

东海北部营养盐分布的季节变化及成因探讨

张建平, 康建成, 任惠茹, 李卫江, 谢小进

(上海师范大学 城市生态与环境研究中心, 上海 200234)

摘要: 基于美国国家海洋大气管理局(NOAA) 2007年发布的全球海域营养盐数据库资料和美国国家地球物理数据中心(NGDC) 2006年发布的全球地貌数据库资料, 在MATLAB计算机平台上, 利用研发的数值分析与成图技术, 对东海北部海域营养盐分布的季节变化特征进行分析。结果表明:(1) 东海北部海域 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P分布总特征为由沿岸向离岸递减, 由表层向底层递增; 西北高, 东南低, 呈扇形向东南扩展; SiO_3^- -Si有两个浓度高值区, 一个为研究区域的西北角, 另一个在东北角;(2) 在0~50 m的表层营养盐平均浓度均是冬季最高; 50~200 m的中层 NO_3^- -N、 SiO_3^- -Si夏季最高; 200 m以下的底层四季变化微弱, 其中400~500 m层 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si浓度值秋季最高。 NO_3^- -N变异系数表层最大, PO_4^{3-} -P中层最大、 SiO_3^- -Si底层最大, 其中 NO_3^- -N相应各层变异系数大于 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si;(3) 研究区域四季均存在高营养盐水团。高 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si水团中心分别位于 125.5°E 、 30.5°N 和 128.5°E 、 30.5°N ; 高 NO_3^- -N水团中心, 随冬-春-夏-秋、从南往东北再向西、最后向东南, 在 $125^\circ\sim 128^\circ\text{E}$ 、 $29^\circ\sim 31^\circ\text{N}$ 范围内移动。

关键词: 东海北部; 硝酸盐(NO_3^- -N); 磷酸盐(PO_4^{3-} -P); 硅酸盐(SiO_3^- -Si); 高营养盐水团
中图分类号: P734 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2010)01-0035-09

营养盐是海洋生态系统的生源物质, 是海洋初级生产力最重要的影响因子^[1-5], 是研究海洋生态系统的关键要素^[6-7]。海洋化学中, 把N、P、Si元素的盐类作为主要的海洋营养盐^[8]。东海北部海域($29^\circ\sim 33^\circ\text{N}$, $122^\circ\sim 130^\circ\text{E}$)自西北向东南依次是内陆架, 外大陆架, 冲绳海槽北端, 岛坡等地貌类型。水深从西北的大约45 m增至东南的1 000 m。该海域是台湾东北海域的海流、台湾暖流、长江冲淡水、黄海低盐水、西朝鲜沿岸流等多股海流的集散区, 也是黑潮高温高盐水的交汇地, 不同来源的水系在此汇聚、相互作用以及它们自身的变化造成了研究区域复杂的水文环境和不断变化的水化学特征^[9-11], 长期以来倍受海洋和渔业研究的关注。

前人利用黄海、东海海域大范围、大尺度的航测调查资料分析得出营养盐整体上的分布规律, 由近岸向远岸浓度递减, 自表层向底层浓度递增^[10-13]。一些学者研究了该海域营养盐的来源与输送机制, 提出了河流输入、沉积物-海水界面交换、大气沉降等主要输入输送机制^[4, 16-20]。受资料限制, 前人对该海域逐深度的营养盐分布研究较少, 营养盐的四季时空分布特征尚不清楚。作者利用多年季节平均的国际数据库资料, 逐层研究东海北部海域 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si等营养盐的分布特征和季节变化规律, 探讨其成因, 为进一步了解东海北部海洋生态系统的变化机理奠定基础, 为渔业生产提供指导。

1 资料来源与数据处理

1.1 数据来源

利用美国国家海洋大气管理局(NOAA) 2007年发布的 $1^\circ\times 1^\circ$ 全球海域营养盐多年月季平均数据

库(World Ocean Atlas 2005 (WOA05))及美国国家地球物理数据中心(NGDC)2006年6月发布的 $2'\times 2'$ 全球地貌数据库。

1.2 数据处理与分析

从NGDC全球地貌数据库(ETOPO2v2)中选取相对较大范围的数据, 绘制研究区域地形图。选取NOAA营养盐数据库(WOA05_Nutrients)中多年季度平均数据库, 取经纬度 $28.5^\circ\sim 32.5^\circ\text{N}$, $123.5^\circ\sim 129.5^\circ\text{E}$, 深度0~500 m的资料; 选取代表性盐类: 硝酸盐(NO_3^- -N)、磷酸盐(PO_4^{3-} -P)、硅酸盐(SiO_3^- -Si)数据, 研究东海北部营养盐分布的季节变化特征。

在Matlab计算机平台上研发数值分析技术, 利用linear线性插值方法进行插值(精度为: $0.1^\circ\times 0.1^\circ$), 将营养盐资料与地形资料进行网格归一化处理, 去除岛区和海底地形的影响, 得到研究区域营养盐数据库; 研发三维成图技术, 绘制深度0~500 m各层营养盐分布图与纬度断面图; 提取各层营养盐浓度数据进行统计分析, 再结合断面与平面分布图逐层分析。选取代表层, 展示营养盐分布特征及成因。

收稿日期: 2009-06-16; 修回日期: 2009-10-20

基金项目: 上海市科学技术委员会攻关项目(062412049); 上海市教育委员会重点项目(082269); 上海市教委重点学科建设项目(J50402)

作者简介: 张建平(1983-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋生物地球化学, 电话: 021-64322274 E-mail: zjpbdtom.com; 康建成, 通信作者, E-mail: kangjc@126.com

2 结果与分析

2.1 各层营养盐的分布特征及其成因

依据营养盐垂直分布特征,即相对均匀的化学特性,可以将营养盐随深度的分布依次分为表层(0~50 m)、中层(50~200 m)和底层(200~500 m)3个层次,各个层次内部营养盐分布季节变化较小,仅

在浓度上从上到下递增。其中,表层浓度最低,垂直梯度小,但水平变化大,冬季营养盐浓度明显高于其它三季;中层浓度较高,夏季营养盐浓度高于其它三季;水平变化较小;底层浓度最高,垂直梯度最大,秋季营养盐浓度最高(图1)。下面依次分析各层 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si的时空分布特征。

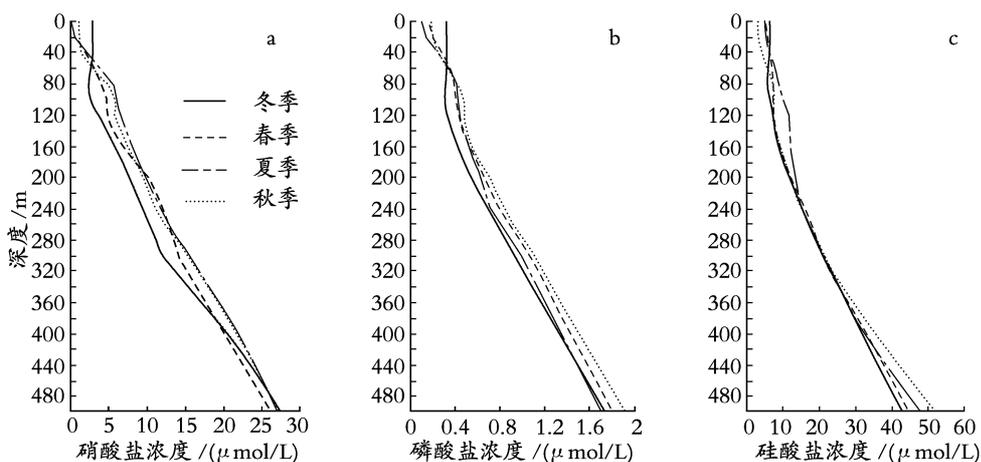


图1 营养盐浓度平均值随深度的四季变化

Fig. 1 Four seasons' average nutrient concentration changes with depth

2.1.1 硝酸盐的分布特征及其成因

表层 NO_3^- -N四季变化幅度大(图1a),变异系数均在0.6以上(表1,图2a);冬季浓度明显大于其他三季,如30 m层四季平均浓度($\mu\text{mol/L}$)从大到小依次为:冬(3.4634) > 春(1.842) > 夏(1.7916) > 秋(1.5757),这主要是因为冬季垂直交换强烈,把底层高营养盐水带到表层,而光合作用减弱,浮游植物生长繁殖衰退。前人在紧靠研究区域西部的东海赤潮高发区观测到营养盐平均浓度值秋季最大的现象^[21],这可能与东海赤潮高发区(赤潮高发期为4~8月^[22])秋季赤潮生物迅速减少,且沿岸河川入海径流秋季远大于冬季有关。 NO_3^- -N含量最大值均在研究区域的西北角,并且等值线梯度很大,呈扇形向东南方向扩展,这主要是长江冲淡水、苏北沿岸水和黄海低盐水的贡献。表层 NO_3^- -N浓度分布表明,除冬季外,其它三季均有低营养盐的黑潮水入侵海北部陆架(50 m以浅)。

中层 NO_3^- -N浓度高于表层,四季变化幅度稍小于表层。其中,夏季浓度最高、冬季最低,以100 m层为例,四季平均浓度由大到小依次为:夏(6.3037) > 秋(6.0551) > 春(4.981) > 冬(2.934)。因为夏季海

水层结稳定,底层高营养盐水涌升到该层,由于跃层的存在,阻碍底层海水继续上升,底层高营养盐无法补充到表层,而是大量滞留在中层,冬季反之,滞留在中层的营养盐甚少。该层 NO_3^- -N等值线也是从西北向东南递减扩展。中层属于过渡层,垂直梯度与水平梯度均位于表层和底层之间。50~100 m四季均在 129°E 、 30°N 附近出现低营养盐等值线拐点(图3),指示东海黑潮流出东海的路径。

底层营养盐分布趋于稳定,四季变化幅度小,各季变异系数均较表层、中层小。如500 m层,四季平均浓度为:冬(26.778) > 秋(26.562) > 夏(26.437) > 春(25.578),呈相对均匀分布状态,极值和均值变化幅度微小,水平梯度则最小;底层垂直梯度则最大,如冬季平均浓度300 m层为11.991,400 m层剧增到20.168。营养盐水平浓度分布亦是西北高,东南低。

春、夏季30~75 m层存在明显的高 NO_3^- -N闭合等值线,分别以 125.5°E 、 30.5°N 和 127.5°E 、 30.5°N 为中心,春季到夏季自东往西移动,在30 m层尤其明显(图4)。

表 1 硝酸盐浓度统计结果

Tab. 1 Data statistics of nitrate

季节	硝酸盐浓度($\mu\text{mol/L}$)						
	深度(m)	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	样本数
冬季	0	0.374	8.018 5	3.312 7	2.147 7	0.648 3	34
	30	0.266 7	9.8	3.463 4	2.393 7	0.691 2	34
	50	0.267 3	9.9	3.187 7	2.105 2	0.660 4	31
	100	0.425 9	5.781 4	2.934	1.765 4	0.601 7	20
	200	0.891 9	14.9	7.873 1	5.070 3	0.644	12
	300	3.766 5	20.270 5	11.991	6.882 2	0.573 9	10
	500	16.667 4	33.765	26.778	6.565 3	0.245 2	7
春季	0	0	6.748 8	1.018 6	1.668 7	1.638 3	33
	30	0.001 3	6.083 9	1.842	1.666	0.904 5	33
	50	0.169 1	6.79	3.015 1	1.837 8	0.609 5	31
	100	0.690 8	7.933 3	4.981	2.515 3	0.505	18
	200	2.608 8	25	10.223	6.629 3	0.648 5	11
	300	7.464 9	20.890 6	13.895	5.975 9	0.430 1	8
	500	17.252 6	31.614 8	25.578	5.336 7	0.208 6	9
夏季	0	0.053 8	3.32	0.566 4	0.688 6	1.215 6	35
	30	0.093 4	7.343 1	1.791 6	2.202 6	1.229 4	35
	50	0.098 5	9	3.273 4	3.019 8	0.922 5	33
	100	0.319	10.908 3	6.303 7	3.651	0.579 2	19
	200	2.237 2	17.297	9.914 2	5.391 5	0.543 8	12
	300	4.607 3	25.094 4	15.346	7.792 3	0.507 8	10
	500	17.236 2	34.342 2	26.437	6.262 7	0.236 9	10
秋季	0	0.05	6.427 1	1.515 3	1.732 2	1.143 2	34
	30	0.121 2	6.281 8	1.575 7	1.755 5	1.114 1	34
	50	0.117 1	7.077	1.995 1	1.930 2	0.967 5	32
	100	0.643 5	12.878 8	6.055 1	3.821 7	0.631 2	21
	200	3.074 9	14.842 5	9.575 1	4.093 2	0.427 5	11
	300	6.521 5	21.503 4	15.178	5.788 7	0.381 4	9
	500	17.584	32.547 4	26.562	5.344 9	0.201 2	9

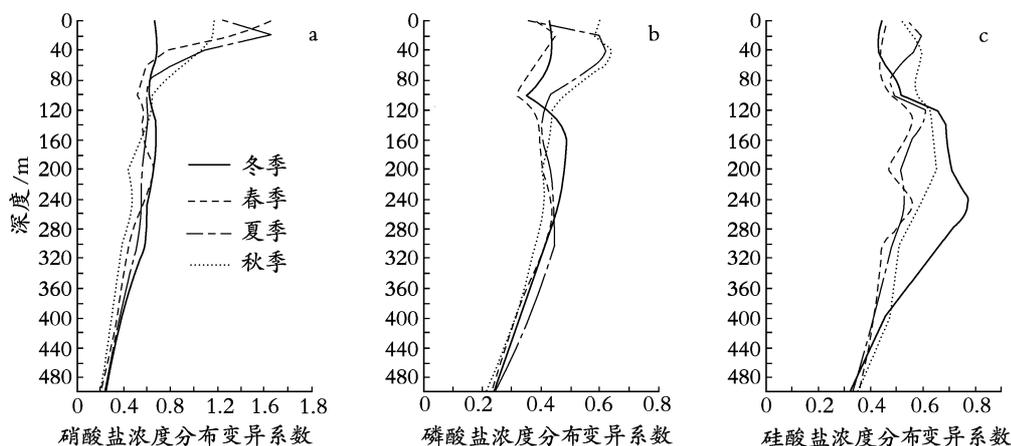


图 2 四季营养盐浓度变异系数随深度的变化

Fig. 2 Variation coefficient of seasons' nutrient concentration with depth

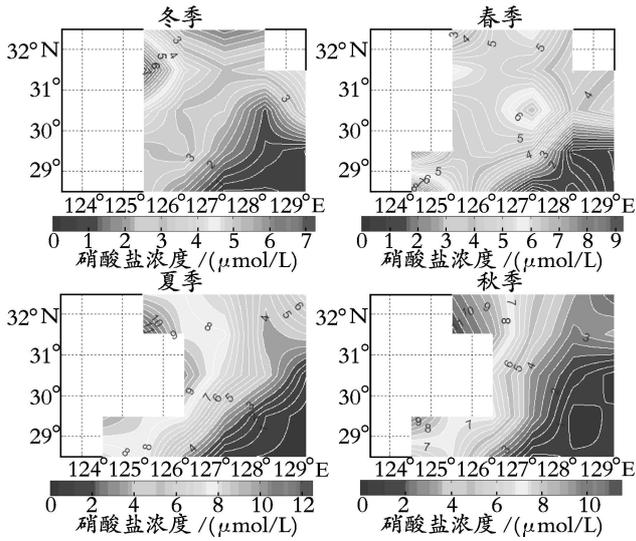


图 3 75 m 层四季硝酸盐浓度分布

Fig. 3 Distribution of Nitrate at 75 m with four seasons

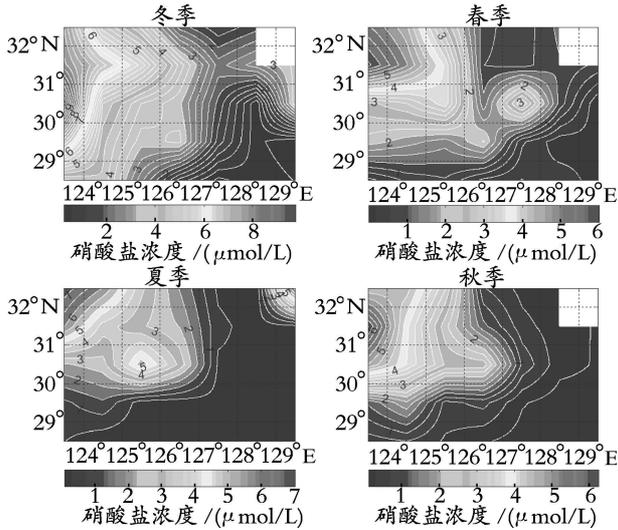


图 4 30 m 层四季硝酸盐浓度分布

Fig. 4 Distribution of Nitrate at 30 m with four seasons

2.1.2 磷酸盐的分布特征及其成因

磷酸盐与硝酸盐的分布及成因机制十分相近(图 1a、1b)。表层 PO_4^{3-} -P 浓度四季变化幅度相对 NO_3^- -N 小,但亦是冬季最高,以 30 m 层为例,四季 PO_4^{3-} -P 平均浓度($\mu\text{mol/L}$)值分布从大到小依次为:冬(0.317 3) \gt 春(0.242 7) \gt 秋(0.211 7) \gt 夏(0.188)。但 30 m 层以浅平均浓度秋季大于春季,这与东海浮游生物生长主要受 P 营养盐限制^[23]有关,春季浮游植物开始迅速增长, PO_4^{3-} -P 几乎被消耗殆尽,出现

P 测值为 0 的现象,秋季浮游植物生长速率迅速下降,减少了 P 营养盐的消耗。与 NO_3^- -N 一致, PO_4^{3-} -P 从表层至底层最大值均在西北部,浓度自西北向东南递减。表层 PO_4^{3-} -P 分布亦表明,除冬季外,其它三季均有低营养盐的黑潮水入侵东海北部陆架。

磷酸盐中层各季变异系数较表层大(图 2b、表 2),反映了中层浓度变化激烈。因为冬季垂直交换强烈,底层高营养盐水直接涌升到表层,在中层滞留的 PO_4^{3-} -P 极少,故中层冬季浓度明显低于其它三季,其它三季平均浓度非常接近,如 100 m 层四季分别为秋(0.466 2) \gt 夏(0.418 8) \gt 春(0.402 5) \gt 冬(0.292 8)。100 m 层以下平均浓度均是秋季最高。

底层 PO_4^{3-} -P 分布与 NO_3^- -N 相似,亦呈相对均匀分布,但四季变化幅度比 NO_3^- -N 小,相应各层变异系数约为 0.1;与 NO_3^- -N 分布相似,底层水平梯度很小,但垂直梯度较上层大。

研究区域冬季和春季有明显的高 PO_4^{3-} -P 闭合等值线,中心位置分别位于 125.5°E、30.5°N 和 128.5°E、30.5°N (图 5),前一中心与济州岛西南部冷涡中心位置重合^[24,25],后一中心可能是黑潮西侧一个锋面涡^[26]引起的高营养盐中心。

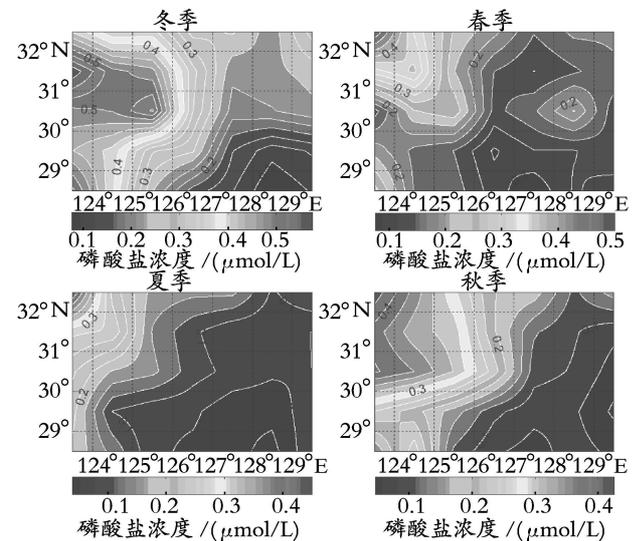


图 5 30 m 层四季磷酸盐浓度分布

Fig. 5 Distribution of Phosphate at 30 m with four seasons

表 2 磷酸盐浓度统计结果

Tab. 2 Data statistics of phosphate

季节	深度(m)	硝酸盐浓度($\mu\text{mol/L}$)					
		最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	样本数
冬季	0	0.088 5	0.662	0.312 3	0.138 3	0.442 8	35
	30	0.074 8	0.634 2	0.317 3	0.143 57	0.452 5	35
	50	0.076 1	0.640 9	0.310 2	0.137 07	0.441 8	33
	100	0.089 8	0.449 1	0.292 8	0.104 07	0.355 5	24
	200	0.179 6	0.913 8	0.524	0.260 36	0.496 8	13
	300	0.407 9	1.372 4	0.906 2	0.388 25	0.428 5	11
	500	1.172 7	2.416 1	1.697 4	0.404 8	0.238 5	11
春季	0	0.081 3	0.358 2	0.161 5	0.062 06	0.384 3	35
	30	0.083 8	0.553 6	0.242 7	0.108 64	0.447 7	35
	50	0.086 9	0.653 3	0.324 2	0.132 9	0.41	33
	100	0.151 4	0.577 4	0.402 5	0.127 05	0.315 6	24
	200	0.294 5	1.020 4	0.650 5	0.270 34	0.415 6	13
	300	0.500 4	1.551 3	1.047 2	0.449 4	0.429 2	10
	500	1.048	2.300 9	1.765 3	0.405 91	0.229 9	10
夏季	0	0.043 7	0.173 9	0.096	0.033 89	0.353 2	35
	30	0.056 7	0.538 6	0.188	0.123 76	0.658 2	35
	50	0.050 6	0.722 5	0.294 6	0.191 11	0.648 6	34
	100	0.114 9	0.738 4	0.418 8	0.187 07	0.446 7	24
	200	0.217 5	0.907 1	0.611 6	0.271 27	0.443 6	13
	300	0.367 9	1.609 7	0.969 2	0.446 91	0.461 1	11
	500	0.994	2.138 1	1.667	0.404 42	0.242 6	11
秋季	0	0.042 1	0.464 3	0.187 2	0.116 87	0.624 5	35
	30	0.045 9	0.507 8	0.211 7	0.138 72	0.655 3	35
	50	0.040 6	0.699	0.271 1	0.187 26	0.690 8	33
	100	0.072 4	0.939 6	0.466 2	0.230 34	0.494 1	24
	200	0.26	1.045 6	0.693 6	0.285 99	0.412 3	13
	300	0.497 3	1.616 9	1.088 6	0.426 73	0.392	11
	500	1.238 2	2.280 8	1.873	0.392 65	0.209 6	10

2. 1. 3 硅酸盐的分布特征及其成因

硅酸盐总的利用和再生图式与磷酸盐及硝酸盐相同,但由于它在海水中的含量较丰富以及局限于部分生物(如硅藻及甲壳类)吸取量较大因而在海洋中硅尚有自己的迁移特性^[27]。所以硅酸盐有其独特的分布特征:

统计结果表明,与硝酸盐、磷酸盐相比,研究区域的硅酸盐表层浓度($\mu\text{mol/L}$)四季变化幅度最小(图 1),如 30 m 层分别为:冬(9.182 2)>春(8.683 9)>夏(8.657)>秋(6.340 9),与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 分布不同,表层 $\text{SiO}_3^- - \text{Si}$ 浓度秋季最小,可能是秋季硅藻较发育,大量消耗硅酸盐的结果。 $\text{SiO}_3^- - \text{Si}$ 有两个浓度高值区,一个在研究区域的西北角,另一个在东北角(图 6),这是日本九州岛入海径流对该区域的影响以硅酸盐为主所导致的。

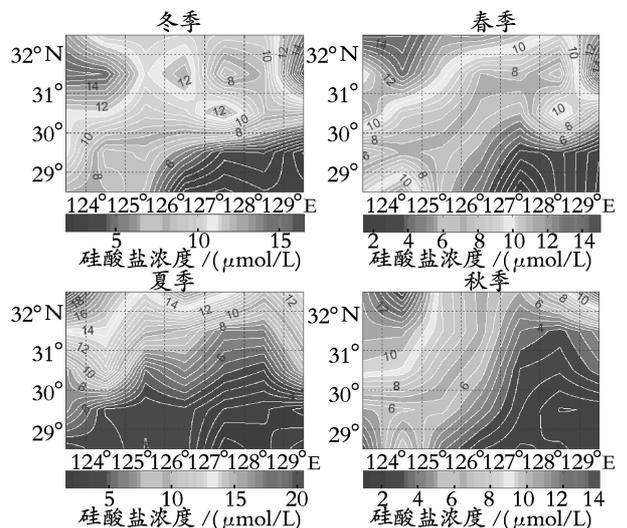


图 6 30 m 层四季硅酸盐浓度分布

Fig. 6 Distribution of Silicate at 30 m with four seasons

相对于 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P, 中底层 SiO_3^{2-} -Si 四季变化幅度最大, 中层夏季浓度最高、底层则是秋季最高。中层为过渡层, 至底层, 垂直梯度最大, 水平梯度最小; 硅酸盐底层各季浓度变化较大, 最大变异系数出现在 200 ~ 300 m 之间 (图 2c、表 3)。若以 SiO_3^{2-} -Si 浓度 $6.0 \mu\text{mol/L}$ 的水作为黑潮次表层水左

边界^[28], 能清晰展示东海黑潮在日本九州西南海区流出东海的路径 (图 6)。

冬、春、秋季均存在高硅酸盐闭合等值线, 冬季 30 m、75 m 层以 30.5°N 、 127.5°E 为中心存在明显的闭合等值线。与磷酸盐一致, 春季高硅酸盐中心 30.5°N 、 128.5°E 可能是东海黑潮西侧锋面涡中心的反映。

表 3 硅酸盐浓度统计结果
Tab. 3 Data statistics of Silicate

季节	深度 (m)	硝酸盐浓度 ($\mu\text{mol/L}$)					
		最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	样本数 (个)
冬季	0	2.162 9	18.625	8.996 5	4.043 9	0.449 5	35
	30	2	17.377 8	9.182 2	3.967 4	0.432 1	35
	50	2.008 2	17.634 5	8.728 3	3.849 6	0.441	32
	100	1.934 7	18.211	8.928 7	4.740 1	0.530 9	23
	200	3.312 1	32.966 5	13.923	10.291	0.739 1	13
	300	4.277 3	53.539 3	22.928	15.948	0.695 6	11
	500	26.767 6	69.149 1	43.05	13.72	0.318 7	11
春季	0	1.285 7	16.32	7.969 2	3.777 4	0.474	35
	30	1.571 4	15.865 1	8.683 9	3.912	0.450 5	35
	50	1.303	16.416 9	9.322 1	4.141	0.444 2	32
	100	1.954	20.367 6	10.02	4.915 8	0.490 6	23
	200	3.508	22.142 9	14.367	6.852 7	0.477	13
	300	7.653 3	35.301 4	22.265	10.163	0.456 5	11
	500	15.484 7	62.206 1	44.612	15.862	0.355 6	10
夏季	0	1.857 1	16.642 6	7.640 9	4.276 1	0.559 6	35
	30	2.091 4	23.724 5	8.657	5.428 3	0.627	35
	50	1.359 8	19.722 8	9.581 4	5.309 9	0.554 2	33
	100	2.600 7	23.618 4	12.466	6.265 9	0.502 6	23
	200	4.336 2	26.853	15.521	8.209 6	0.528 9	13
	300	6.634 9	37.944 6	22.89	11.357	0.496 1	10
	500	23.801 5	64.111 1	47.629	15.844	0.332 7	10
秋季	0	1.449 3	13.246 8	5.972 1	3.210 8	0.537 6	35
	30	1.376 7	15.555 6	6.340 9	3.936 1	0.620 7	35
	50	1.403 1	19.505 4	7.695 1	4.743 4	0.616 4	33
	100	1.657 5	21.957	10.027	5.979 8	0.596 4	21
	200	4.443 9	40.258 5	14.772	10.025	0.678 7	13
	300	7.212 4	36.632 9	22.503	11.815	0.525	11
	500	24.901 5	72.368 6	51.679	18.286	0.353 8	10

2.2 高营养盐水团的季节变化及成因探讨

根据各层营养盐分布特征发现四季均存在不同强度的高营养盐闭合等值线, 闭合等值线内海水营养盐浓度明显高于周边, 把这些位于相对高营养盐闭合等值线内的水团称为高营养盐水团。依据高营养盐闭合等值线的分布, 可以得到研究区域高营养盐水团的中心位置与范围。各季节不同营养盐水团中心位置与浓度不同。

如表 4 所示, 营养盐水团中心位置与强度 (包括深度与经纬度范围) 四季存在着变化。高硝酸盐中心冬季位于 126.5°E 、 29.5°N 、20 m 层, 浓度 $3.5 \mu\text{mol/L}$, 春季向东北移动至 127.5°E 、 30.5°N 、75 m 层, 浓度 $6.5 \mu\text{mol/L}$, 大致在 0 ~ 75 m, 1 个经纬度范围内; 夏、秋季高硝酸盐水团减弱, 中心向西移至 125.5°E 、 30.5°N 、30 m 层, 浓度 $6.5 \mu\text{mol/L}$, 影响深度随着东海陆架地形的抬升而减小, 小于 50 m。高磷酸盐中心冬春季均在 125.5°E 、 30.5°N 、50 m 层、

中心浓度在 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{mol/L}$ 之间, 夏秋季未发现高磷酸盐水团。高硅酸盐水团中心变动较大, 冬季为 127.5°E 、 30.5°N , 春季 128.5°E 、 30.5°N , 秋季 125.5°E 、 30.5°N , 中心深度均在 50 m 以下。夏季未发现明显的高硅酸盐闭合等值线。

冬春季海水垂直交换强烈, 下层丰富的营养盐被海水带到上层, 在表层聚集, 导致高营养盐闭合等值线明显, 形成高营养盐水团; 夏秋季海水层结稳定, 垂直交换微弱, 高营养盐水团强度弱。由于上升

表 4 高营养盐水团的中心位置与范围

Tab. 4 Location and area of the high-nutrient water masses

季节	营养盐	中心位置	深度(m)	经纬度	强闭合等值线位置与中心位置的浓度($\mu\text{mol/L}$)
冬季	N	126.5°E , 29.5°N	0~75	$126.2 \sim 126.8^\circ\text{E}$, $29.2 \sim 29.8^\circ\text{N}$	(20 m) 3.5
	P	125.4°E , 30.5°N	0~60	$124.5 \sim 126^\circ\text{E}$, $30.2 \sim 31.5^\circ\text{N}$	(50 m) 0.6
	Si	127.5°E , 30.5°N	0~120	$127 \sim 128.2^\circ\text{E}$, $30 \sim 31^\circ\text{N}$	(75 m) 14
春季	N	127.5°E , 30.5°N	30~100	$126.9 \sim 128.2^\circ\text{E}$, $30 \sim 31^\circ\text{N}$	(75 m) 6.5
	P	125.5°E , 30.5°N	0~80	$125 \sim 126.1^\circ\text{E}$, $30 \sim 31.8^\circ\text{N}$	(50 m) 0.5
	Si	128.5°E , 30.5°N	0~75	$128 \sim 129^\circ\text{E}$, $30 \sim 31^\circ\text{N}$	(60 m) 12
夏季	N	125.5°E , 30.5°N	0~50	$125 \sim 126.2^\circ\text{E}$, $30.1 \sim 31.1^\circ\text{N}$	(30 m) 5
	P	—	—	—	—
	Si	—	—	—	—
秋季	N	—	—	—	—
	P	—	—	—	—
	Si	125.5°E , 30.5°N	0~60	$125 \sim 126^\circ\text{E}$, $30.1 \sim 30.8^\circ\text{N}$	(50 m) 12

3 结论

基于新发布的多年平均的海洋营养盐资料和地形数据库资料, 研发 Matlab 三维可视技术与数据统计分析技术, 研究东海北部海域营养盐时空分布特征, 可以得到:

(1) 东海北部海域 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P 分布总特征为由沿岸向离岸递减, 由表层向底层递增; 西北高, 东南低, 呈扇形向东南扩展, 这主要是长江冲淡水与苏北沿岸流等陆源输入造成。 SiO_3^- -Si 有两个浓度高值区, 一个为研究区域的西北角, 另一个在东北角, 反映了日本九州岛入海径流对该区域的影响以硅酸盐为主。

(2) 表层(0~50 m)营养盐平均浓度均是冬季最高, NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P 冬季明显高于其他三季; 中层(50~200 m)的 SiO_3^- -Si、50~150 m 的 NO_3^- -N 夏季

流可以将下层丰富的营养盐带到上层, 因此营养盐分布是上升流的很好示踪^[29]; 冷涡区域常表现为冷水涌升, 因此冷涡与上升流二者相辅相成, 形成冷涡-上升流系统; 研究区域的营养盐高值中心与济州岛西南部冷涡^[24, 25]位置基本吻合; 由此推断济州岛西南部冷涡-上升流系统是产生高营养盐水团的主要动力。另一个导致高营养盐水团形成的因素是随着东海陆架抬升的上升流将底层高营养盐水带到表层, 在陆架区域聚集。

最高; 底层(200~500 m)四季变化微弱, 其中 400~500 m 层 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si 浓度值秋季最高。这主要与海流输送、垂直混合和光合作用等影响有关。 NO_3^- -N 变异系数表层最大, 而 PO_4^{3-} -P 中层最大, SiO_3^- -Si 底层最大, 其中 NO_3^- -N 相应各层变异系数大于 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si。

(3) 由高营养盐闭合等值线分布可见, 四季均存在高营养盐水团, 水团强度冬季最强, 夏季最弱。高 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^- -Si 水团中心分别位于 125.5°E 、 30.5°N 和 127.5°E 、 30.5°N ; 高 NO_3^- -N 水团中心, 随冬-春-夏-秋、从南往东北再向西、最后向东南, 在 $125^\circ \sim 128^\circ\text{E}$ 、 $29^\circ \sim 31^\circ\text{N}$ 范围内移动(图 7)。高营养盐水团的移动与济州岛西南部冷涡-上升流的季节变动有关。随着高营养盐水团的季节移动, 海洋初级生产力、海洋生物资源量必然随之变化, 进而影响东海北部海洋生态系统。

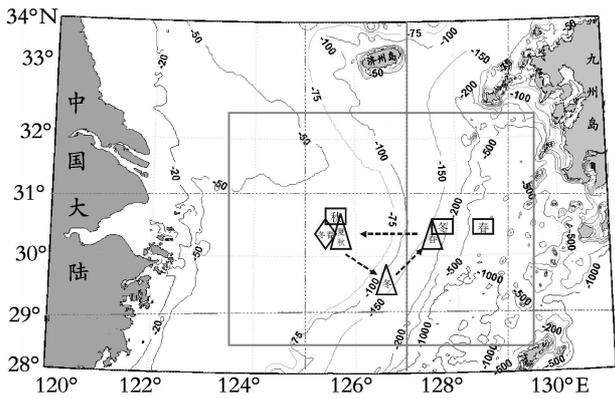


图7 东北北部地形、四季高营养盐水团中心(大矩形区域为本文研究区域;△为高硝酸盐水团中心,◇为高磷酸盐水团中心,□为高硅酸盐水团中心)

Fig. 7 The topography and high-nutrient water masses' center of the northern East China Sea

致谢:感谢加拿大渔业水产部 Han Guoqi 教授的指导和帮助,感谢芮建勋副教授、闫国东、王国栋、王甜甜、安琪、朱文武等在讨论中提出的宝贵建议。

参考文献:

[1] 杨东方, 于子江, 张柯, 等. 营养盐硅在全球海域中限制浮游植物的生长[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 547-553.

[2] 王桂云, Barber R T. 热带西太平洋海洋事件与初级生产力的关系[J]. 海洋科学进展, 1991, 9(3): 1-10.

[3] 王修林, 张蕾, 韩秀荣, 等. 营养盐对海洋浮游植物生长的影响——数学模型研究[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 96-71.

[4] 王芳, 康建成, 周尚哲, 等. 东海外海海域营养盐的时空分布特征[J]. 资源科学, 2008, 30(10): 1 592-1 599.

[5] 唐启升, 苏纪兰, 孙松, 等. 中国近海生态系统动力学研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(12): 1 288-1 299.

[6] Richardson K, Jdrgensen B. Eutrophication in coastal marine ecosystem [J]. Coastal and Estuarine Studies 1996, 52: 1-19.

[7] 任玲, 杨军. 海洋中氮营养盐循环及其模型研究[J]. 地球科学进展, 2000, 15(1): 58-64.

[8] 张正斌, 陈镇东, 刘莲生, 等. 海洋化学原理和应用: 中国近海的海洋化学[M]. 北京: 海洋出版社, 2004. 160-200.

[9] 孙湘平. 对马暖流(表层)来源的探讨[J]. 海洋通报, 1993, 12(3): 1-9.

[10] 臧家业. 东北北部海水中硝酸盐(NO_3^- -N)的分布及其成因[J]. 黄渤海海洋, 1999, 17(3): 50-56.

[11] 祝陈坚, 石晓勇. 东海磷酸盐的分布与再生[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1996, 26(1): 75-82.

[12] 臧家业. 东海黑潮区海水中磷酸盐的分布特征及成因探讨[J]. 黄渤海海洋, 1991, 9(2): 36-45.

[13] 项有堂, 辛士河, 王东村, 等. 东海黑潮区海水无机氮的分布特征及成因探讨[J]. 海洋通报, 1994, 13(1): 35-43.

[14] 王保栋, 战闰, 臧家业. 黄海、东海浮游植物生长的营养盐限制性因素初探[J]. 海洋学报(中文版), 2003, 25(S2): 190-195.

[15] 高生泉, 林以安, 金明明, 等. 春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构[J]. 东海海洋, 2004, 22(4): 38-50.

[16] 王保栋, 战闰, 臧家业. 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.

[17] 王保栋. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的运输[J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(2): 41-47.

[18] 章守宇, 杨红, 刘洪生. 东海物质输送及其影响因素分析[J]. 上海水产大学学报, 2000, 9(2): 152-156.

[19] 陆赛英, 葛人峰. 东海陆架水域营养盐的季节变化和物理运输的规律[J]. 海洋学报, 1996, 18(5): 41-51.

[20] 万小芳, 吴增茂. 南黄海和东海海域营养盐等物质大气入海通量的再分析[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(4): 14-18.

[21] 张传松, 王修林, 石晓勇, 等. 东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其与赤潮的关系[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2 416-2 424.

[22] 赵玲, 赵冬至, 张昕阳, 等. 我国有害赤潮的灾害分级与时空分布[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 15-19.

[23] 王保栋. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1 122-1 126.

[24] 胡敦欣, 丁宗信, 熊庆成. 东海北部一个气旋型涡旋的初步分析[J]. 科学通报, 1980, 1: 29-31.

[25] 浦泳修. 东海北部底层中的涌升和涡旋[J]. 海洋通报, 1981, 6: 1-5.

[26] 袁耀初, 管秉贤. 中国近海及其附近海域若干涡旋研究综述II. 东海和琉球群岛以东海域[J]. 海洋学报(中文版), 2007, 29(2): 1-17.

[27] 王桂云. 用多元回归分析方法研究东海海水中化学要素之间的关系[J]. 海洋科学进展, 1986, 4(4): 23-27.

[28] 王玉衡, 董恒霖, 任典勇. 夏、冬季东海营养盐锋区及水系化学特征的研究[J]. 海洋学报, 1992, 14(4): 51-60.

[29] 乔方利, 赵伟, 吕新刚. 东海冷涡上升流的环状结构[J]. 自然科学进展, 2008, 18(6): 674-679.

Seasonal variation and causative analysis of nutrients distribution in the northern of the East China Sea

ZHANG Jian-ping, KANG Jian-cheng, REN Hui-ru, LI Wei-jiang, XIE Xiao-jin

(Urban Ecology and Environment Research Center, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Received Jul. 16 2009

Key words: the northern of East China Sea; nitrate; phosphate; silicate; high-nutrient water mass

Abstract: Based on two databases, the first one is global sea Nutrients which was released by the United States National Oceanic and Atmospheric Administration in 2007, which was named World Ocean Atlas 2005 (WOA05). The other one is global topography which was issued by the United States National Geophysical Data Center in 2006. This paper used MATLAB computer program plot and numerical analysis techniques to analyze the seasonal variation characteristics of nutrients distribution in the northern of the East China Sea. The results are as follows: Firstly, the general characters of Nitrate and Phosphate distributions in the northern East China Sea are similar. Their concentrations in the northwest of the study area are higher than that in the southeast, decrease from the near shore to offshore, increase from the surface to the bottom. The maximum of Silicate also is in the Northwest of the area, but there is a sub-maximum concentration in the Northeast. Secondly, the nutrients concentration increased with depth in all seasons. There is not any nutrient cline. The average concentrations of nutrients in the surface are the highest in winter. Nitrate in the 50~150 meters layer and Silicate in the 50~200 meters layer are the highest in summer. There are weak changes in the bottom during four seasons, and in 400~500 m layer Phosphate and Silicate concentrations are largest in autumn. Finally there are high-nutrient closed contours in four seasons, which is high-nutrient water mass. The high-Nitrate nutrition water masse's center moves from the south to the north-east, then the west, and finally to the southeast. This center moves within $125 \sim 128^{\circ}\text{E}$, $29 \sim 31^{\circ}\text{N}$ in four seasons. There is also a cycle of change in intensity, the strongest is in winter, the weakest is in summer. High-Phosphate nutrient center locates on 125.5°E , 30.5°N , and Silicate locates on 128.5°E , 30.5°N .

(本文编辑: 康亦兼)