平均浓度比春季低  $0.15\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  左右。与春季变化趋势有所不同, 夏季各层  $\text{NO}_3\text{-N}$  平均

浓度比较接近, 表层略高, 中层略低, 其中表层平均浓度比春季低约 1/3, 中层略低 6%, 而底层略高 9%。夏季  $\text{NH}_4\text{-N}$  变化趋势与  $\text{NO}_3\text{-N}$  一致, 但各层均比春季高约  $0.7\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。夏季各层 DON 平均浓度均为  $20\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  左右, 表层略高, 中层略低, 表、中和底层分别比春季高 60%、79% 和 13%。夏季各层 DOP 平均浓度均低于检测限, 比春季明显减小。与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  垂直变化规律基本相同, 夏季 PP 由表层到底层呈逐渐增加的趋势, 其中中层比春季仅高 2%, 而表层和底层明显比春季低 47% 和 36%。与 PP 变化规律不同, 夏季 PN 底层浓度最高, 中层最低, 均明显高于春季, 其中表、中和底层分别是春季的 2.5、2.8 和 1.2 倍。此外, 与春季变化趋势基本相同, 夏季  $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  由表层到底层呈递减趋势, 其中表层和中层比春季略高, 底层与春季接近。夏季  $\text{PN}/\text{PP}$  中层最大, 底层最小, 与春季垂直变化趋势基本一致; 夏季各层浓度均为春季的 1.8 倍左右。

## 2.2 赤潮发生时表层营养盐特征

本次调查期间, 于 8 月 27 日经过 11 站时发现赤潮, 9 月初再次经过该站时发现赤潮已消失。与春季大面积赤潮不同 (韩秀荣等, 2003), 夏季的赤潮藻种只有中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*), 密度达  $10^7\text{cell}/\text{dm}^3$ , 叶绿素 *a* 浓度为  $24.205\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 是整个调查海区夏季的最高浓度值; 而春季航次该站叶绿素 *a* 浓度为  $9.082\mu\text{g}/\text{dm}^3$ , 即为整个调查海区春季的最高浓度值, 但并未出现水色异常。

表 2 为 11 站表层各营养盐浓度, 赤潮发生时  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  为  $34.94\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 接近调查海区表层 (下

表 2 2002 年夏季航次 11 站表层营养盐浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )

Tab.2 The surface layer concentrations ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ) of nutrient at station 11 in summer survey in 2002

营养盐	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	DON	PP	PN	$\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$
浓度	34.94	0.26	0.66	20.28	2.74	16.06	0.60	17.46	91.08

简称表层) 平均浓度的 3 倍;  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度为  $0.26\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 仅比调查海区最低浓度  $0.25\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  略高;  $\text{NO}_3\text{-N}$  为  $20.28\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比表层平均值略高;  $\text{NO}_2\text{-N}$  为  $0.66\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比表层平均值低 1/3;  $\text{NH}_4\text{-N}$  为  $2.74\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 与表层平均值接近; DON 为  $16.06\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比表层平均值略低; PN 为

$19.46\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 为表层最高浓度, 可认为赤潮发生时, 水体中大量的溶解氮转移为颗粒氮。PP 为  $0.60\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比表层平均值略高;  $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  为 91.08, 接近调查海区最高值 94.97; 说明该站位浮游植物的生长受到  $\text{PO}_4\text{-P}$  的限制。

表 3 2002 年春、夏季调查海区各形态营养盐结构比较(%)

Tab.3 Comparison of nutrient concentrations between spring and summer in 2002 (%)

营养盐形态	春 季				夏 季				
	表层	中层	底层	总平均	表层	中层	底层	总平均	
P	PO <sub>4</sub> -P	48 ± 17	55 ± 16	38 ± 18	47 ± 18	60 ± 16	68 ± 17	61 ± 25	63 ± 20
	DOP	12 ± 7	16 ± 9	15 ± 11	14 ± 9	—	—	—	—
	PP	40 ± 19	29 ± 18	47 ± 26	39 ± 22	40 ± 16	32 ± 17	39 ± 25	37 ± 20
N	DIN	45 ± 23	45 ± 20	44 ± 14	44 ± 19	37 ± 23	37 ± 18	41 ± 13	39 ± 18
	DON	44 ± 19	46 ± 20	44 ± 18	45 ± 19	52 ± 21	53 ± 19	47 ± 16	50 ± 19
	PN	11 ± 7	9 ± 6	12 ± 9	11 ± 7	11 ± 7	10 ± 4	12 ± 8	11 ± 6
DIN	NO <sub>2</sub> -N	17 ± 15	19 ± 15	12 ± 9	16 ± 13	12 ± 12	12 ± 8	8 ± 4	11 ± 9
	NO <sub>3</sub> -N	55 ± 40	56 ± 34	71 ± 20	61 ± 33	59 ± 34	64 ± 24	76 ± 15	66 ± 26
	NH <sub>4</sub> -N	28 ± 25	25 ± 20	17 ± 12	23 ± 20	29 ± 24	24 ± 18	16 ± 14	23 ± 20

### 2.3 营养盐结构

表 3 表示 2002 年夏季调查海区各种形态磷、氮及无机氮营养盐结构组成。由表 3 可以看出,就整个调查海区而言,磷营养盐主要由 PO<sub>4</sub>-P 和 PP 组成,分别占总平均值的 (63 ± 20)% 和 (37 ± 20)% ,与春季相比 PO<sub>4</sub>-P 有明显增加,PP 略有减少,而 DOP 比例趋近 0,这与春季 DOP 比例高达 14% 有明显不同。夏季表层、底层 PO<sub>4</sub>-P 比例比中层略小,分别为 (60 ± 16)%、(61 ± 25)% 和 (68 ± 17)% ,春季则具有中层最高,底层最低的趋势。相反,夏季表层和底层 PP 比例略大,分别为 (40 ± 16)% 和 (39 ± 25)% ,中层仅为 (32 ± 17)% ,春季则具有中层最低,底层最高的趋势。氮营养盐主要由 DON 和 DIN 组成,分别占总平均值的 (50 ± 19)% 和 (39 ± 18)% ,而 PN 仅占 (11 ± 6)% ,这与春季 DON 和 DIN 均在 44% 左右有差别。夏季表、中层 DIN 比例比底层略小,分别为 (37 ± 23)%、(37 ± 19)% 和 (41 ± 13)% ,春季各层均在 44% 左右。与 DIN 基本相反,夏季 DON 具有表层

和表层比例接近、底层略低的特点,分别为 (52 ± 21)%、(53 ± 19)% 和 (47 ± 16)% ,春季则呈中层略高,表层居中,底层略低的趋势。此外,夏季各层 PN 比例基本一致,表层为 (11 ± 7)% ,中层略高为 (10 ± 4)% ,底层略低为 (12 ± 8)% ,与春季变化规律相同。DIN 组成与春季基本相同,NO<sub>3</sub>-N 比例最大高达 (66 ± 26)% ,比春季略有增大;NH<sub>4</sub>-N 次之占 (23 ± 20)% ,与春季一致;NO<sub>2</sub>-N 最少占 (11 ± 9)% ,比春季略有减少。就垂直变化而言,夏季 NO<sub>3</sub>-N 具有由表层到底层增加的趋势,分别为 (59 ± 34)%、(64 ± 24)% 和 (76 ± 15)% ,与春季类似。夏季 NH<sub>4</sub>-N 由表层到底层比例逐渐减小,分别为 (29 ± 24)%、(24 ± 18)% 和 (16 ± 14)% ,与春季一致;夏季 NO<sub>2</sub>-N 表层和中层分别为 (12 ± 12)% 和 (12 ± 8)% ,比底层 (8 ± 4)% 略大,而春季中层最大,底层最低。

图 3 为赤潮发生时 11 站表层的各种形态磷、氮及无机氮营养盐结构组成。磷营养盐仍由 PO<sub>4</sub>-P 和 PP 组成,与夏季调查海区表层磷结构组成

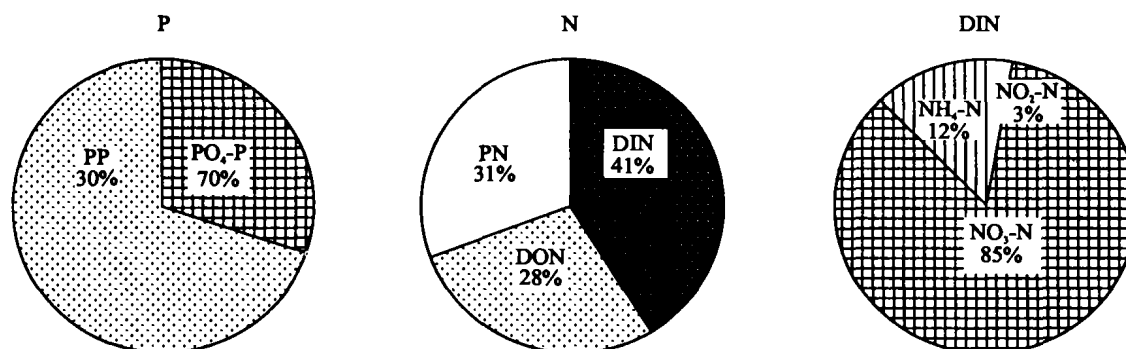


图 3 11 站氮、磷及无机氮表层营养盐结构

Fig.3 The surface layer structure of N, P and DIN at station 11

(表3)不同的是该处以PP为主,比例高达70%,比表层平均值增大近1倍;PO<sub>4</sub>-P只有30%,为表层平均值的50%。颗粒态比例增加和溶解态减少说明中肋骨条藻的大量繁殖把水中溶解态PO<sub>4</sub>-P转化为颗粒态。与磷相同,氮颗粒态比例也增加,达到31%,为表层平均值的3倍;DON为28%,为表层平均值的50%;DIN为41%,比例不变。进一步分析,DIN中NO<sub>2</sub>-N占3%,比表层平均值减少近10个百分点;NH<sub>4</sub>-N占12%,是表层平均值的40%;NO<sub>3</sub>-N为主要DIN组分,高达85%,是表层平均值的1.4倍。

### 2.4 平面分布特征

图4表示夏季调查海区表、中和底层各种形态营养盐平面分布。由图4可以看出,夏季SiO<sub>3</sub>-Si表层和底层平面分布与春季(韩秀荣等,2003)

基本相似,主要表现为近岸浓度高、远岸低的特点,但底层略有不同。具体而言,表层SiO<sub>3</sub>-Si最高值出现在杭州湾湾口(大于45μmol/dm<sup>3</sup>),等值线在此向东北方形成单舌形延伸,并在31°N,123°E处出现次高值中心,与夏季中肋骨条藻赤潮发生处吻合;中层最高值出现在长江口和杭州湾之间(31°N,122°15'E附近,大于50μmol/dm<sup>3</sup>),近岸舌型等值线向东北方延伸,远岸30.5°N以南向东南方延伸;底层高值区与中层基本相同,但水团的斑点状分布相对表层和中层明显。总之,SiO<sub>3</sub>-Si高值区由表层至底层整体向北偏移,与春季的南移趋势恰好相反。此外,调查海区东南角为SiO<sub>3</sub>-Si低值区,而且与春季底层(小于10μmol/dm<sup>3</sup>)明显高于表层和中层(小于5μmol/dm<sup>3</sup>)有类似趋势。

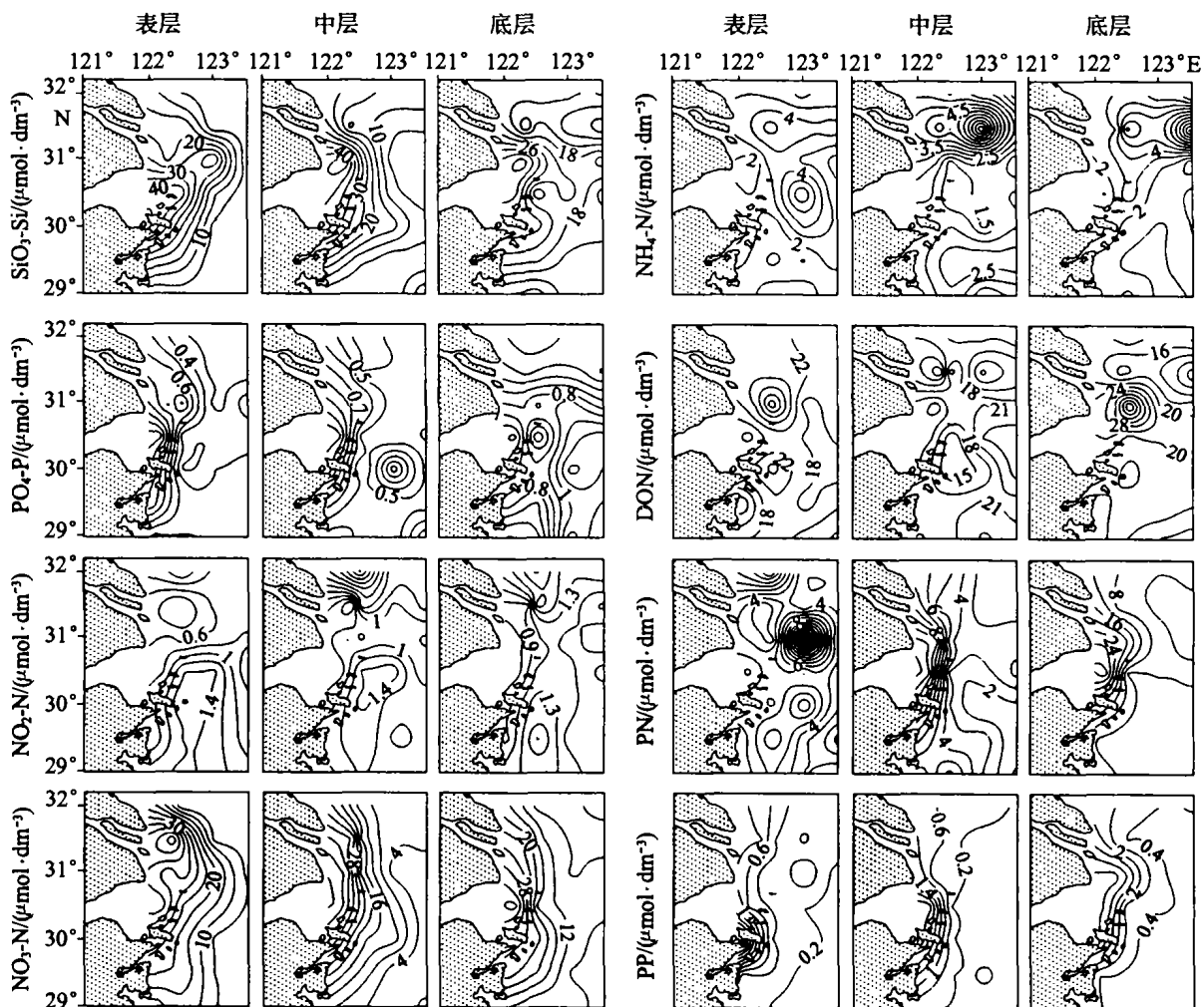


图4 夏季表层、中层和底层营养盐平面分布

Fig.4 Horizontal distributions of nutrient in the surface, middle and bottom layers in summer

夏季  $\text{PO}_4\text{-P}$  平面分布规律与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  基本类似,也表现为表层和底层近岸浓度高,远岸低的特点,但远岸处等值线与海岸线平行趋势相对较弱。杭州湾湾口表层、中层和底层均为  $\text{PO}_4\text{-P}$  高值区,大于  $1.1\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,而调查海区东北和西南海域为低值区,小于  $0.3\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,并且该低值区呈东北-西南走向,赤潮发生站位在此低值范围内。另一明显特征是中层在  $30^\circ\text{N}$ ,  $123^\circ\text{E}$  和  $29^\circ\text{N}$ ,  $123.5^\circ\text{E}$  附近出现次高值区,分别大于  $0.95$  和  $0.75\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。除杭州湾湾口  $\text{PO}_4\text{-P}$  高值区外,调查海区东南海域底层也存在一高值区,大于  $1.2\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,而且明显高于表层和底层。与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  相比,底层  $\text{PO}_4\text{-P}$  分布与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  基本相同,而表层和底层却与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  有较大差异。与  $\text{PO}_4\text{-P}$  类似,PP 平面分布具有由近岸向远岸浓度迅速降低、远岸区等值线与海岸线平行趋势相对春季较弱的特征。PP 高值区主要集中在杭州湾湾口,具有从表层到底层最高值逐渐增大的特点,分别大于  $1.4$ 、 $2.8$  和  $4.4\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,而且与春季高值区基本固定在杭州湾外  $30.5^\circ\text{N}$ ,  $122.2^\circ\text{E}$  附近相比,夏季高值区从表层到底层表现出由南向北扩展的趋势,表层在赤潮发生站位为次高值中心。此外,由于在整个调查海区 DOP 浓度均低于检测限,所以无法得到其平面分布。

$\text{NO}_3\text{-N}$  平面分布规律与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  基本相同,不仅表现为近岸浓度高、远岸浓度低的特点,而且从表层到底层,近岸高浓度  $\text{NO}_3\text{-N}$  水舌具有南移趋势,并且由表层明显的双舌状分布演变为向底层的典型单舌状分布。与春季相比,夏季等值线与海岸线平行趋势减弱,且中层高值区向杭州湾口偏移,而表层和底层高值区位置与春季接近。 $\text{NO}_2\text{-N}$  平面分布整体在调查海区南、北两侧存在两个相对独立的高值区,均大于  $1.4\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,而在近岸长江口和杭州湾口外侧为低值区,小于  $0.6\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,并且由表层到底层低值区范围向杭州湾口方向偏移。与春季近岸浓度低、远岸浓度高的分布趋势不同, $\text{NH}_4\text{-N}$  平面分布整体在长江口北门外侧  $31^\circ\text{N}$  以北、 $122^\circ\text{E}$  以西海域为高值区(大于  $3\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ),而在长江口与杭州湾口之间向东南方和南方存在一低值区(小于  $2\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ),与春季相比,夏季  $\text{NH}_4\text{-N}$  平面分布较春季简单。夏季调查海区 DON 以斑点状分布,与春季类似,表层和底层都具有两个高值中心,底层只有一个。

具体而言,春、夏季各层在长江口门外  $31^\circ\text{N}$ ,  $122.5^\circ\text{E}$  处均存在 DON 高值中心,不同的是夏季表层的次高值中心在  $30^\circ\text{N}$ ,  $122.5^\circ\text{E}$  附近,两个高值中心形成南北分布。夏季中层另一高值中心在  $30.5^\circ\text{N}$ ,  $123.5^\circ\text{E}$  处,二者形成东西分布,这与春季表层和底层高值斑点从长江口向东南方向延伸有所差别。夏季赤潮发生站位溶解态氮无明显分布特征。夏季 PN 平面分布与春季类似,表层具有明显的斑点状分布特征,中层和底层整体上具有由近岸向远海递减的趋势,即表层 PN 高值区以斑点状形成东北-西南走向分布,最高值在长江口南门外  $31^\circ\text{N}$ ,  $123^\circ\text{E}$  赤潮发生处,大于  $17\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,但与春季此处为东北-西南走向的低值分布有所差别;中层和底层在杭州湾湾口浓度最高,分别达  $12\mu\text{mol}/\text{dm}^3$  和  $32\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ,然后由岸边向外海逐渐降低至小于  $1\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。

### 3 结论

2002 年夏季调查海区的  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DON 和 PN 高于春季, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DOP 和 PP 低于春季。其中,磷营养盐以溶解无机态为主,其次是颗粒态,而溶解有机态减少至低于检出限。氮营养盐中溶解有机氮占半数比例,其次是溶解无机氮,颗粒氮最少。夏季  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  和 PP 的平面分布仍为近岸河口区高,外海低,等值线与海岸线平行性弱于春季,其余氮营养盐呈斑状分布。赤潮发生处, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、PN 浓度较高,出现次高值或高值中心, $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度较低,其余溶解态氮营养盐及 PP 与调查海区表层平均浓度接近,其中各形态磷营养盐中 PP 为主要组分,与表层平均浓度相比其比例增大, $\text{PO}_4\text{-P}$  减少。氮营养盐的 PN 比例也增加,DON 减少,DIN 保持不变,但 DIN 中  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  明显减少, $\text{NO}_3\text{-N}$  增加。此外,该处 DIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$  较高,说明该处水体为磷限制。

**致谢** 本文中叶绿素数据和赤潮发生优势种分别由中国科学院南海海洋研究所周伟华及厦门大学高亚辉老师提供,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- 沈志良,刘群,张淑美等,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  
 沈志良,刘群,张淑美,2003a. 长江无机氮的分布变化和迁移. 海洋与湖沼,34(4):355—363  
 沈志良,刘群,张淑美,2003b. 长江无机氮的分布变化和迁移. 海洋与湖沼,34(6):577—585

- 周名江,朱明远,张 经,2001. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. 生命科学,13(2):53—59
- 洪君超,黄秀清,徐 韧等,1989. 长江口外及其邻近海区赤潮多发区的分析与探讨. 暨南大学学报(赤潮研究专刊),40—50
- 郭卫东,章小明,杨逸萍等,1998. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价. 台湾海峡,17(1):64—70
- 徐 韧,洪君超,王桂兰等,1994. 长江口及其邻近海域的赤潮现象. 海洋通报,13(5):25—29
- 韩秀荣,王修林,孙 霞等,2003. 东海海域营养盐结构与赤潮发生关系的研究. 应用生态学报,14(7):1097—1101
- 缪锦来,石红旗,李光友等,2002. 赤潮灾害的发展趋势、防治技术及其研究进展. 安全与环境学报,2(3):40—44
- 谭加强,于志刚,林桂炽等,2001. 过硫酸盐氧化法测定海水中溶解总磷. 青岛海洋大学学报,31(2),256—262
- Fiz F Pérez, Aida F Ríos, Carmen G Castro, 1998. Mixing analysis of nutrient, oxygen and dissolved inorganic carbon in the upper and middle North Atlantic ocean east of the Azores. Journal of Marine Systems, 16: 219—233
- Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M, 1999. Methods of Seawater Analysis. Third Edition. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 160—223
- Pujo-Pay M, Raimbault M, 1994. Improvement of the wet-oxidation procedure for simultaneous determination of particulate organic nitrogen and phosphorus collected on filters. Marine Ecology Progress Series, 105:203—207
- Paerl H W, 1997. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as "new" nitrogen and other nutrient sources. Limnol Oceanogr, 42(5): 1154—1165

## COMPARISON IN MACRONUTRIENT DISTRIBUTIONS AND COMPOSITION FOR HIGH FREQUENCY HAB OCCURRENCE AREAS IN EAST CHINA SEA BETWEEN SUMMER AND SPRING 2002

WANG Xiu-Lin, SUN Xia, HAN Xiu-Rong, ZHU Chen-Jian, ZHANG Chuan-Song, XIN Yu, SHI Xiao-Yong  
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266003)

**Abstract** In recent years, the Changjiang (Yangtze) River Estuary and the Zhoushan fishery area suffered frequently from HAB (Harmful Algal Bloom) damages in China. Although in-situ investigation of this field has been strengthened every year, systemic analysis of macronutrient distributions and nutrients composition is still insufficient, which stagnated the eutrophication remediation and government regulation for HAB prevention in the area. In this 10-day summer field survey (Aug. 25<sup>th</sup> to Sept. 4<sup>th</sup> 2002), the area, between 29°00'—32°00' N, 122°00'—123°30' E, was divided into 7 sections and 27 stations, each with 3 sampling layers (surface, middle and bottom). According to the data collected in spring (Apr. 26<sup>th</sup> to May 2<sup>nd</sup> 2002) and summer, the macronutrient distributions and compositions were compared, and the relationship between macronutrients and summer *Skeletonema costatum* HAB was analyzed in this paper.

In summer, the average concentrations of SiO<sub>3</sub>-Si, PO<sub>4</sub>-P, NO<sub>2</sub>-N and PP (Particle Phosphorus) in the 3 layers increased in a direction from surface to bottom; the concentrations of NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N and DON (Dissolved Organic Nitrogen) changed slightly; while concentration of PN (Particle Nitrogen) was the highest in the bottom and the lowest in the middle layer. Concentration of DOP (Dissolved Organic Phosphorus) was under the detection limit (0.01 μmol/dm<sup>3</sup>). The dominant forms of TP (Total Phosphorus, TP = PO<sub>4</sub>-P + DOP + PP) of the survey area were PO<sub>4</sub>-P and PP, (63 ± 20)% and (37 ± 20)% respectively, the main parts of TN (Total Nitrogen, TN = DIN + DON + PN; DIN = NO<sub>3</sub>-N + NO<sub>2</sub>-N + NH<sub>4</sub>-N) was DIN and DON, (50 ± 19)% and (39 ± 18)% respectively; the remainder, PN, was accounted for (11 ± 6)% only. NO<sub>3</sub>-N was the major component of DIN, occupying (66 ± 26)%; NH<sub>4</sub>-N and NO<sub>2</sub>-N, were (23 ± 20)% and (11 ± 9)% respectively, add up for small proportion of DIN. For such macronutrients as SiO<sub>3</sub>-Si, PO<sub>4</sub>-P, NO<sub>3</sub>-N, and PP, their horizontal distribution was characterized by concentration decrease from inshore areas to open sea, forming one or two ligulate contour lines near the Changjiang



River Estuary and the Hangzhou Bay; the distributions of  $\text{NO}_2\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  showed a clear watermass-intimated feature; the distributions of DON and PN were in patched pattern.

In spring, the concentration of  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , DON, PN and PP showed the highest value in the bottom and the lowest in the middle layers;  $\text{NO}_2\text{-N}$  concentration increased from the surface, middle to bottom layer; that of  $\text{NO}_3\text{-N}$  decreased from the surface to the bottom;  $\text{NH}_4\text{-N}$  had the highest concentration in the surface and the lowest in the middle. TP were made up by 3 forms:  $\text{PO}_4\text{-P}$  that was over half, and DOP and PP were relatively less in amount. DIN and DON were the main forms of TN with minor PN fraction.  $\text{NO}_3\text{-N}$  was the dominant form of DIN, with small  $\text{NO}_2\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  proportions. The macronutrient concentrations were higher inshore than offshore and the isolines were nearly paralleled to the coastline.

Comparing the main features between summer and spring, the average concentrations of  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , DON and PN showed a significant increase compared with those in spring, while  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ , DOP and PP showed decrease trends. In the composition of TP,  $\text{PO}_4\text{-P}$  was higher in summer than that in spring, DOP and PP were lower; DON was higher than that in spring, DIN was in opposite fashion, and PN was same to the spring in TN;  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NO}_2\text{-N}$  were higher and lower than correspondent one in the spring, and  $\text{NH}_4\text{-N}$  was about the same in DIN.

In this survey,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  in *Skeletonema costatum* bloom found at Station 11 was about three times the average concentration of the surface layer (ACSL), while  $\text{PO}_4\text{-P}$  was  $0.26\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , the lowest concentration in this survey. Conversely, PN being  $19.46\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , had the highest concentration in the surface, which was three times higher than ACSL. Other macronutrient concentrations, such as nitrate nutrients and PP, were close to the ACSL. Macronutrient constructions, percentage of that in particle states were higher than average proportions of the surface layer (APSL), while those in dissolved states were lower than APSL. PP was the main form of TP, up to 70%, doubled the APSL. The remaining 30% of TP was  $\text{PO}_4\text{-P}$ , comprising of a half APSL only. The three forms of TN, DIN, DON and PN, accounted for 41%, 28% and 31%, or three times, a half and equal to the APSL respectively.  $\text{NO}_3\text{-N}$  was still the dominant component of DIN, at 85%, nearly one and a half times of the APSL.  $\text{NO}_2\text{-N}$  accounting for only 3% and  $\text{NH}_4\text{-N}$  for 12%, were both lower than the APSL.

In the next several years more surveys will be taken in this sea area, combining with in-situ culture experiments, we hope to find the relationship between eutrophication, macronutrients and the scope, scale, intensity of HAB.

**Key words** East China Sea, High frequency HAB occurrence areas, Macronutrients