

长江口及毗邻海域浮游植物的分布与变化

李云¹, 李道季^{1*}, 唐静亮², 王益鸣², 刘志刚², 丁平兴¹, 何松琴²

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 舟山海洋生态环境监测站, 舟山 316000)

摘要: 2005 年 7 月(夏季)和 11 月(秋季)在长江口及毗邻海域(29°30' ~ 32°00'N, 123°E 以西)进行了 2 个航次的综合调查. 2 个航次共鉴定浮游植物 345 种, 包括赤潮种类 43 种, 其中, 赤潮种中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)是该海域绝对的优势种. 浮游植物细胞平均丰度 7 月($5.48 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)低于 11 月($2.70 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$), 而叶绿素 a 平均浓度 7 月($2.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)高于 11 月($1.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). 多样性指数(H)均值 7 月(1.51)高于 11 月(0.86), 均匀度(J)均值 7 月(0.59)也高于 11 月(0.34). 浮游植物的空间分布具有明显的块状区域特征, 其季节变化主要受海区的流系特征、季风、营养盐、悬浮物等因素的制约, 周日变化主要与潮汐、温盐跃层等密切相关. 同时, 结合历史监测数据(1996 ~ 2005 年)分析表明, 调查海域浮游植物群落结构已经发生改变. 长期氮磷比失衡导致甲藻类在浮游植物群落中所占比例大幅攀升, 甲藻类赤潮频繁发生. 要改善海域环境现状, 相对于控制西部陆源污染物的输入量, 控制输入的营养盐比例尤为重要.

关键词: 浮游植物; 叶绿素 a; 长江口

中图分类号: X17; Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)04-0719-11

Phytoplankton Distribution and Variation in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Sea

LI Yun¹, LI Dao-ji¹, TANG Jing-liang², WANG Yi-ming², LIU Zhi-gang², DING Ping-xing¹, HE Song-qin²

(1. State Key Laboratory of Estuary and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Zhoushan Marine Ecology Environmental Monitoring Station, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Two cruises were carried out in the Yangtze River Estuary and its adjacent sea (29°30' ~ 32°00'N, west of 123°E) in July (summer) and November (autumn), 2005. A total of 345 phytoplankton species, including 43 species causing red tide, were identified. *Skeletonema costatum* was the dominant species. The average cell abundance was lower in July ($5.48 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) than in November ($2.70 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$), but the average chlorophyll a concentration was higher in July ($2.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) than in November ($1.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). The average diversity index (H) was higher in July (1.51) than in November (0.86), as was average evenness (J) (0.59 and 0.34, respectively). Spatial distribution of phytoplankton featured distinct regionality, and the seasonal variation was controlled by factors such as water source, monsoon, nutrient, suspended matter, etc., and the diurnal variation mainly correlated with tide and stratification. At the same time, an evaluation of long-term monitoring data (1996 ~ 2005) showed that phytoplankton community structure had been changed. Long-term unbalance of N/P ratio caused dinoflagellates to increasingly dominate the phytoplankton population, and led to an increasing frequency of red tide caused by dinoflagellates. Controlling nutrient ratios is more important than just controlling terrigenous contamination input in improving sea area environmental status.

Key words: phytoplankton; chlorophyll a; Yangtze River Estuary

随着长江流域经济发展和人口增加, 大量污染物经长江、钱塘江等河流直接排入东海, 再加上海洋养殖、海上倾废、海洋运输及海洋勘探开采等所造成的污染, 致使长江口及毗邻海域成为我国近岸海域污染最严重的水域之一. 在过去的 20 a, 长江口及毗邻海域有关浮游植物的研究已经广泛开展^[1~9]. 研究结果显示, 赤潮的发生面积和次数明显上升. 1987 ~ 1988 年, 赤潮发生面积平均小于 2 000 km², 1990 年约 7 000 km², 2000 年已经超过 7 000 km²; 80 年代以前记录的赤潮发生次数为 4 次, 80 年代共发生 13 次, 90 年代上升至 38 次, 2000 ~ 2004 年共 5 a 的时间内就出现了 57 次. 长江口海域, 已有记录的浮游植物赤潮种达 92 种. 因此, 强化海域富营养化的监控

和实现赤潮的减灾已迫在眉睫.

笔者对长江口及其邻近海域进行了夏、秋 2 个季节的生物、化学、物理水文等因素的综合调查, 调查范围为 29°30' ~ 32°00'N, 123°E 以西海域, 面积约 3.8 万 km². 通过这些调查研究, 增加对该区生态系统结构和功能的了解, 掌握现有的和潜在的主要生态环境问题, 以期制定生态保护措施提供科学的依据和参数. 基于监测结果, 本研究分析了该海域浮游植物的分布和变化, 探讨了影响叶绿素 a 浓度分

收稿日期: 2006-06-09; 修订日期: 2006-08-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412405); 国家环境保护总局项目

作者简介: 李云(1979 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋微生物, E-mail: salixly@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: daojili@sklec.ecnu.edu.cn

布与变化的水动力因子,并结合历史监测数据,对该海域浮游植物群落结构作出评价。

1 调查与方法

在长江口及毗邻海域共设 49 个走航站位和 12 个同步连续站位(图 1),于 2005 年夏季(7 月)和秋季(11 月)进行 2 个航次的调查.根据海域的自然特征,49 个走航站位可分别划归为长江口(站位 1~23)、杭州湾(站位 24~29)、舟山群岛(站位 30~49) 3 个区域。

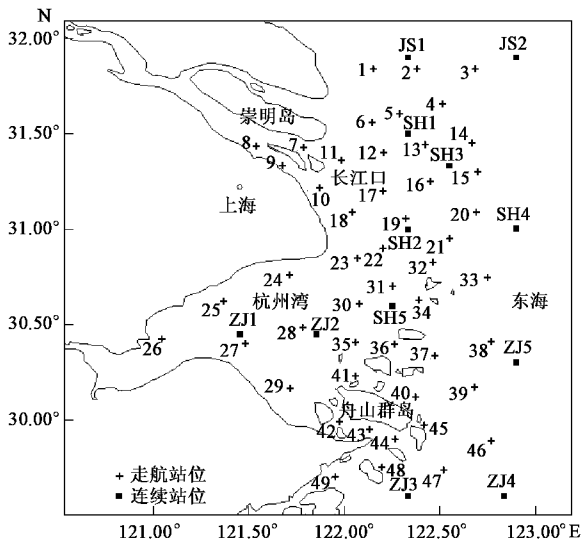


图 1 监测站位分布

Fig. 1 Locations of monitoring stations

走航站位仅采取表层(水面下 0.5 m)水样进行监测.监测项目为:水温、盐度、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、pH、悬浮物、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、无机氮(硝酸氮、亚硝酸氮、氨氮)、活性磷酸盐、活性硅酸盐、叶绿素 a、浮游植物和浮游动物的种类、丰度。

连续站位依据实测水深统一采取表(水面下 0.5 m)、中(1/2 水深)、底(海床底以上 0.5 m)3 层水样,分别在大、小潮时(其中 6 个站点只作大潮观测)进行 26 h 监测,每 3 h 采样 1 次.监测项目是:水温、盐度、DO、pH、悬浮物、COD、无机氮、活性磷酸盐、活性硅酸盐、叶绿素 a。

样品的采集、预处理、分析与鉴定均按《海洋监测规范》(GB 17378.1~7-1998)和相关标准方法进行,并实行全程监测质量控制。

富营养化指数(EI)、浮游植物多样性指数(H)和均匀度(J)分别采用邹景忠、Shannon-Wiener 和

Pielou 提出的计算式^[10~12]:

$$EI = c_{\text{COD}} \times c_{\text{DIN}} \times c_{\text{DIP}} / 4500$$

$$H = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

$$J = H / \log_2 S$$

式中, c_{COD} 是 COD 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_{DIN} 是溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)浓度($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); c_{DIP} 是溶解无机磷(dissolved inorganic phosphorus, DIP)浓度($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); S 为样品中的种类总数; N 为样品中的总个体数; n_i 为样品中第 i 种的个体数。

2 结果与分析

2.1 走航监测

2.1.1 浮游植物种类

夏、秋 2 季共鉴定浮游植物 7 门 35 科 95 属 345 种,包括赤潮种类 43 种,其中,硅藻占绝对优势,甲藻为次优势种群(表 1).3 个海区中,长江口与舟山群岛出现种类数量相近,杭州湾最少(表 2)。

表 1 浮游植物种类组成

Table 1 Phytoplankton species composition

季节	硅藻	甲藻	金藻	蓝藻	绿藻	裸藻	隐藻	总计
夏季	148	40	2	7	5	1	0	203
秋季	203	65	2	14	11	2	1	298
合计	242	69	2	17	12	2	1	345

调查海域浮游植物种类组成按其生态特征,可划分为 3 个生态类群:近岸广温广盐种,是主要优势类群,不同季节其种类和数量均占绝对的优势地位,遍布整个调查海域,代表种有中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、琼氏园筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)、有棘园筛藻(*Coscinodiscus spinosus*)、中华盒形藻(*Biddulphia sinensis*)等;近岸广温低盐和半咸水种,为次优势类群,不同季节均出现较多,主要在河口、内湾及盐度较低的区域分布,代表种有颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、具槽直链藻(*Melosira sulcata*)、红海束毛藻(*Trichodesmium erythraeum*)、辐射园筛藻(*Coscinodiscus radiatus*)、极大螺旋藻(*Spirulina maxima*)等;亚热带及热带暖水性种,夏季期间随台湾暖流的影响分布较为普遍,秋季相对较少,代表种有奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)、纺锤角藻(*Ceratium fusus*)、印度翼根管藻(*Rhizosolenia alata f. indica*)、柔弱拟菱形藻(*Pseudonitzschia delicatissima*)等。

2.1.2 浮游植物多样性指数和均匀度

表 2 不同海区浮游植物监测结果汇总

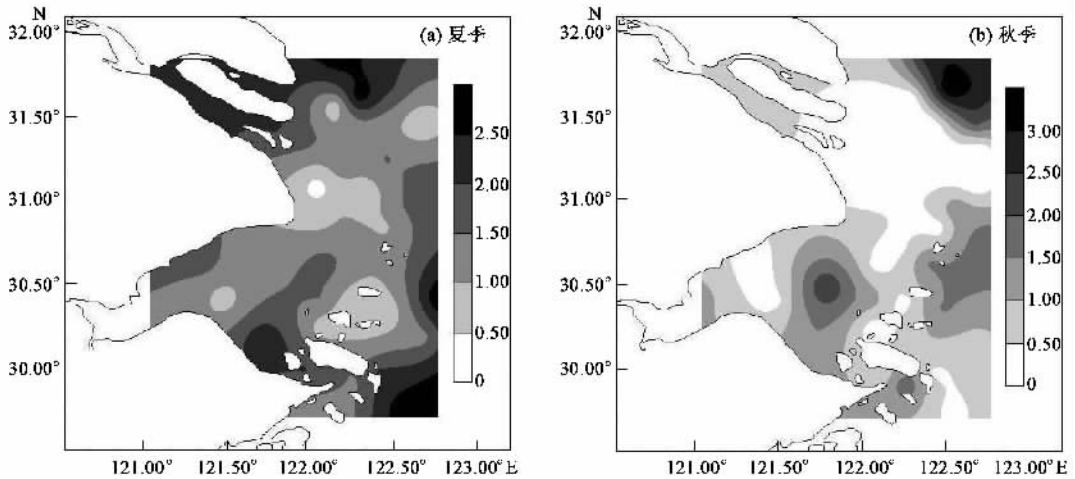
Table 2 Summary of phytoplankton data monitored in different areas

季节	项目	全海域		长江口	杭州湾	舟山群岛
		数值	范围			
夏季	叶绿素 a/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	2.34 (均值)	0.64 ~ 11.90	2.62 (均值)	2.15 (均值)	2.09 (均值)
	细胞丰度/ $\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$	5.48×10^4 (均值)	$1.00 \times 10^4 \sim 5.10 \times 10^5$	8.94×10^4 (均值)	1.69×10^4 (均值)	2.64×10^4 (均值)
	中肋骨条藻/ $\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$	3.69×10^4 (均值)	$6.40 \times 10^3 \sim 4.50 \times 10^5$	6.25×10^4 (均值)	0.89×10^4 (均值)	1.36×10^4 (均值)
	种类	203		161	100	161
	H	1.51 (均值)	0.50 ~ 3.01	1.48 (均值)	1.48 (均值)	1.56 (均值)
	J	0.59 (均值)	0.14 ~ 0.93	0.56 (均值)	0.62 (均值)	0.61 (均值)
	赤潮种	35		24	13	21
秋季	叶绿素 a/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.32 (均值)	0.51 ~ 3.35	1.41 (均值)	1.85 (均值)	1.05 (均值)
	细胞丰度/ $\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$	2.70×10^5 (均值)	$2.92 \times 10^3 \sim 3.45 \times 10^6$	5.00×10^5 (均值)	4.87×10^4 (均值)	7.09×10^4 (均值)
	中肋骨条藻/ $\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$	2.56×10^5 (均值)	$1.67 \times 10^3 \sim 3.43 \times 10^6$	4.68×10^5 (均值)	4.41×10^4 (均值)	5.80×10^4 (均值)
	种类	298		190	105	212
	H	0.86 (均值)	0.02 ~ 3.48	0.73 (均值)	1.13 (均值)	0.92 (均值)
	J	0.34 (均值)	0.01 ~ 0.95	0.29 (均值)	0.43 (均值)	0.39 (均值)
	赤潮种	39		22	14	25

2 季浮游植物多样性指数(H)都很低(表 2). 在不同海区, 夏季 H 均值都大于秋季. 秋季 H 值变幅范围较夏季大. 2 季 H 值平面分布模式见图 2. 夏季出现在长江口北部的高值区(> 2.00), 秋季位置向东南移动; 夏季舟山群岛东、西侧的高值区

(> 2.00), 秋季时基本消失; 夏季零星分布的低值区(< 1.00), 秋季时范围明显扩大, 特别是长江口区, 绝大部分海域小于 0.50.

2 季浮游植物均匀度(J)也很低(表 2), 其平面分布模式与 H 极为相似(图 3).

图 2 夏、秋季表层浮游植物多样性指数(H)的分布Fig. 2 Distribution of phytoplankton diversity index (H) at surface layer in summer and autumn

2.1.3 浮游植物细胞丰度

调查海域浮游植物细胞丰度季节变化显著, 夏季细胞丰度均值明显小于秋季, 而秋季细胞丰度变幅范围较夏季大(表 2). 各海区中, 长江口细胞丰度最高, 季节变化也最大(表 2). 长江口的高值区域, 秋季较夏季面积有所扩大, 位置稍微南移; 舟山群岛东南侧, 秋季出现 1 块高值区, 见图 4.

2 季调查期间, 中肋骨条藻丰度变化很大, 但都是绝对的优势种(表 2). 夏季, 中肋骨条藻平均丰度

为 $3.69 \times 10^4 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$, 占总平均细胞丰度的 67%. 长江口中肋骨条藻所占比例最高, 达 70%; 杭州湾与舟山群岛所占比例略低, 分别占 53% 和 52%. 秋季, 中肋骨条藻平均丰度为 $2.56 \times 10^5 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$, 占总平均细胞丰度的 95%. 3 个海区中, 中肋骨条藻所占比例均较高, 长江口占 94%, 杭州湾占 91%, 舟山群岛占 82%. 可见, 调查海域浮游植物细胞丰度的变化, 主要取决于优势种中肋骨条藻的变化. 中肋骨条藻是支配该海域浮游植物数量的关键种.

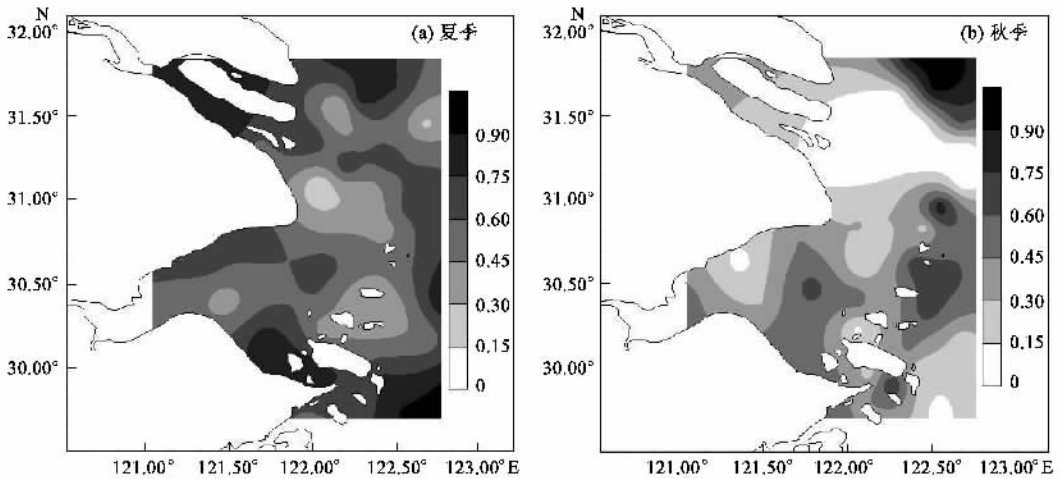


图3 夏、秋季表层浮游植物均匀度(J)的分布

Fig.3 Distribution of phytoplankton evenness (J) at surface layer in summer and autumn

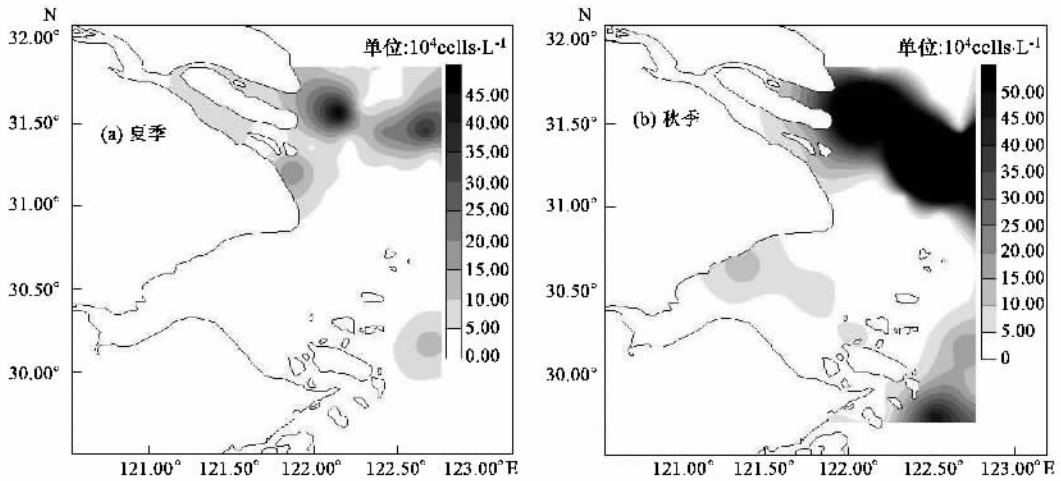


图4 夏、秋季表层浮游植物细胞丰度的分布

Fig.4 Distribution of phytoplankton cell abundance at surface layer in summer and autumn

2.1.4 叶绿素 a

夏秋2季叶绿素 a 浓度变化明显,夏季浓度均值明显高于秋季(表2)。如图5所示,叶绿素 a 浓度平面分布呈现明显的块状区域特征,2季叶绿素 a 浓度的极值区域也有所变化。夏季,叶绿素 a 浓度高值区主要分布于长江口和舟山群岛外侧海域(122.50°E以东),浓度多在 $3.00 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,舟山群岛本部是低值区,浓度小于 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;秋季,长江口的高值区相对西移,多块低值区出现;舟山群岛外侧的高值区消失,低值区面积扩大。

2.2 连续监测

叶绿素 a 浓度的连续监测结果(表3)表明,一般地,同一站点的相同水层,大潮时叶绿素 a 浓度均

值都大于小潮时(秋季 JS1、SH1 站个别层次除外);夏季叶绿素 a 浓度均值都要大于秋季(JS2 站除外);在整个潮周期内,叶绿素 a 浓度的变幅范围很大。和大面调查结果相比,夏、秋季连续站叶绿素 a 浓度极值分布区域与之非常一致。诸如长江口区的 SH4 站,夏季表层平均浓度为 $48.10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,达到赤潮浓度水平,所处海域正是大面高值区;秋季表层平均浓度为 $0.51 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,浓度较低,刚好位于大面分布的1个低值区。

夏季大潮时,叶绿素 a 浓度的垂直分布可以划分为3种类型。一是表、中、底层分布基本均匀型,SH1、SH2、ZJ1、ZJ2、ZJ3、JS1 站各层叶绿素 a 浓度基本一致,见图6(a)。这些站位水深小,流速大,水体

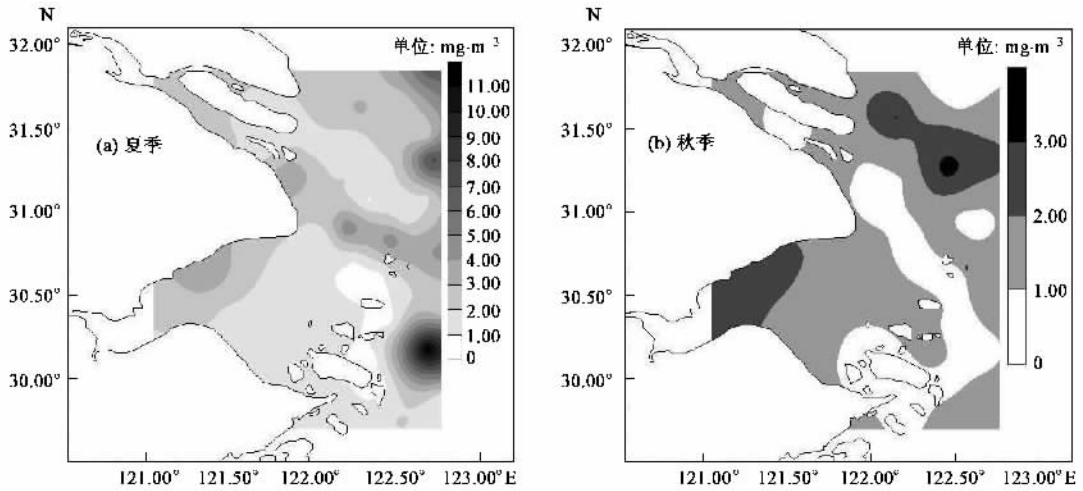


图5 夏、秋季表层叶绿素 a 浓度的分布

Fig.5 Distribution of Chl-a concentration at surface layer in summer and autumn

混合充分;二是表层大于下层的递降型,SH3、SH4、ZJ4、ZJ5、JS2 站垂直分层现象明显,均为表层大于中、底层,见图 6(b).这些站离岸较远,水较深,受潮汐影响较小;三是表层小于下层的递增型,SH5 站表层和中层浓度比较接近,但都小于底层,见图 6(c).

表3 连续站叶绿素 a 浓度的均值和变化范围

Table 3 Means and ranges of Chl-a concentration monitored at anchor stations

站点	水深/m	潮时	均值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$						范围/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$					
			表层		中层		底层		表层		中层		底层	
			夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季	夏季	秋季
JS1	~16	大潮	2.11	0.60	1.50	0.73	1.66	0.65	0.74~3.73	0.31~0.83	0.89~2.21	0.36~1.27	1.05~2.33	0.27~1.01
		小潮	1.59	0.94	1.17	0.66	1.07	0.75	0.60~4.28	0.65~1.46	0.82~1.42	0.38~0.83	0.55~1.65	0.53~1.02
SH1	~12	大潮	2.70	0.60	2.00	0.61	2.55	0.85	1.08~5.13	0.17~1.53	0.98~2.57	0.18~0.90	1.60~3.30	0.18~1.42
		小潮	1.95	1.79	1.75	0.79	1.58	0.68	0.90~4.10	0.71~2.78	0.88~3.08	0.53~1.47	0.75~2.29	0.47~1.00
SH2	~8	大潮	4.91	0.95	3.40	1.17	5.15	1.47	1.31~10.04	0.43~1.73	1.67~5.04	0.52~2.51	2.15~8.94	0.58~2.57
		小潮	2.21	1.06	2.05	0.70	3.27	0.88	0.78~8.11	0.44~3.29	1.18~3.14	0.50~0.97	1.83~7.35	0.49~1.57
SH5	~14	大潮	0.79	0.42	0.86	0.62	2.08	0.92	0.41~1.69	0.18~1.28	0.42~1.87	0.12~1.22	0.43~4.37	0.27~2.11
		小潮	1.15	0.56	0.79	0.44	0.97	0.71	0.75~3.02	0.28~1.33	0.41~1.16	0.31~0.77	0.60~1.74	0.50~1.35
ZJ1	~8.5	大潮	1.10	0.74	0.82	1.19	1.09	0.97	0.38~3.18	0.11~1.45	0.25~1.47	0.52~3.20	0.63~1.63	0.07~2.42
		小潮	1.23	0.77	0.88	0.53	0.79	0.60	0.37~1.83	0.41~2.00	0.56~1.33	0.04~1.13	0.38~1.53	0.35~0.90
ZJ2	~9	大潮	1.27	0.56	0.94	0.58	0.93	0.57	0.56~2.84	0.15~0.76	0.44~1.23	0.28~0.81	0.59~1.29	0.39~1.05
		小潮	1.06	0.26	0.91	0.26	0.86	0.38	0.67~1.75	0.04~0.64	0.45~1.94	0.05~0.49	0.50~1.81	0.13~0.62
JS2	~35	大潮	0.49	0.76	0.41	0.54	0.26	0.57	0.31~1.07	0.41~1.98	0.14~1.89	0.16~0.97	0.15~0.49	0.35~0.84
SH3	~28	大潮	3.27	1.76	0.62	0.39	0.97	0.62	0.77~4.94	0.52~3.77	0.44~0.87	0.31~0.50	0.56~1.61	0.25~1.01
SH4	~37	大潮	48.10	0.51	0.47	0.24	0.96	0.41	11.34~74.19	0.23~0.95	0.07~1.18	0.09~0.51	0.39~1.76	0.08~0.87
ZJ3	~11	大潮	1.06	0.40	1.11	0.62	1.12	0.65	0.65~1.27	0.15~1.04	0.57~1.81	0.29~1.10	0.75~1.52	0.19~1.10
ZJ4	~30	大潮	1.63	0.88	0.83	0.52	1.07	0.48	1.11~2.32	0.34~2.08	0.42~1.87	0.07~1.03	0.43~2.05	0.32~0.74
ZJ5	~45	大潮	1.10	0.83	0.38	0.35	0.93	0.46	0.21~2.01	0.36~1.30	0.16~0.83	0.12~0.77	0.44~1.79	0.19~0.71

3 讨论

3.1 影响叶绿素 a 浓度分布和变化的水动力因子

由于局部海域的地理环境、水动力条件等自然

特征以及人类活动影响的差异,浮游植物的时空变化在局部海域存在着差别.从图 7 可以看出,调查海域的水文结构主要与长江径流、东南部高盐的台湾暖流、东北部高盐的黄海入侵水团等有着密切关系.

小潮时,监测诸站(JS1、SH1、SH₂、SH5、ZJ1、ZJ2)离岸较近,水体混合比较严重,叶绿素 a 浓度表、中、底层相差不大,见图 6(d).秋季时,叶绿素 a 浓度的垂直分布模式较夏季时复杂,大、小潮时不同站点的分布情况见图 6(e)~6(j).

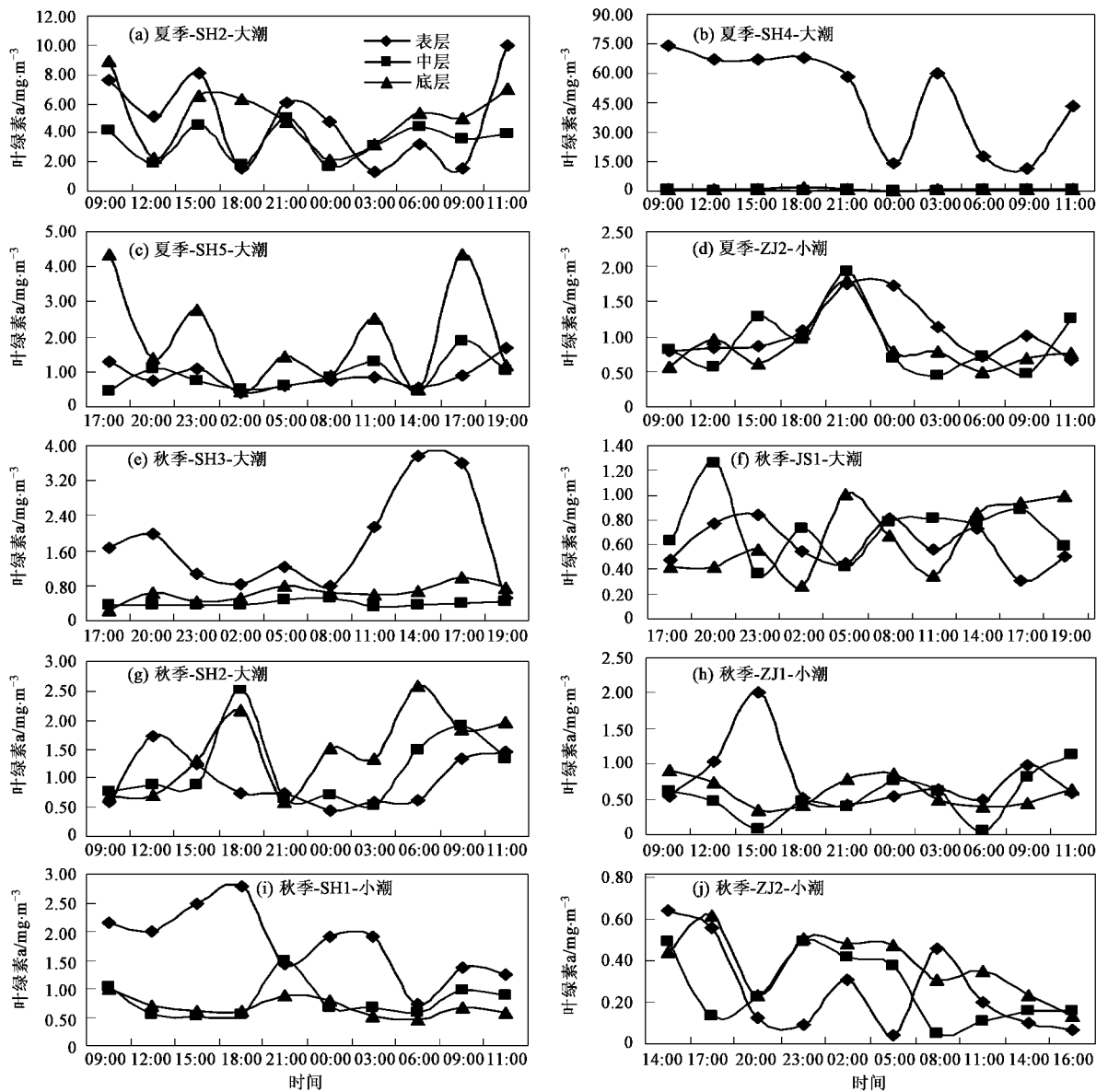


图6 叶绿素 a 浓度的垂直分布 (代表站点)

Fig.6 Vertical distribution of Chl-a concentration (representative stations)

夏季,长江冲淡水出口门后,冲淡水在台湾暖流和偏南风作用下,主轴转朝东北方向扩展;秋季,随着偏北风的增强,主轴开始朝东南方向偏转(图7和图8)。夏季监测期间(2005-07),大通站长江径流的月平均流量是 $40\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,秋季期间(2005-11)是 $23\ 900\ \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,11月径流量小于7月径流量。因此,长江冲淡水扩展区域11月较7月相对内收,与长江冲淡水扩展方向一致的叶绿素 a 高值区秋季较夏季也有所内移。

在长江冲淡水扩及的海域,呈现出很强的盐度梯度,在其边缘的水平方向形成盐度锋,而在垂直方向,低盐的冲淡水通常只浮置于表层 10 m 以内,其

下为极强的盐度跃层^[13]。夏季,长江径流水温比海水温度高,冲淡水入海后仍以高温的形式体现,水温垂向变化较大,形成温度跃层。温盐跃层的形成,有利于水体的稳定。在这样较为稳定的水体状况下,浮游植物在真光层中的平均滞留时间会延长,再加上冲淡水中富含大量的溶解营养盐,有利于浮游植物生长,引发赤潮(如 SH4 站)^[7,14]。有无温盐跃层存在的海区,叶绿素 a 的垂直分布、昼夜变化不同^[5,8]。潮流混合作用强烈的近岸海域,表、中、底层叶绿素 a 浓度基本一致,昼夜变化不明显。存在温盐跃层的海区中,叶绿素 a 的垂直变化明显,表层叶绿素 a 浓度较高,昼夜变化幅度较大。表层的峰值,白昼期间较

高,夜间较低,而底层则夜间较高,白昼较低,这与浮游植物的昼夜垂直移动有关.此外,特殊站点如SH5,它的表层含沙量不大,夏季大潮时平均为 $0.0252\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,小潮时平均为 $0.0383\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,秋季大、小潮时相应的值分别是 $0.0554\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.1066

$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,但由于该站流速较大,底层含沙量较高,底层与表层的含沙量比值明显偏大,夏季大潮期间比值为20,小潮期间为10.5,秋季比值大潮为25,小潮为15.底层流把底层沉积物中的底栖藻类搅动起来,故而该站点底层叶绿素a浓度多高于表层.

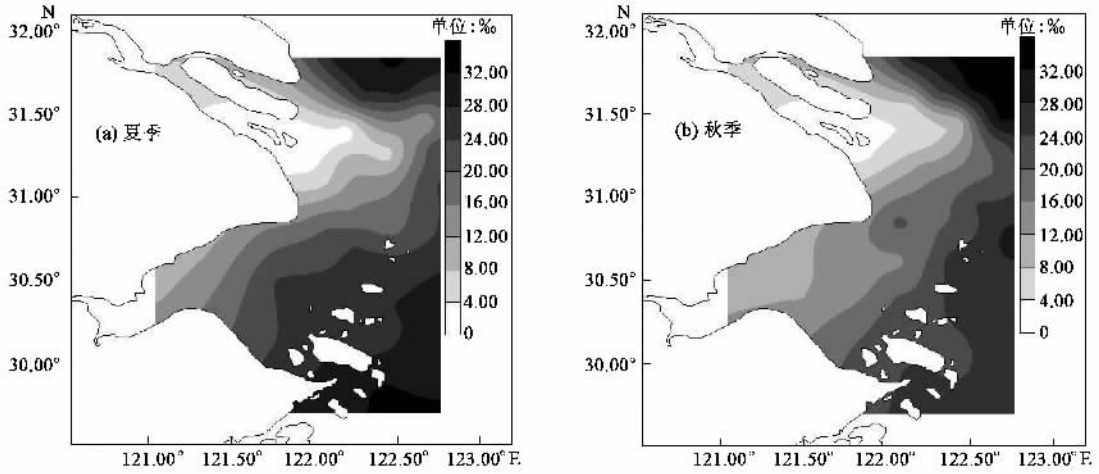


图7 夏、秋季表层盐度的分布

Fig.7 Distribution of salinity at surface layer in summer and autumn

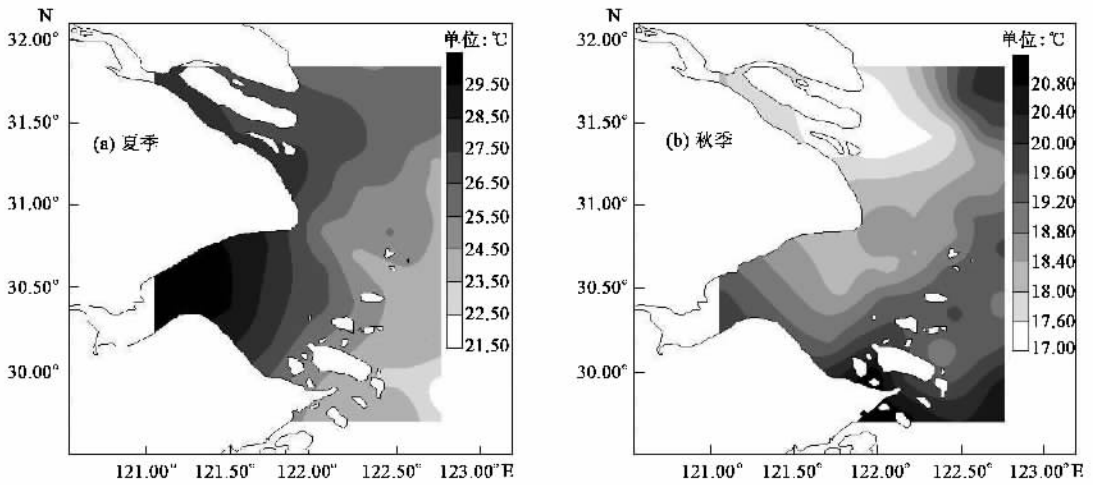


图8 夏、秋季表层水温的分布

Fig.8 Distribution of water temperature at surface layer in summer and autumn

已有研究表明,无论夏季还是冬季,长江入海悬浮物总是向东南方运输;冬季由于再悬浮作用显著,悬浮物浓度明显高于夏季^[15].此次走航调查显示,夏、秋季长江入海悬浮物也都是向东南方运输,秋季悬浮物浓度明显高于夏季,2季的平面分布模式基本相似(图9).悬浮物直接影响了海水真光层的深度,在很大程度上决定了长江口及其邻近海域叶绿素a浓度的分布,总体上悬浮物低值区叶绿素a浓

度相对较高.

夏季,调查海区的东南部受高盐的台湾暖流影响较为明显.此时,浙江近岸一带为江浙沿岸流控制.在沿岸流的东侧,是终年东北向流动的台湾暖流.在沿岸流与台湾暖流侧向相遇之处,侧向混合较强.浙江沿岸上升流就是在这样复杂的自然环境条件下形成的,是地形、海流、风等诸多因素综合作用的结果^[13].舟山群岛东侧叶绿素a浓度的高值区,

与东南角水温低值区二者位置的配置,恰好说明了该上升流区与叶绿素 a 浓度高值区之间的关系.

秋季,偏北风增强,调查海区东北部的黄海高盐水团进一步南侵,其影响海域营养盐含量较低(图 10~12),浮游植物生长受到限制,故而该海域处于

叶绿素 a 浓度的低值区.

综上所述,调查海区的流系特征、季风、营养盐、悬浮物等是制约叶绿素 a 空间分布和季节变化的主要因素,而叶绿素 a 的周日变化则主要与潮汐、温盐跃层等密切相关.

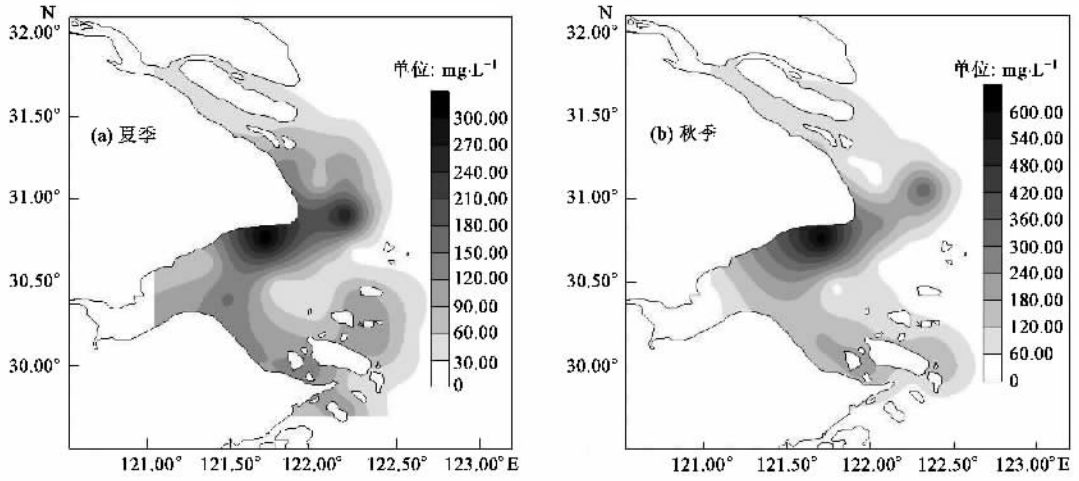


图 9 夏、秋季表层悬浮物的分布

Fig.9 Distribution of suspended matter at surface layer in summer and autumn

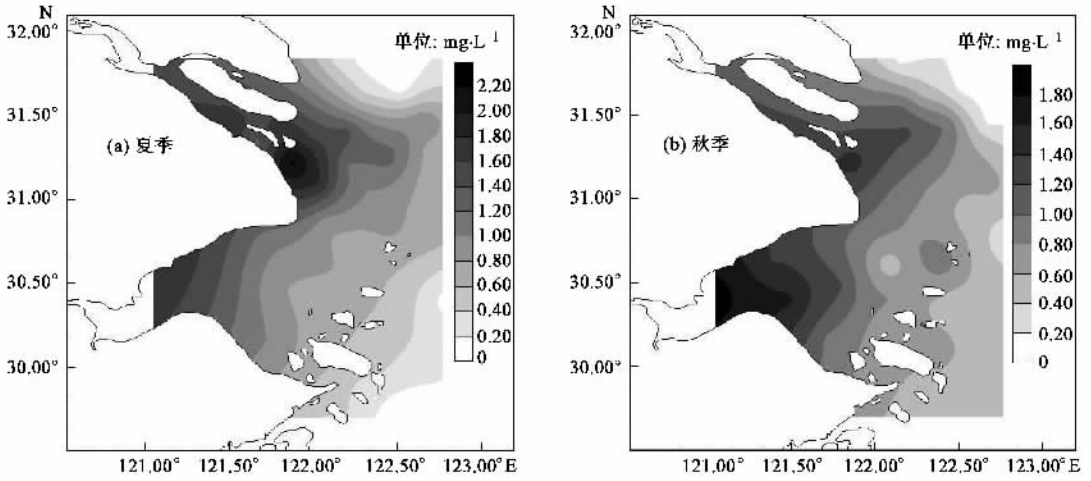


图 10 夏、秋季表层无机氮的分布

Fig.10 Distribution of inorganic nitrogen at surface layer in summer and autumn

3.2 浮游植物群落结构评价

调查海域各项浮游植物监测指标季节变化大,尤其是长江口区,优势种中肋骨条藻的数量波动决定了整个海域浮游植物数量的动态变化,它的分布状况决定了海域浮游植物平面分布格局.虽然,秋季浮游植物种类较夏季有所增加,但由于中肋骨条藻所占比例增大,多样性指数 H 却减小.夏季,调查海域受台湾暖流影响显著,富营养化指数 EI (均值

6.44)小于秋季(均值 8.61),夏季水质要优于秋季,浮游植物群落结构相对也要优于秋季.

监测海域主要营养盐无机氮,磷酸盐和硅酸盐平面分布呈现从近岸向外海递减的趋势(图 10~12),说明该海域营养盐主要由沿岸入海河流所贡献.大量的营养盐输入水体中,会减少浮游植物营养限制因子数量,增加浮游植物种间竞争压力,从而导致浮游植物群落结构改变,单种优势度增高^[16,17].长

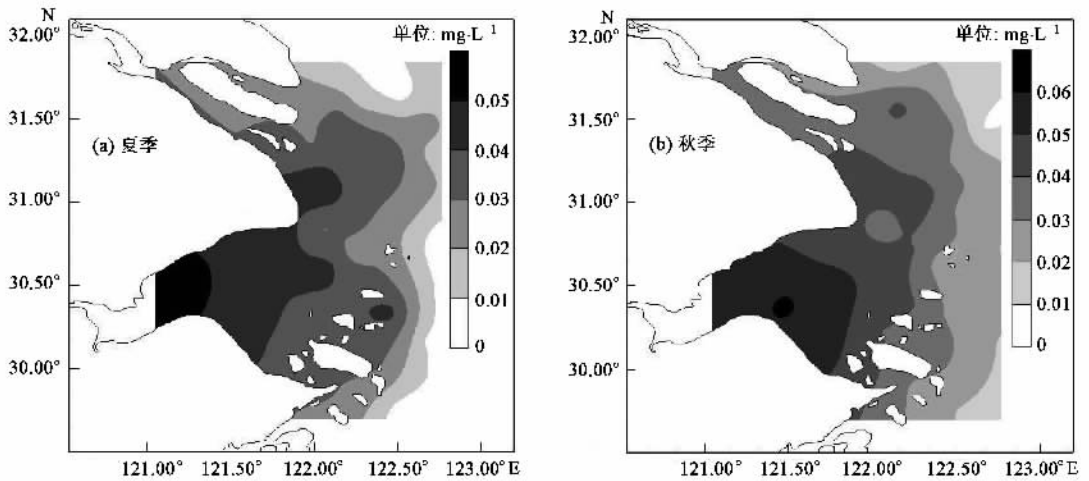


图 11 夏、秋季表层磷酸盐的分布

Fig. 11 Distribution of phosphate at surface layer in summer and autumn

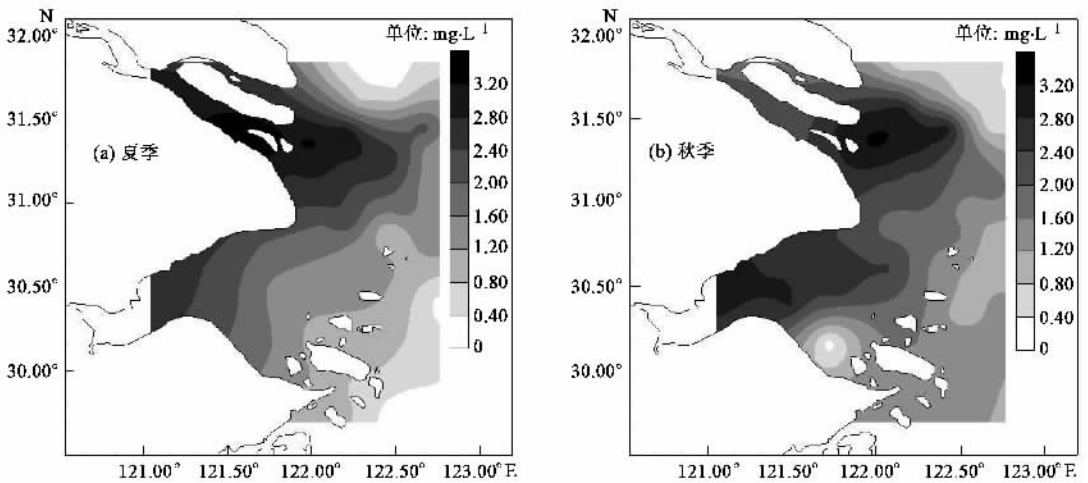


图 12 夏、秋季表层硅酸盐的分布

Fig. 12 Distribution of silicate at surface layer in summer and autumn

期的历史监测数据表明,在最近 10 a,长江口及毗邻海域浮游植物群落结构已发生明显变化.浮游植物的甲藻种类组成比例和密度比例均呈现明显上升趋势,而硅藻密度正处于下降过程,见图 13(a)~13(c).虽然浮游植物种类呈现上升趋势,见图 13(d),但其主要原因与浮游植物的甲藻种类数量明显上升有关.以小型甲藻为代表的种类数量明显增加,种类间的数量分布却不均匀,所以浮游植物多样性呈现下降的趋势,见图 13(e).长江口及毗邻海域浮游植物群落结构的改变,与无机氮的严重超标有关^[18].舟山群岛氮磷比高于 30,全海域在 50 左右,长江口和杭州湾高于 50,见图 13(f),远大于 Redfield 比值 16.无机氮过量使氮磷比严重失衡,使具有光

合性和非光合性营养方式的甲藻类在浮游植物群落中所占比例大幅攀升,细胞体积由大变小和产毒种类增加^[19~21].赤潮生物种类也发生了明显变化,甲藻类赤潮比例增加,见图 14.因此,要改善海域环境现状,相对于控制西部陆源污染物的输入量,控制输入的营养盐比例尤为重要^[22,23].

4 结论

(1) 夏、秋 2 季对长江口及毗邻海域的调查中,共鉴定浮游植物 345 种,包括赤潮种类 43 种,其中,赤潮种中肋骨条藻是该海域绝对的优势种.浮游植物细胞平均丰度夏季($5.48 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)低于秋季($2.70 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$),而叶绿素 a 平均浓度夏季

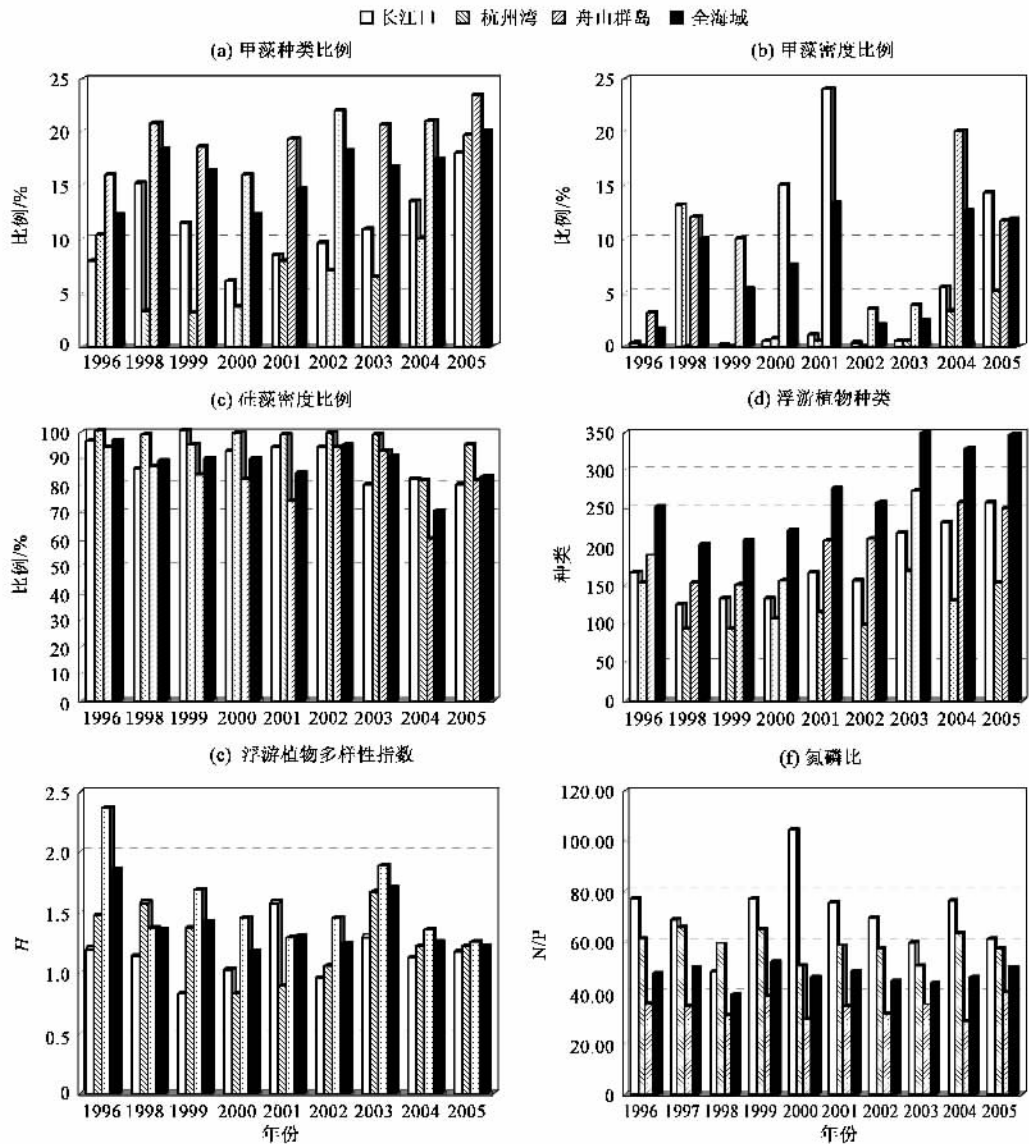


图 13 调查海域 1996~2005 年监测数据的变化

Fig. 13 Variation of monitoring data from 1996 to 2005 in investigated areas

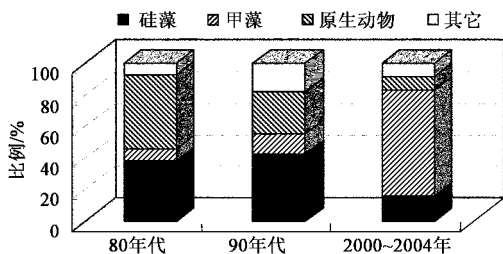


图 14 赤潮发生种类的变化

Fig. 14 Variation of red tide causative species composition

($2.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 高于秋季 ($1.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。多样性指数均值夏季 (1.51) 高于秋季 (0.86)，均匀度均值夏季 (0.59) 也高于秋季 (0.34)。

(2) 长江口及毗邻海域浮游植物的空间分布具有明显的块状区域特征，其季节变化主要受海区的流系特征、季风、营养盐、悬浮物等因素的制约，周日变化主要与潮汐、温盐跃层等密切相关。

(3) 近 10 a 来，长江口及毗邻海域浮游植物群落结构已发生明显变化。长期氮磷比失衡导致甲藻类在浮游植物群落中所占比例大幅攀升，甲藻类赤潮频发，物种多样性下降。要改善海域环境现状，控制陆源输入的营养盐比例尤为重要。

参考文献:

- [1] Gao X L, Song J M. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50: 327~335.

- [2] 周伟华,袁翔城,霍文毅,等. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布[J]. 海洋学报,2004,26(3):143~150.
- [3] 王金辉,黄秀清,刘阿成,等. 长江口及邻近水域的生物多样性变化趋势分析[J]. 海洋通报,2004,23(1):32~39.
- [4] 吴玉霖,傅月娜,张永山,等. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关系[J]. 海洋与湖沼,2004,35(3):246~251.
- [5] 林学举,黄邦钦,洪华生,等. 东、黄海典型海域叶绿素 a 含量的垂向变化与周日波动[J]. 海洋科学,2002,26(11):57~63.
- [6] 王金辉. 长江口邻近水域的赤潮生物[J]. 海洋环境科学,2002,21(2):37~41.
- [7] 浦薪明,吴玉霖,张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 II. 春季的营养限制情况[J]. 海洋学报,2001,23(3):57~65.
- [8] 夏滨,吕瑞华,孙丕喜. 2000 年秋季黄、东海典型海区叶绿素 a 的时空分布及其粒径组成特征[J]. 黄渤海海洋,2001,19(4):37~42.
- [9] 王金辉,王伟斐,吴振南,等. 东海特定海区浮游植物群落的分布与环境因子的关系[J]. 海洋学报,2000,22:286~292.
- [10] 邹景忠. 渤海富营养化和赤潮问题初探[J]. 水生生物学,1985,127:27~30.
- [11] Shannon C E, Wiener W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949. 125.
- [12] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10: 370~383.
- [13] 苏纪兰,袁业立. 中国近海水文[M]. 北京:海洋出版社,2005.245~249.
- [14] Koseff J R, Holen J K, Monismith S G, et al. Coupled effects of vertical mixing and benthic grazing on phytoplankton populations in shallow, turbid estuaries[J]. Journal of Marine Systems, 1993, 51: 843~868.
- [15] 庞重光,王凡,白学志,等. 夏、冬 2 季长江口及邻近海域悬浮物的分布特征及其沉积量[J]. 海洋科学,2003,27(12):31~35.
- [16] Duarte P, Macedo M F, Fonseca L C. The relationship between phytoplankton diversity and community function in a coastal lagoon [J]. Hydrobiologia, 2006, 555: 3~18.
- [17] Interlandi S J, Kilham S S. Limiting resources and regulation of diversity in phytoplankton communities[J]. Ecology, 2001, 82(5): 1270~1282.
- [18] 国家海洋局. 20 世纪末中国海洋环境质量公报[R]. 北京:海洋出版社,2000.26.
- [19] 宁修仁,史君贤,蔡昱明,等. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应[J]. 海洋学报,2004,26(6):96~106.
- [20] Skjoldal H R. Eutrophication and algal growth in the North Sea[A]. In: Proc Symp Mediterranean Sea 2000[C]. Italy, 1991.1~30.
- [21] Richardson K. Harmful or exceptional phytoplankton blooms in the marine ecosystem[J]. Advances in Marine Biology, 1997, 31: 301~385.
- [22] Sharp J H. Long-term nutrient trends and phytoplankton response in Delaware estuary, USA[M]. Dallas: Crown Press. 2003.
- [23] Yoshiyama K, Sharp J H. Phytoplankton response to nutrient enrichment in an urbanized estuary: apparent inhibition of primary production by overeutrophication[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51: 424~434.