

# 南海北部秋季营养盐、溶解氧、pH 值和叶绿素 a 分布特征及相互关系

龙爱民, 陈绍勇, 周伟华, 徐继荣, 孙翠慈,  
张凤琴, 张建林, 徐洪周

(中国科学院南海海洋研究所, 中国科学院 LED 实验室, 广东广州 510301)

**摘 要:** 通过 2004 年 9 月至 10 月对南海北部水域的现场调查, 分析了表层海水中溶解氧、叶绿素 a、pH 值和营养盐等水质因子的空间分布特征, 并讨论了它们之间的相互关系。结果表明: 在南海北部海区的表层海水中, 各水质因子在空间分布上大多呈现块状分布, 且东西两侧的海水有较为明显的差异; 海水中的溶解氧、pH 值均表现出与海水温度相反分布趋势; 海水中的叶绿素 a (Chl a) 和众多的水质因子表现出多元相关性, 说明水体中浮游植物的生长繁殖是众多水质因子在南海北部综合作用的结果, 而 Chl a 和水中亚硝酸盐的高相关性, 说明南海北部水体中浮游植物的生长和亚硝酸盐有着比其他营养盐因子更为密切的联系。

**关键词:** 南海北部; 溶解氧; 营养盐; 叶绿素 a

**中图分类号:** P734.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6392(2006)05-0009-08

海水中的营养物质和其他微量元素连同某些有机物质的存在形式和浓度高低直接影响浮游植物的生长、繁殖和代谢, 它们是赤潮或水华形成和发展的物质基础<sup>[1-2]</sup>。因此, 长期以来营养盐和浮游藻类就一直是藻类生态学家和海洋环境学家关注的焦点。研究表明, 营养盐的赋存状态与其他水体环境因子之间存在着双向的内在联系: 水体的环境因子影响着营养盐的水平和赋存状态, 而营养盐的水平和状态的改变将在一定程度上改变着水体的理化性质, 进而影响着水体中其他物质的形态分布<sup>[3]</sup>。本研究通过对南海北部表层水体众多水体环境因子的实地调查分析, 阐述各水质因子的分布规律, 并对这些参数之间的内在联系进行分析。

## 1 材料与方 法

### 1.1 水样采集与保存

水样的采集于 2004 年 9 月 16—10 月 4 日的开放航次进行 (“实验 3 号” 科考船), 基本上在自西向东设置西北东南向 6 个断面, 并在各断面外围设置 1 个断面 (e401—e413 站), 共计 33 个水样采集站, 站位分布如图 1 所示。断面的选取考虑了南海北部的年均风向和南海北部海底大陆架/斜坡地形。南海北部年均风为东北风, 其海底地形的显著特征是 NE-SW 走向的广东大陆斜坡, 斜坡的东北部 (即台湾浅滩南部大斜坡) 上半部陡峭而下半部平缓, 斜坡的西南部 (即被称为海南岛南部、东南部大斜坡) 坡度也相当陡峭。广东大陆斜坡南临南海北部深海盆。从图 1 可以看到, 本研究所涉及的水样采集断面基本上沿着南海

收稿日期: 2005-07-18; 收修改稿日期: 2005-11-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-227); 广东省自然科学基金资助项目 (04001313);

广东省科技计划项目 (2004B33201001, 2005B33201007); 中科院南海海洋研究所前沿项目 (50601-32)

北部的年均风向且集中在广东大陆斜坡的范围内。外围断面(即 e401—e413 站)基本代表了广东大陆斜坡与南海北部深海盆的界面。各个站点均采集表层海水。

采样瓶为 500 mL(收集营养盐分析水样)的 LDPE 塑料瓶。采样前对采样瓶进行如下的处理:先用洗涤剂浸泡 7 d,自来水冲洗后再用去离子水洗净,然后置于 1:10(V/V)的稀 HCl(AR)溶液中浸泡 7 d,再用去离子水洗净,自然风干后拧盖备用。

采集水样时,将收集的水样用 0.45 m(Whatman, GF/F)的滤膜过滤,一部分收集到 500 mL 的采样瓶中,加入 2~3 滴  $\text{CHCl}_3$  固定并冷藏保存带回实验室作营养盐分析;滤膜收集带回实验室作叶绿素的分析测定。

### 1.2 水样温盐的测定

水体的温度和盐度等参数的测定主要用温盐深测量仪 CTD(EG&G, Mark III CTD)进行现场测定和直接读取,航次 2 d 前对 CTD 进行校准与标定。

### 1.3 水样营养盐水平分析

本研究主要进行营养盐的常规 5 项指标的分析,即分析样品中无机氮(包括  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$ )、活性磷酸盐、活性硅酸盐等的含量。上述指标的分析均用 Helios(Thermo Spectronic)可见紫外分光光度计按照国家技术监督局发布的《海洋调查规范—海水化学要素观测》(GB12763.4-91)规范要求<sup>[4]</sup>进行,即活性磷酸盐的测定采用抗坏血酸还原的磷钼蓝法、活性磷酸盐的测定采用硅钼法蓝、硝酸盐的测定采用锌—镉还原法、亚硝酸盐的测定采用重氮—偶氮法、氨的测定采用次溴酸钠氧化法。水样总无机氮的含量为亚硝酸盐、硝酸盐和氨三者含量之和。每项指标均进行双样平行分析,取均值为最后结果。各种形式营养盐的检出限分别为: $\text{NO}_3\text{-N}$  0.05 mol/L,  $\text{NO}_2\text{-N}$  0.02 mol/L,  $\text{NH}_3\text{-N}$  0.03 mol/L, 活性磷酸盐 0.02 mol/L, 活性硅酸盐 0.05 mol/L。

### 1.4 叶绿素、溶解氧和 pH 值的测定

用 0.45 m(Whatman, GF/F)的滤膜过滤一定量的水样,将滤膜置于试管中,加入一定量的丙酮,摇动样品后置黑暗中使样品均匀被萃取,5~6 h 后进行叶绿素 a 含量的测定。具体的测定依据 ISO10260:1992(E)国际标准方法进行。水样溶解氧(DO)的含量通过现场滴定得到,滴定的方法为碘量法。海水的 pH 值采用 WTW 330I 型 pH 仪现场测定,航次前 1 d 对 pH 计进行校准,并在航次过程中每 7 d 作一次校准。

## 2 结果与讨论

### 2.1 海水温度和盐度的分布

Wyttki<sup>[5]</sup>在对西太平洋进行研究时,将海水表层温度为  $28^\circ\text{C}$  等温线所包围的海域定义为西太平洋暖池。从图 2 a 我们可以看出,秋季南海北部表层海水的水温较高,  $28^\circ\text{C}$  甚至温度更高的暖水几乎覆盖了南海北部表层。这是因为这个季节为南海暖水最强盛的时期,且

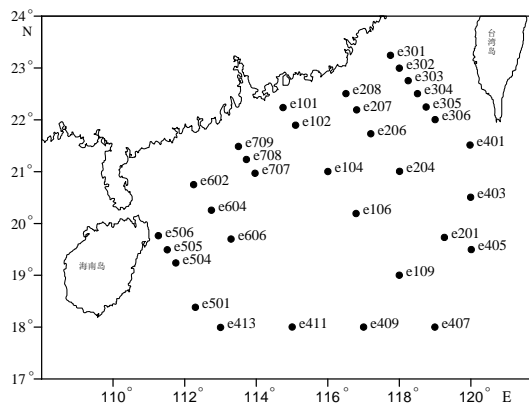


图 1 水样采集站点分布图

Fig.1 Seawater sampling station map

暖水的主体位于南沙及其东北部海域。有关研究表明: 1月份除外, 其余各月南海都有 28℃ 的暖水, 4月份突发北跳, 5—7月持续发展, 8—9月为调整时期, 秋季10月份开始衰退而向南撤退<sup>[5]</sup>。从图2还可以看到, 南海北部表层海水等温线由西向东倾斜, 东侧的水温要稍高于西侧。这可能是因为东侧海水受西太平洋黑潮水的影响所致<sup>[6]</sup>。

南海北部表层海水的盐度(图2b)以广东沿岸水最低, 同时在陆地径流的冲淡作用下, 广东沿岸水和外海水之间盐度锋明显, 锋区等盐度线呈密集分布。而外海水盐度则相对较高, 水平分布也比较均匀, 等盐度线稀疏。与温度分布的趋势相似, 南海北部表层海水等盐度线也是由西向东倾斜, 东侧的海水的盐度要稍高于西侧。

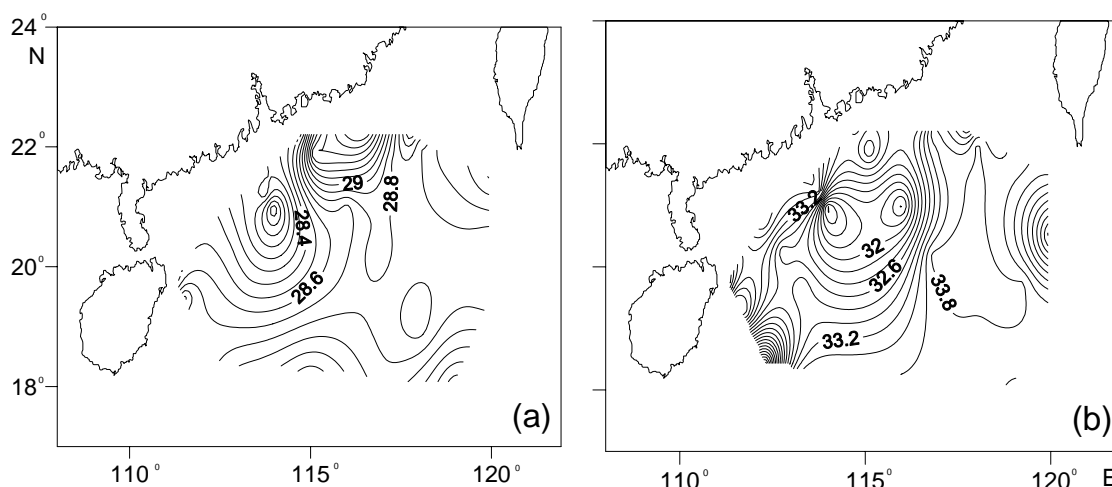


图2 表层海水温度(a)和盐度(b)的分布(2004年9-10月)

Fig.2 Surface seawater's temperature (a) and salinity (b) (Sep.—Oct., 2004)

## 2.2 营养盐的空间变化特征

表1给出了本航次南海北部各个采样站位表层水体的营养盐、叶绿素a、溶解氧和pH水平的实测结果。在所有检出样品中, 亚硝酸盐、硝酸盐和氨盐的含量范围分别为0.02~0.44, 0.04~12.29, 0.17~7.66 mol/L之间, 总无机氮(TIN, 为亚硝酸盐、硝酸盐和氨盐的浓度之和)的含量范围为0.87~14.50 mol/L之间, 在无机氮营养盐的各形态中, 以亚硝酸盐的含量最低, 而硝酸盐的含量最高; 而活性硅酸盐和活性磷酸盐的变化范围则分别为1.49~6.49和0.15~0.42 mol/L之间。

从空间分布上看(见图3), 南海北部表层海水无机营养盐多呈块状分布。在总体趋势上, 活性磷酸盐、活性硅酸盐均表现为西侧海水略高于东侧海水, 而东侧海水总无机氮(TIN)的含量则要稍高于西侧海水; 在无机氮的各个组分中, 硝酸盐和氨盐的含量表现为西侧海水略高于东侧海水; 而亚硝酸盐的分布却表现为东侧海水略高于西侧海水。

从图3还可以看出, 营养盐的最高值并没有出现在沿岸的海域, 而是出现在离岸一定距离的东、西部海域。这是因为粤东、粤西沿岸上升流的影响, 沿岸上升流为表层海水带来了丰富的无机营养盐。由于上升流的影响, 表层水体的溶解氧等其他化学要素的分布也表现相应的变化, 最终影响到表层水体浮游植物的生理生态, 因此水体中的叶绿素a的含量和分布情况也将受到相应的影响。

表 1 南海北部表层海水的营养盐、叶绿素、溶解氧与 pH  
Tab.1 Macro-nutrients, Chl a, DO, and pH of surface seawater in the South China Sea

站位	经度 / ° E	纬度 / ° N	NO <sub>2</sub> -N / μ mol · L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> -N / μ mol · L <sup>-1</sup>	NH <sub>3</sub> -N / μ mol · L <sup>-1</sup>	Si / μ mol · L <sup>-1</sup>	P / μ mol · L <sup>-1</sup>	Chla / μ g · L <sup>-1</sup>	DO / mg · L <sup>-1</sup>	pH
E101	114.75	22.25	0.20	2.13	1.08	2.35	0.41	0.14	6.51	8.237
E102	115.10	21.90	0.27	3.08	0.58	2.11	0.35	0.12	6.42	8.239
E104	116.00	21.00	0.23	1.31	0.62	2.02	0.38	0.09	6.93	8.241
E106	116.80	20.20	0.40	7.05	0.39	1.62	0.28	0.05	6.52	8.245
E109	118.00	19.00	0.25	1.66	0.80	2.47	0.42	0.06	6.82	8.242
E202	118.80	20.20	0.15	0.47	0.45	2.29	0.29	0.05	6.88	8.248
E204	118.00	21.00	0.03	0.89	0.73	2.76	0.28	0.05	6.81	8.267
E206	117.20	21.80	0.02	0.91	0.61	2.77	0.29	0.06	6.69	8.273
E207	116.80	22.20	0.12	1.05	0.25	1.58	0.15	0.08	6.60	8.264
E208	116.50	22.50	0.13	1.03	0.52	1.95	0.42	0.12	6.61	8.282
E301	117.75	23.25	0.15	2.21	0.77	5.26	0.41	0.51	6.59	8.271
E302	118.00	23.00	0.30	0.31	0.26	3.82	0.39	0.43	6.58	8.240
E303	118.25	22.75	0.28	1.52	1.41	1.71	0.41	0.21	6.59	8.258
E304	118.50	22.50	0.18	0.39	0.94	3.25	0.36	0.18	6.71	8.258
E305	118.75	22.25	0.26	4.89	0.45	2.31	0.39	0.20	6.70	8.271
E306	119.00	22.00	0.24	4.87	0.54	2.41	0.37	0.15	6.70	8.265
E401	120.00	21.50	0.39	6.06	7.66	2.24	0.34	0.07	6.67	8.254
E403	120.00	20.50	0.26	7.49	1.18	2.74	0.28	0.06	6.54	8.278
E405	120.00	19.50	0.03	12.29	2.18	3.23	0.31	0.07	6.48	8.268
E407	119.00	18.00	0.02	5.70	4.46	3.34	0.39	0.04	6.57	8.284
E409	117.00	18.00	0.03	6.61	0.78	2.99	0.31	0.05	6.70	8.286
E411	115.00	18.00	0.20	1.16	0.89	2.49	0.42	0.07	6.65	8.244
E413	113.00	18.00	0.06	2.00	0.21	1.49	0.29	0.05	6.61	8.263
E501	112.50	18.50	0.29	2.12	0.17	6.49	0.29	0.06	6.58	8.260
E504	111.75	19.25	0.29	4.33	0.21	1.80	0.28	0.07	6.60	8.260
E505	111.50	19.50	0.25	2.50	0.85	2.48	0.40	0.06	6.63	8.256
E506	111.25	19.75	0.44	0.04	0.80	4.78	0.36	0.60	6.52	8.263
E602	112.25	20.75	0.13	5.41	0.26	3.67	0.28	0.10	6.64	8.248
E604	112.75	20.25	0.19	0.11	0.84	4.86	0.33	0.15	7.28	8.262
E606	113.3	19.70	0.17	2.61	0.64	2.15	0.34	0.06	6.72	8.258
E707	114	21.00	0.06	2.62	0.28	1.74	0.42	0.19	6.75	8.261
E708	113.75	21.25	0.13	7.69	0.85	2.06	0.29	0.22	6.84	8.276
E709	113.5	21.50	0.17	3.76	0.44	3.48	0.30	0.31	6.64	8.272

### 2.3 Chl a、溶解氧和pH值的变化

图4描述了本航次所测得的南海北部表层海水叶绿素a (Chl a)、溶解氧 (DO) 和 pH 值的分布情况。表层海水中 Chl a、DO 和 pH 的水平在南海北部海域的变化范围分别为 0.04~0.15 g/L, 6.42~6.88 mg/L, 8.224~8.286 (见表1), 并且也都呈现出块状分布的特点。

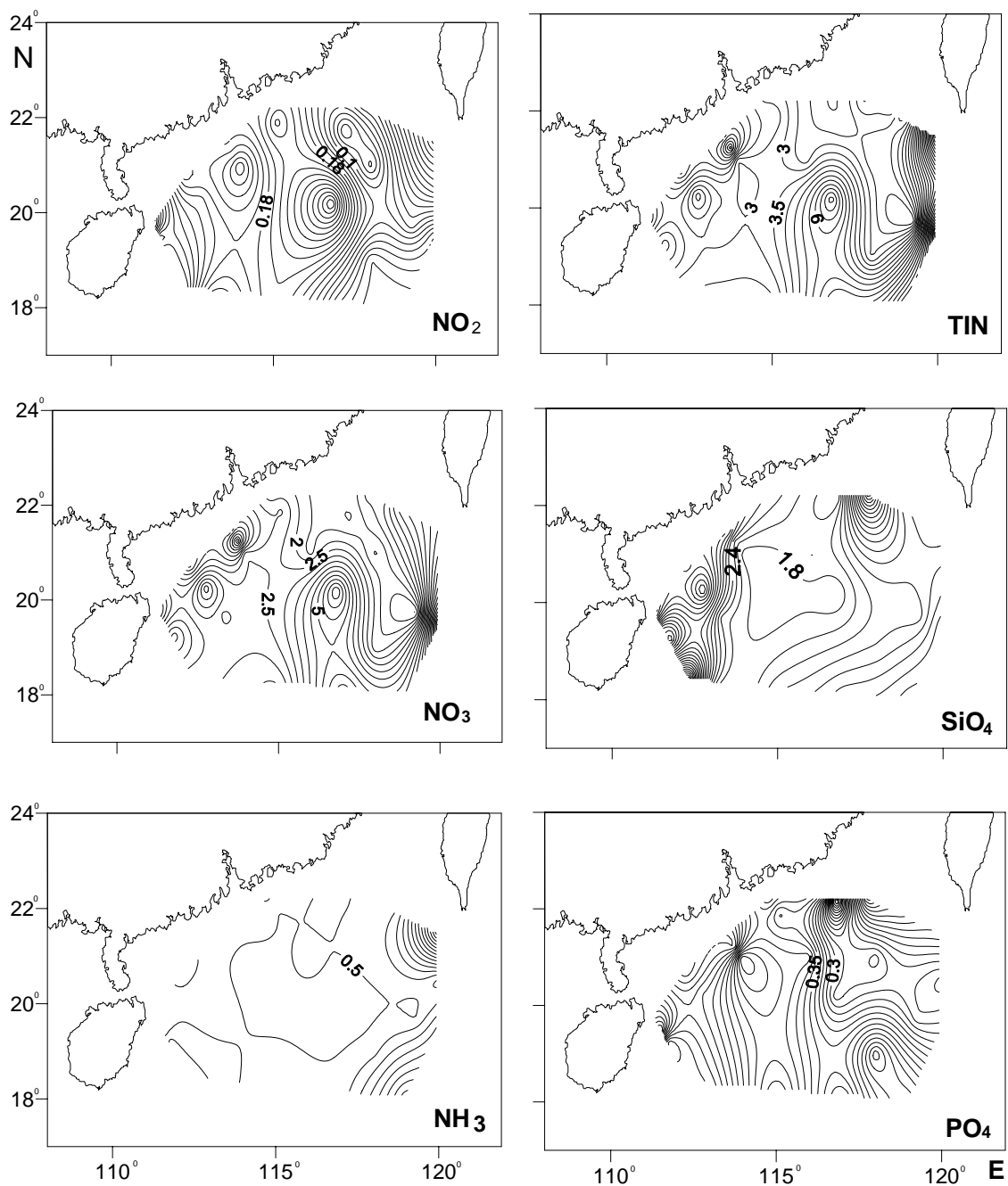


图3 海北部表层海水营养盐的水平分布(2004年9—10月)

Fig.3 Macro-nutrient contents in the surface seawater of Northern South China Sea (Sep.—Oct., 2004)

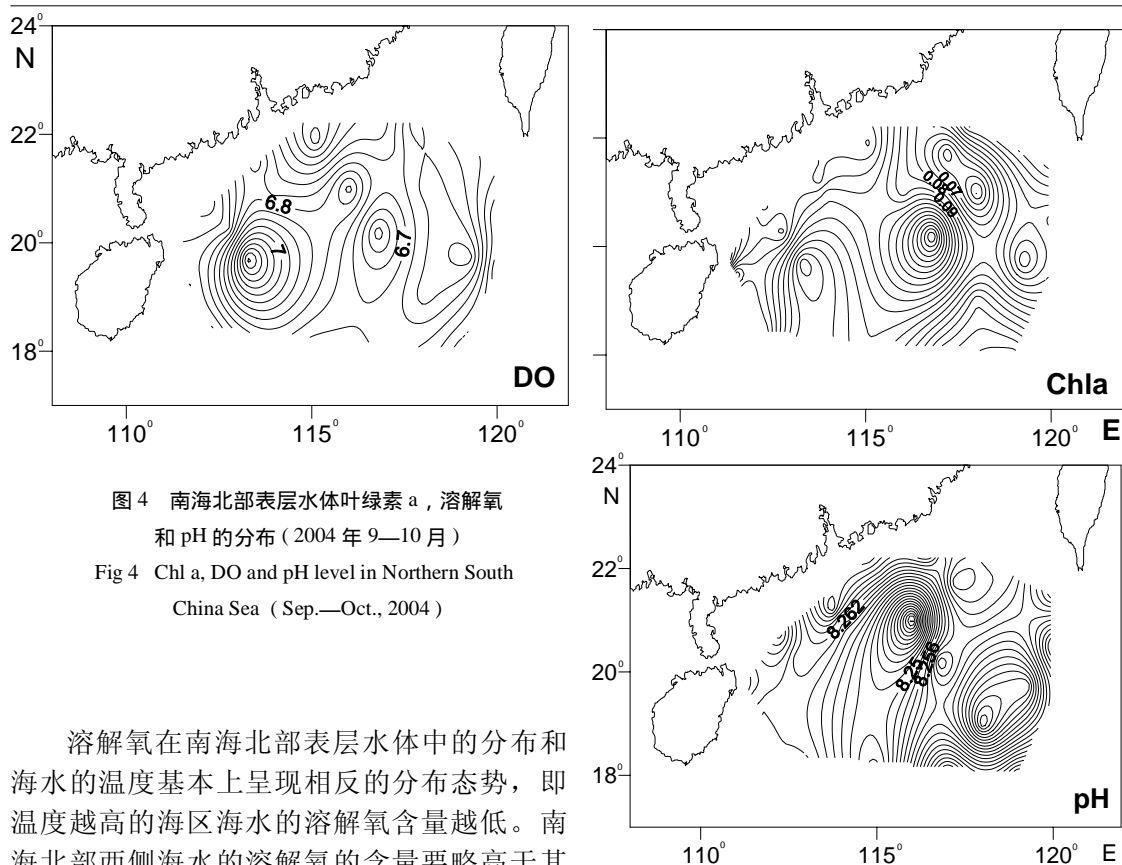


图4 南海北部表层水体叶绿素 a, 溶解氧和 pH 的分布 (2004 年 9—10 月)

Fig 4 Chl a, DO and pH level in Northern South China Sea (Sep.—Oct., 2004)

溶解氧在南海北部表层水体中的分布和海水的温度基本上呈现相反的分佈态势, 即温度越高的海区海水的溶解氧含量越低。南海北部西侧海水的溶解氧的含量要略高于其东侧的海水, 海水温度则相反。

与其他环境因子相比较, 南海北部表层海水的 pH 值相对稳定, 变化幅度较小, 变化的趋势也比较简单, 总体上表现出从沿岸向外海递增的趋势。

#### 2.4 各水质参数之间的相互关系

2.4.1 溶解氧与温度的相互关系 从图 2 a 和图 4 可以看出, 南海北部表层海水的温度和溶解氧的分佈趋势完全相反。这是因为海水中的溶解氧的含量与海水的温度一般成反比例的关系。对南海北部表层海水溶解氧与海水温度进行相关分析可以得到如下的关系式:

$$DO=9.460-0.098 t \quad (R^2=0.375, p=0.034) \quad (1)$$

式中: DO 为海水溶解氧的含量 (g/L);  $t$  为海水的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。尽管从统计的意义上讲, 两者的线性关系并不十分显著 (显著性水平  $p$  稍大于 0.01), 但仍然可以看出温度与溶解氧之间的负相关关系。

2.4.2 pH 与海水温度的关系 当海水温度升高时,  $\text{CO}_2$  将向大气逸出, 而海水中  $\text{CO}_2$  的减少则会直接导致海水 pH 值的升高。Gieskes<sup>[7]</sup> 在研究两者之间的关系时给出了海水温度对 pH 值的影响的经验公式:

$$\text{pH}_2=\text{pH}_1+a(t_1-t_2) \quad (2)$$

即海水的 pH 值随着温度的升高而呈线性降低, 且海水温度对 pH 值最大影响不会超过 0.06 个 pH 单位。进一步方差分析发现, 在南海北部海域 pH 和海水温度  $t$  的显著性水平  $p$  已经达到 0.377, 说明两者之间并不能表现出良好的线性相关关系。由此, 我们可以推断,

在南海北部海域海水 pH 的变化并不是单纯的海水温度变化的结果。王玉恒等在浙江南部海区的研究中也有类似的结论, 他们发现浙江南部海区的 pH 的变化更重要的是光合作用的结果<sup>[8]</sup>。

**2.4.3 Chl a 与其他水质参数之间的关系** 很多研究表明: 海水中藻类生长和无机营养盐具有很高的相关性。因此藻类生长和无机营养盐也一直是藻类生态和赤潮研究以及海洋污染研究的关键问题之一<sup>[9]</sup>。本研究通过对 Chl a 和无机营养盐各组分进行相关分析发现, 南海北部水域的 Chl a 只与亚硝酸盐呈现明显的线性关系。这与陈绍勇等在对南海北部水质参数进行主成分分析得到的结论一致<sup>[10]</sup>, 说明在研究海域中浮游植物的生长与亚硝酸盐有着比其他因子更为密切的联系。在实际水体中, 水体环境中的各个水质参数均以其特殊的方式影响着其中浮游植物的生长和繁殖。譬如, 刘玉等在研究珠江口邻近水域时发现, 藻类生长与珠江口水域中的溶解氧的含量呈正相关, 而与活性磷酸盐、硝酸盐则呈负相关<sup>[9]</sup>。为了探明浮游植物生长与众多环境因子的内在联系, 将 Chl a 和其他水质因子进行多元相关分析可以得到如下的关系式:

$$\text{Chl a} = -0.491 + 0.001S - 0.017t + 0.18\text{NO}_2 - 0.01\text{NH}_3 + 0.002\text{Si} + 0.32\text{P} - 0.33\text{DO} + 0.135\text{pH}$$
$$(R^2 = 0.709, p < 0.001) \quad (3)$$

式中: Chl a 为叶绿素 a 的浓度 (g/L); S 为海水的盐度; t 为海水的温度 (单位: °C); NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, Si, P 分别表示海水中亚硝酸盐、氨盐、活性硅酸盐、活性磷酸盐的浓度 (g/L); DO 为海水溶解氧的含量 (g/L); pH 为海水的 pH 值。多元分析的结果表明, 海水中浮游植物的生长与繁殖是海水中包括温度、盐度、溶解氧、营养盐等众多水质因子综合作用的结果。

### 3 结 论

南海北部秋季水体中的无机营养盐、Chl a、pH 值等水质因子大多呈现块状分布的特点, 且其东西两侧的水体存在较明显的差异。水体中的溶解氧含量与水体温度呈负相关, Chl a 与众多的水质因子之间表现出较好的多元线性关系, 在各个单因子之间, Chl a 与亚硝酸盐表现出较强的相关性。说明南海北部水体中浮游植物的生长与亚硝酸盐密切相关, 更是多个环境因素综合作用的结果。

#### 参考文献:

- [1] Fowler SW. Critical review of selected heavy metal and chlorinated hydrocarbon concentration in marine environment [J]. Mar Environ Res., 1990, 29: 1-64
- [2] 高素兰. 营养盐和微量元素与黄骅赤潮的关系 [J]. 渤海海洋, 1997, 15(2): 59-63.
- [3] 龙爱民, 陈绍勇, 田正隆. 珠江口及近海水体中铜的含量和形态分布及其与营养盐的空间分布关系 [J]. 环境科学研究, 2004, 17(4): 10-13.
- [4] 国家技术监督局. 《海洋调查规范—海水化学要素观测》(GB12763.4-91)[S]. 北京: 科学出版社, 1991: 1-48.
- [5] Wyrki K. Some thoughts about the west Pacific warm pool. Proceedings west Pacific international meeting and workshop on TOGA COARE [M]. New Caledonia, 1989, 99-109
- [6] 徐锡桢, 邱章, 陈惠昌. 南海水平环流概述 [A]. 中国海洋湖沼学会水温气象学术会议论文集 (1980) [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 137-145.
- [7] Gieskeks JM. Effects of temperature on the pH of seawater [J]. Limnol. Oceanog., 1969, 14(5): 679-684.
- [8] 王玉衡, 蒋国昌, 董恒霖. 春季浙江南部海区溶解氧、pH 值和营养盐分布特征及相互关系研究 [J]. 海洋学报, 1990, 12

(5): 654-660.

- [9] 刘玉, 李适宇, 吴仁海, 等. 珠江口四大大口门及近滩水域浮游藻类和关键水质因子的监测和分析 [J]. 中国环境监测, 2002, 18(2): 26-29.
- [10] 陈绍勇, 龙爱民, 周伟华, 等. 南海北部上层海水关键水质因子的监测与分析 [J]. 热带海洋学报, 2006, 25(1): 15-18.

作者简介: 龙爱民 (1970—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生物环境地球化学研究, 已经发表论文 30 余篇。

## Distribution of Macro-nutrients, Dissolved Oxygen, pH and Chl a and Their Relationships in Northern South China Sea

LONG Aimin, CHEN Shaoyong, ZHOU Weihua, XU Ji rong, SUN Cuici,  
ZHANG Fengqing, XU Hongzhou, ZHANG Jianlin

(South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, LED laboratory, Guangzhou 510301, Guangdong, China)

**Abstract:** Surface seawater environmental parameters in northern South China Sea, including temperature, salinity, macro-nutrient ( i.e.  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{SiO}_4$ , and  $\text{PO}_4$ ), dissolved oxygen, and pH levels were investigated in September and October, 2004, their distributions were characterized and the relationships among these parameters were analyzed. It was found that most of these factors distributed in patchness, and the west water body is obviously different from the east in terms of these parameters. The dissolved oxygen and pH have opposite distribution to the water temperature. Chl a can be regressed linearly to these factors, which suggested that the growth and development of phytoplankton in northern South China Sea is the overall effects of these factors. However, Chl a is most linearly closed to the contents of  $\text{NO}_2$  in the surface seawater of northern South China Sea, which suggested that the growth and development of phytoplankton is related tightly to  $\text{NO}_2$  levels there.

**Keywords:** Northern South China Sea; Dissolved oxygen; nutrient; Chl a