

2006 年夏季南黄海浮游植物叶绿素 a 分布特征 及其环境调控机制

傅明珠^{1,2,3}, 王宗灵^{1,2,*}, 孙 萍^{1,2}, 李 艳^{1,2}, 李瑞香^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 海洋生态环境科学与工程国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;
3. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 根据 2006 年夏季南黄海生态调查资料, 分析了浮游植物现存量 (叶绿素 a) 的空间分布特征及其主要环境调控机制。结果表明: 南黄海浮游植物叶绿素 a 浓度范围为 0.07 ~ 12.17 mg/m³, 平均值为 1.42 mg/m³; 浮游植物叶绿素 a 平面分布呈近岸混合区高于外海层化区的特征, 总体上随水体盐度和营养盐梯度的变化而变化, 其中浅海陆架锋区对浮游植物有明显的聚集作用, 垂直结构中中层化区叶绿素次表层最大值现象明显, 且最大值的深度和量值具有明显的区域差异; 叶绿素 a 浓度与主要环境因子的相关性分析表明, 在较大空间尺度上营养盐是浮游植物的主要调控因子, 温度、光照和浮游动物摄食等也在一定空间和程度上对浮游植物的生长产生影响。

关键词: 南黄海; 叶绿素 a; 分布特征; 叶绿素次表层最大值; 潮汐锋

文章编号: 1000-0933(2009)10-5366-10 中图分类号: Q142, Q948.8, Q178.53 文献标识码: A

Spatial distribution characteristics and the environmental regulation mechanisms of phytoplankton chlorophyll a in Southern Yellow Sea during summer 2006

FU Ming-Zhu^{1,2,3}, WANG Zong-Ling^{1,2,*}, SUN Ping^{1,2}, LI Yan^{1,2}, LI Rui-Xiang^{1,2}

1 First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China

2 Key Laboratory of Science and Engineering for Marine Ecological Environment, SOA, Qingdao 266061, China

3 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5366 ~ 5375.

Abstract: We studied chlorophyll a distribution patterns and their relationship with important physico-chemical water properties based on the marine ecology investigation conducted in Southern Yellow Sea during the summer of 2006. The chlorophyll a concentration was in the range of 0.07 — 12.17 mg/m³ with a mean of 1.42 mg/m³. Spatial distribution of chlorophyll a generally reflected the variation gradients of salinity and nutrients, with high levels in the well mixed coastal zone and low levels in the stratified open sea region. Phytoplankton tended to be assembled near the tidal front area. Subsurface chlorophyll maximum was clearly observed and its depth was positively correlated with the transparency. Relationships between chlorophyll a concentration and the major environmental factors showed that nutrients availability was the dominant regulating factors of phytoplankton distribution at the large spatial scale, while temperature, light and zooplankton predation might also modulate the phytoplankton biomass in local regions.

Key Words: Southern Yellow Sea; chlorophyll a; distribution characteristics; subsurface chlorophyll maximum; tidal front

浮游植物是海洋生态系统最主要的初级生产者, 也是整个海洋食物链的起点和生物地化循环的重要环

基金项目: 中国近海海洋综合调查与评价专项资助项目(908-1-ST03); 国家重点基础研究前期研究专项资助项目(2002CCA04900)

收稿日期: 2008-06-25; 修订日期: 2009-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzl@fio.org.cn

节^[1]。浮游植物生物量和群落结构对于维持海洋生态系统的结构与功能具有重要意义。叶绿素 a 是浮游植物进行光合作用的主要色素,作为海洋生态学的基本参数,被认为是估算浮游植物现存量以及生产力水平的良好指标。确定世界海洋中浮游植物的时空分布规律及其演变的环境控制机理,是海洋生态系统结构与功能研究的重要组成部分。

南黄海是我国重要的陆架海区,由于其复杂的物理和生态环境,多年来一直是多学科综合研究的焦点。自 20 世纪 80 年代开始,我国对南黄海浮游植物开展了多次调查研究^[2-6],进行了有关物理过程对叶绿素 a 垂向分布结构和季节变化作用机理的数值模拟^[7,8],对南黄海浮游植物与初级生产力的分布有了基本了解。但是由于受到观测空间尺度、有限采样站点和同步测量参数的制约,目前对该海域浮游植物中尺度分布规律及其环境调控机制还缺乏必要的了解和足够的认识。

本文基于南黄海 2006 年夏季多学科海洋调查资料,对浮游植物现存量(叶绿素 a)水平和垂直分布及其与南黄海夏季重要水文现象的联系进行了阐述,对叶绿素 a 与主要环境因子(温度、盐度、营养盐、浊度)的相关性进行了详细的探讨,旨在揭示该海域夏季浮游植物的分布规律及其环境调控机制,对于了解海洋生物的生态过程具有重要意义,研究结果将为南黄海的生物海洋学提供更为广泛和精确的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究海区与站位布设

南黄海是位于西北太平洋的半封闭陆架边缘浅海(平均水深 50m),水文和生物化学条件具有明显的季节变化和空间结构,海洋生态系统复杂多变。夏季南黄海水体大致可以分为两种主要生态环境类型:近岸高温高营养盐的混合区和外海表层营养盐匮乏的层化区。在层化区温跃层的下方是南黄海陆架海区重要的海洋现象—黄海冷水团,7 月份是其强度的鼎盛时期^[9]。已有的研究表明,黄海冷水团对海水化学要素和浮游生态系统的垂直分布具有重要影响^[3,7,10]。另外,浅海陆架锋也是夏季南黄海重要的水文特征,对浮游生物具有明显的聚集作用^[11-13]。

2006 年 7 月 14 日~8 月 6 日,在南黄海 124°E 以西,32.7°~37°N 的范围内布设了 15 条东西断面共计 138 个站位(图 1),对该海域的水文、化学、生物要素进行了综合调查,调查船为“北斗号”科学考察船。为了对不同生态环境中浮游植物与环境因子的相关性进行详细分析比较,本文根据水体光照条件、营养盐含量和来源等将研究区域划分为高浊度区(悬浮物浓度 $ss > 10\text{mg/L}$)、沿岸流区、长江冲淡水影响区和位于黄海中央海域的外海层化区分别进行讨论(图 1)。

1.2 样品采集与测定

每个站位的温度、盐度数据由 CTD(Seabird 917)读出。水样用与 CTD 捆绑的采水器采集,采样深度按照海洋调查的标准层 0m,10m,30m,底层进行(按照每个站点的实际水深确定)。营养盐的数据由同航次项目组其他成员按照《海洋调查规范》^[14]规定的方法,经过 $0.45\ \mu\text{m}$ GF/F 膜过滤后,用分光光度计现场测定得到。

叶绿素 a 采用萃取荧光法测定^[15]。每个站点的水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ GF/F 膜过滤 200~250 ml,滤膜冷冻保存,经 V:V=9:1 的丙酮萃取 14~24 h 后,用 Turner-Designs 700 荧光计进行测定。

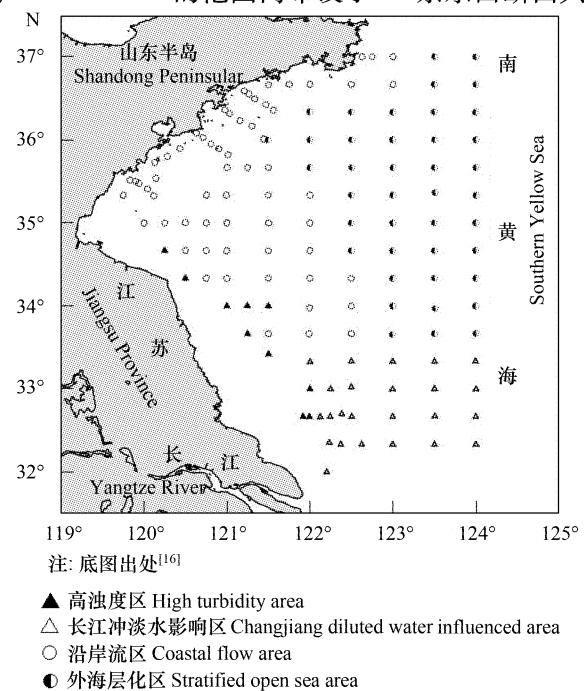


图 1 南黄海浮游植物叶绿素 a 采样站位图

Fig. 1 Sampling sites of phytoplankton chlorophyll a in Southern Yellow Sea

2 结果

2.1 水文与海水化学要素概况

2006 年夏季南黄海海水温度在 6.3 ~ 27.5 °C 之间(表 1),垂直差异显著:表层及近岸区水温较高(> 20 °C)且分布较均匀,外海层化区温跃层以下大部分海域被黄海冷水团覆盖,温度较低且温差较小(< 12 °C)。受到大陆沿岸水的影响,近岸海域盐度明显低于外海,在 33.3°N 以南区域明显受到长江冲淡水(Changjiang diluted water, CDW)北向扩展的影响,由盐度从表层向底层逐渐增加的趋势可以看出沿岸水的影响主要表现在上层水体。陆地径流为沿岸海域带来丰富的营养盐,硝态氮的平均浓度比外海高约 2 个数量级。由于河流输送和强烈的混合作用,近岸尤其是苏北浅滩的狭长地带水体悬浮物浓度较高。由此可见,南黄海夏季不同区域生态环境差异显著,是研究浮游植物生物量与环境因子相关性的理想海区。

表 1 不同水层浮游植物 叶绿素 a 浓度及相关参数

Table 1 Phytoplankton chlorophyll *a* concentrations and related environmental variables in different water column layers

水深(m) Depth	叶绿素 a (mg/m ³) Chlorophyll <i>a</i>	水温(°C) Temperature	盐度 Salinity	营养盐(μmol/L) Nutrients			悬浮物(mg/L) Suspended substances
				NO ₃ + NO ₂	PO ₄	SiO ₃	
0	0.09 ~ 12.12 ^① (1.68) ^②	20.6 ~ 27.5 (24.7)	24.2 ~ 32.2 (30.2)	ND ~ 39.5 (4.0)	ND ~ 0.81 (0.15)	ND ~ 39.4 (4.7)	0.6 ~ 24.7 (5.0)
10	0.10 ~ 9.20 (1.48)	11.6 ~ 27.0 (21.9)	27.5 ~ 32.9 (30.9)	ND ~ 26.2 (3.2)	ND ~ 1.53 (0.18)	ND ~ 23.0 (4.3)	0.4 ~ 35.8 (6.5)
30	0.12 ~ 12.16 (1.30)	6.3 ~ 21.2 (10.9)	30.4 ~ 33.8 (32.8)	0.2 ~ 13.7 (2.6)	ND ~ 0.61 (0.22)	ND ~ 13.1 (3.8)	0.5 ~ 7.6 (3.4)

① 量值范围 magnitude range; ② 平均值 averages; ND, 低于检测限 not detected

2.2 叶绿素 a 水平分布特征

2006 年夏季南黄海浮游植物叶绿素 a 浓度范围为 0.07 ~ 12.17 mg/m³, 平均值为 1.42 mg/m³。以表层为例,各区域叶绿素 a 浓度由高到低的顺序依次为长江冲淡水影响区(3.90 mg/m³) > 高浊度区(1.90 mg/m³) > 沿岸流区(1.63 mg/m³) > 外海层化区(0.32 mg/m³)。夏季南黄海叶绿素 a 平面分布具有明显的空间区域化特征,不同水层具有相似的分布趋势(图 2)。从总体来看,近岸叶绿素 a 浓度高于外海区,其中 33°N 以南长江冲淡水影响区叶绿素 a 浓度最高(平均 4.11 mg/m³),其次为苏北外海区域(1 ~ 2 mg/m³)并大致呈与等深线平行的方向向外海递减,石岛外海和胶州湾口门外也存在小范围叶绿素 a 高值区。水体稳定度较高的黄海中央海域叶绿素 a 水平较低,平均值均 < 1 mg/m³,属于生物量相对贫瘠的海区。

夏季南黄海在潮混合剧烈的近岸区和外海层化区之间形成等温线密集的过渡带,称为浅海陆架锋或潮汐锋,是中纬度陆架浅海中一种重要的水文现象,会对浮游生物的分布产生重要影响。赵保仁等通过卫星图像分析得到夏季潮汐锋在苏北浅滩外测最为典型^[17]。本文通过历史资料及本航次温度断面垂直分布数据,选择穿越苏北浅滩潮汐锋区的 34°N 和 34.7°N 断面对叶绿素 a 分布与潮汐锋的相对位置进行了对比。如图 3 所示,南黄海潮汐锋的位置大约在 121.5 ~ 122.5°E 之间,与历史调查资料差别不大。浮游植物叶绿素 a 的高值区并不在高温高营养盐的近岸区,而是在潮汐锋附近靠近层化水体的一侧。由图 2 叶绿素 a 平面分布也可以看出此特征,在 10m 层即次表层表现的最为明显。

2.3 叶绿素 a 垂直分布特征

夏季南黄海,在潮混合剧烈的近岸浅水区,叶绿素 a 表底基本混合均匀,而在黄海冷水团影响的外海层化区及浅海陆架锋区,存在明显的叶绿素次表层最大值现象(subsurface chlorophyll maximum, SCM)。总体来说,SCM 在位置在 10 ~ 30m 之间,位于真光层以浅,密度跃层附近(图 4)。

SCM 的位置和量值在整个海区并不是均匀一致的,而是由近岸一侧向外海深水区表现出不同的变化规律:在 122.5°E 以东透明度较高的层化区域,SCM 位置较深均在 30m 左右,叶绿素 a 最大值的量值相对较小(< 0.5 mg/m³),而在 122.5°E 以西受近岸影响较明显的区域,SCM 位置在 20 m 以浅的近表层(大多数位于

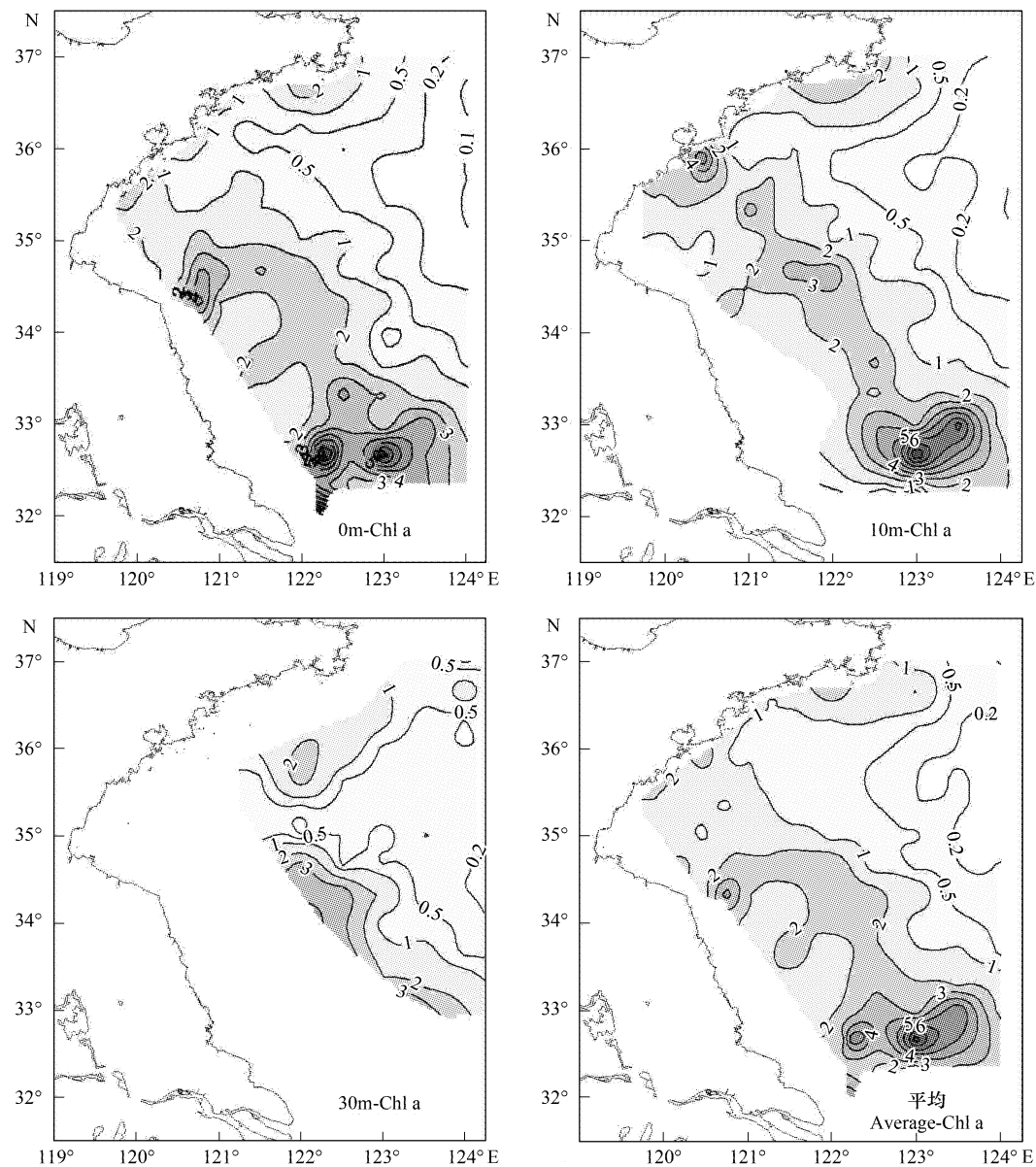
图2 不同水层叶绿素 a 平面分布(mg/m^3)

Fig. 2 Spatial distribution of chlorophyll a in different water column layers

10 m 以浅), 叶绿素 a 最大值的量值也明显高于外海区 ($> 2 \text{ mg}/\text{m}^3$) (图 5); 此外, 研究海域南部的叶绿素 a 最大值明显高于北部海区。采样站点(垂直混合均匀区除外)的 SCM 深度总体上随水体透明度的增加而增加, 呈正相关的关系(图 6)。

2.4 叶绿素浓度与重要环境因子的相关性

(1) 温度对叶绿素 a 的影响

夏季南黄海表层水温较高 ($> 20.0^\circ\text{C}$), 在本次调查的温度范围内, 长江冲淡水影响区 ($23.3 \sim 26.7^\circ\text{C}$) 和沿岸流区 ($20.6 \sim 27.0^\circ\text{C}$) 叶绿素 a 浓度随温度升高表现出略有下降的趋势, 其中叶绿素 a 浓度最高的 4 个站点例外, 由下文分析可知其主要受营养盐影响。高浊度区和外海层化区浮游植物叶绿素和温度关系不明显。从整体来看, 温度不是表层浮游植物的限制因子(图 7)。

(2) 盐度对叶绿素 a 的影响

叶绿素 a 浓度随盐度(S)的增加而降低(图 7), 尤其在 $S > 30.5$ 的外海区域叶绿素 a 浓度迅速下降, 与叶

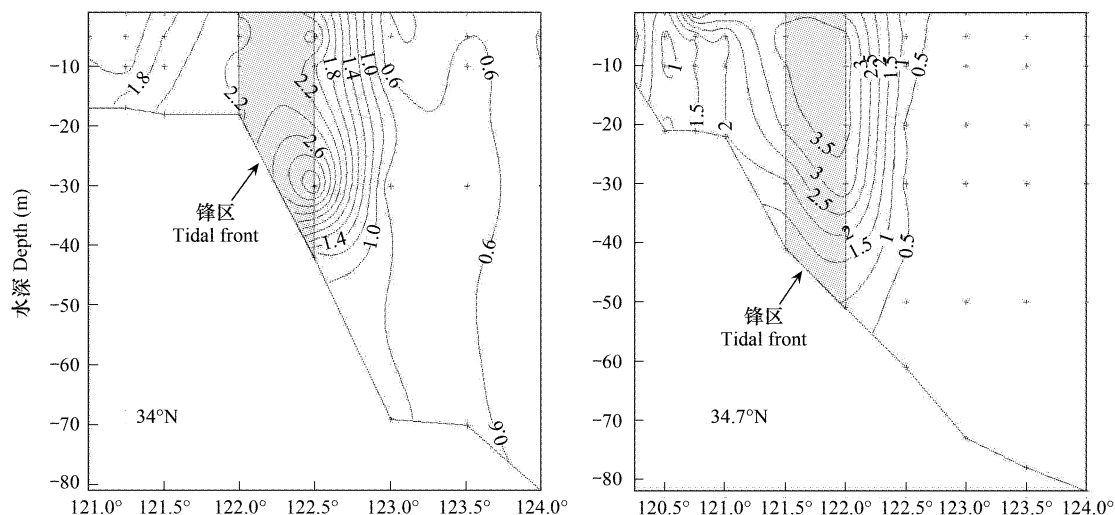


图3 浅海陆架锋与叶绿素 a 高值区的位置比较

Fig. 3 Position comparison of tidal front and high chlorophyll a concentration area

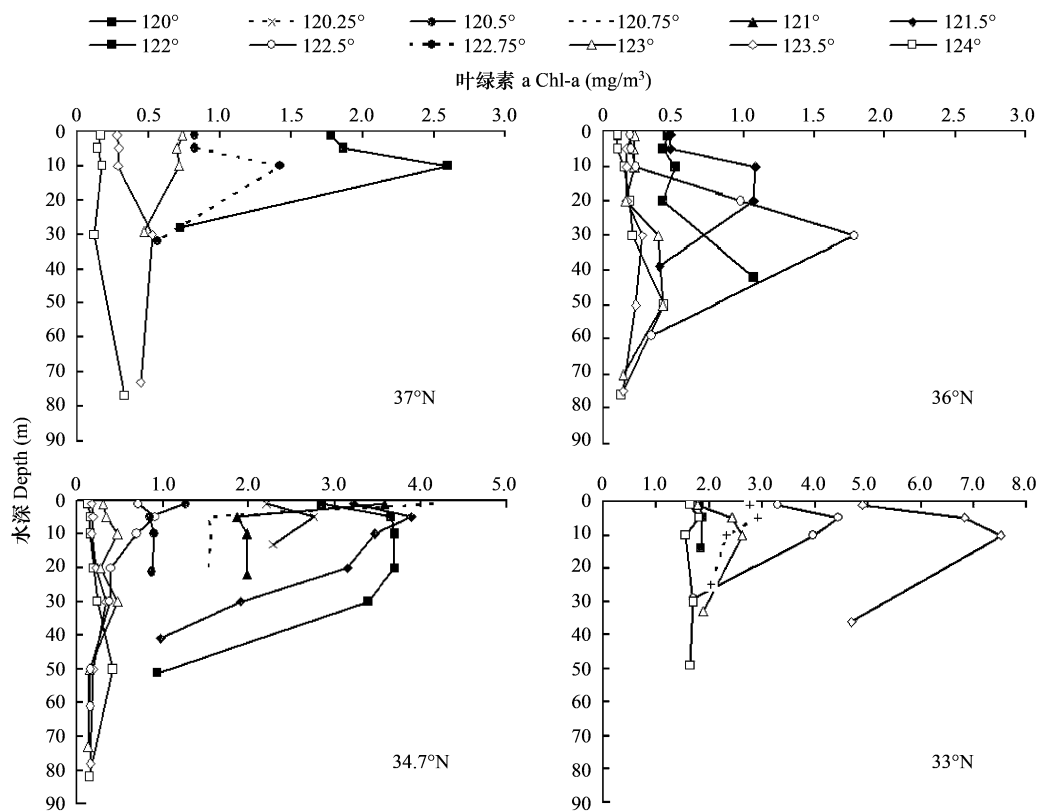


图4 典型断面叶绿素 a 的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of chlorophyll a in typical transects

叶绿素 a 浓度近岸高于外海的平面分布特征相一致。事实上,海水盐度变化主要体现了陆源淡水输入(营养盐来源)的影响,海区盐度变化与叶绿素 a 的关系主要反映了近岸与外海生态环境差异尤其是营养盐来源对浮游植物的影响,而并非盐度本身对浮游植物生理效应的直接影响。

(3) 光照对叶绿素 a 的影响

光照是影响浮游植物初级生产的重要因素之一。在水体悬浮物浓度较低的区域($< 10 \text{ mg/L}$),叶绿素 a

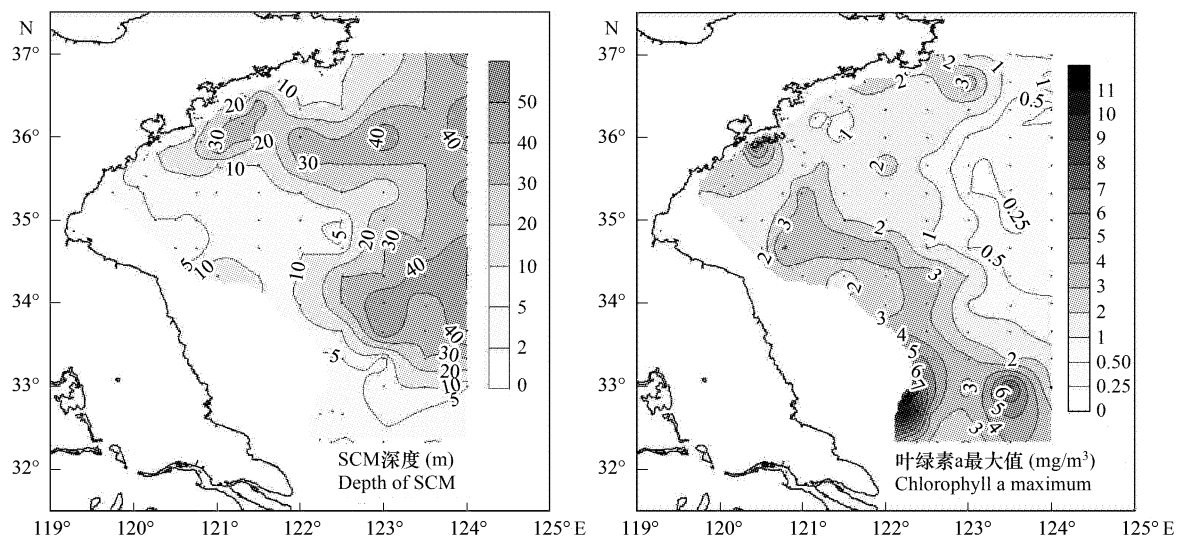


图5 SCM 深度与叶绿素 a 最大值浓度分布

Fig. 5 Distribution of depth of SCM and the concentration of chlorophyll a maximum

浓度与悬浮物含量没有明显的相关性。在江苏近岸的狭长地带由于水深较浅且湍流作用强烈(图1),水体悬浮物含量较高($>10 \text{ mg/L}$)浊度较大,与向海一侧透明度较高的邻近站点相比,营养盐含量相近而叶绿素 a 浓度不到后者的 1/2,因此可认为此区域的浮游植物生长很可能受到光限制(图7)。

(4) 营养盐对叶绿素 a 的影响

本次调查结果显示营养盐对浮游植物分布具有明显的调控作用,表现为浮游植物生物量随营养盐浓度的增加而增加(图7),尤其是随硝态氮($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$)和硅酸盐(SiO_3)的变化趋势更为明显。

在 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 > 1 \mu\text{mol/L}$ 的区域叶绿素 a 浓度均较高($>1 \text{ mg/m}^3$),特别是长江冲淡水北向扩展影响区($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 平均 $14.2 \mu\text{mol/L}$),浓度最高的 4 个站点甚至达到赤潮状态;当 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 < 1 \mu\text{mol/L}$ 时,叶绿素 a 浓度明显低于 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 > 1 \mu\text{mol/L}$ 区域,而且在 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 浓度相近的情况下,外海层化区叶绿素 a 浓度低于沿岸流区(图7)。本航次对浮游动物的研究表明,外海区浮游动物的生物量高于近岸,与浮游植物的平面分布恰好相反,因此黄海中央海域浮游植物可能受到营养盐和浮游动物摄食的双重限制而维持较低生物量水平。

叶绿素 a 随 SiO_3 的变化趋势与 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 类似,在 $\text{SiO}_3 < 2 \mu\text{mol/L}$ 区域叶绿素 a 浓度相对较低,但趋势不及浮游植物随 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 的变化显著。活性磷酸盐(PO_4)在整个调查海区均处于较低水平(大多数 $< 0.4 \mu\text{mol/L}$)甚至低于检测限,与叶绿素 a 相关性不明显,只在 $\text{PO}_4 > 0.25 \mu\text{mol/L}$ 区域表现出叶绿素 a 略微上升的趋势。

3 讨论

本航次调查所得叶绿素 a 浓度范围与李宝华等^[2]对南黄海夏末浮游植物生物量($0.10 \sim 7.76 \text{ mg/m}^3$, 平均 1.14 mg/m^3)的研究结果水平相当。与其它陆架海区相比,如地中海西北部 Ebro 陆架区(平均 0.29

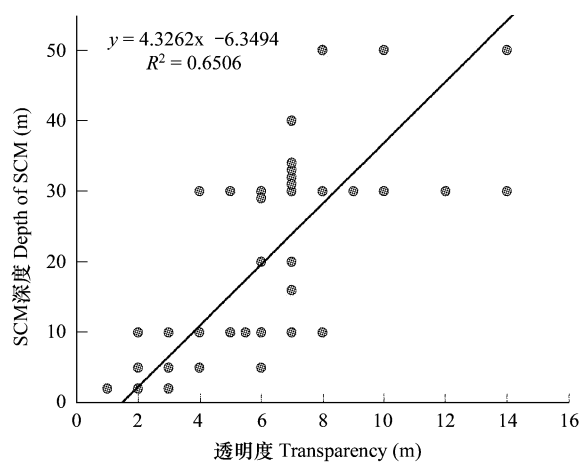
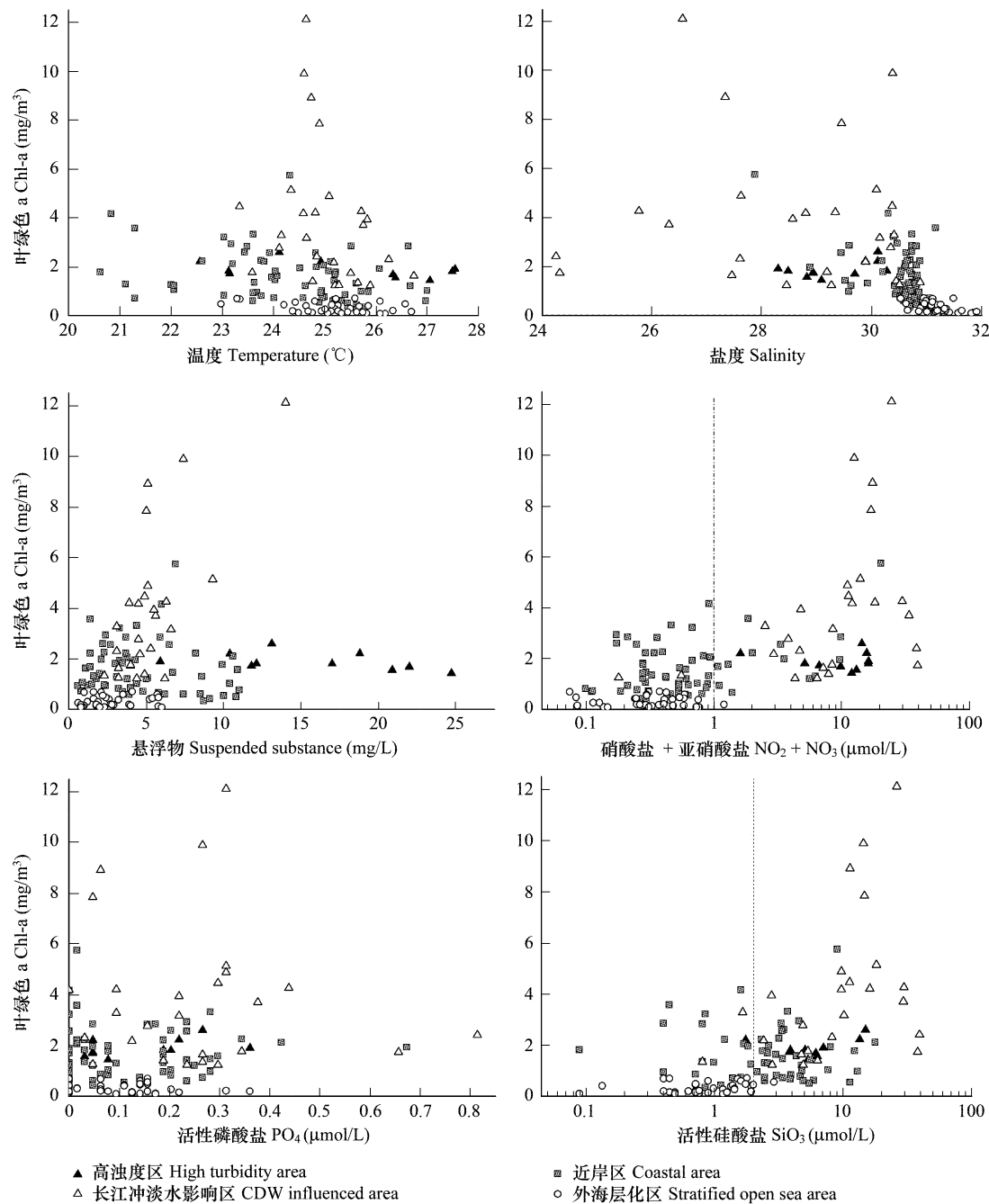


图6 SCM 深度与水体透明度的关系

Fig. 6 Relationship between the depth of SCM and water column transparency

图7 表层浮游植物生物量与环境因子的相关性($n=138$)Fig. 7 Relationships of phytoplankton biomass and the environmental variables in the surface layer($n=138$)

mg/m^3)^[18],南黄海属于生物量较高的海域。

3.1 浅海陆架锋对浮游植物分布的影响

浮游植物生物量在浅海陆架锋附近出现高值区是本次调查叶绿素 a 平面分布的一个重要特征。已有的研究表明,南黄海陆架锋区对浮游生物如中华哲水蚤、浮游细菌、鲢鱼卵等具有明显的聚集作用^[11~13]。对该现象的形成机制一般认为,近岸海域由于浊度较高浮游植物受到光限制,而外海层化区受营养盐限制,锋区以及周围的水域透明度较高,营养盐来源较丰富(近岸或上升流输送),包含了互为补充的因子,因此浮游植物趋向于在锋区层化海区一侧得到峰值^[19]。本文在苏北浅滩潮汐锋附近观测到明显的叶绿素 a 高值区,研究结果再一次证实了潮汐锋对浮游植物具有聚集作用。

3.2 叶绿素次表层最大值的分布规律

叶绿素次表层最大值(SCM)是开阔外海地区广泛存在的海洋学现象^[20],在世界大洋、陆架海和沿岸区域得到了广泛观测验证^[21, 22]。在层化水体垂直方向上,光合作用的程度由辐射和营养盐条件交替控制,在真光层的上层通常受营养盐限制^[23],而靠近真光层底部时光限制成为浮游植物初级生产的主导因素^[24],因此 SCM 形成于光照和营养盐条件的平衡之处^[21, 22]。SCM 的形成还涉及很多其它过程,包括在密度跃层处浮游植物的被动累积,或为躲避摄食的主动聚集^[21, 25]。

以往的观测表明南黄海夏季 SCM 的位置在 20 ~ 40m 之间^[2, 3, 10],与本文的观测结果相一致(10 ~ 30m)。本文的研究结果还进一步发现,SCM 的深度和量值存在明显的区域差异,SCM 深度与水体透明度呈正相关的关系。张书文^[7]通过求解一维模式控制方程对有关物理过程对南黄海叶绿素垂直结构的作用机理解析研究表明,潮混合强度、水体层化程度以及光衰减强度均会影响 SCM 的位置。Teira 等对东北大西洋地区浮游植物生物量的观测发现,SCM 的深度与硝酸盐跃层深度和 1% 辐照度深度呈正相关^[26],与本文研究结果表现出相似的规律。

3.3 重要环境因子对表层浮游植物分布的调控作用

水动力过程、温度、光照、营养盐来源以及摄食等各因素以及它们之间的相互作用共同影响浮游植物的光合作用效率和生长速率,决定了浮游植物生物量、群落结构及其空间分布的变化^[27]。通常认为,浮游植物生物量分布在大空间尺度上主要与营养盐可得性相关;在中等和较小空间尺度上,生物物理过程(biophysical processes)如光照环境,水体层化/湍流条件,温度和摄食也能够调节生产力和生物量水平^[19]。

在高浊度的沿海或河口地区,光照往往在控制浮游植物光合作用中扮演重要角色^[27, 28]。同本文的研究结果类似,浮游植物生物量和初级生产力向浊度较高的陆地方向降低的现象在其它近海地区被广泛观测到^[19]。尽管这些地区营养盐含量丰富,但较高的悬浮物浓度使光照成为浮游植物光合作用和生长速率的主要限制因子^[19, 29]。

象其它多数陆架海区一样,南黄海沿岸是受人类开发活动影响密集的区域,陆源排放和地表径流的输入给沿岸水体带来丰富的营养物质,特别是夏季长江冲淡水影响区。近岸区营养盐往往远超过浮游植物的营养盐半饱和浓度而不成为限制因子^[30]。而外海层化区,尤其是黄海冷水团上层水域,由于春季水华的消耗和补充来源不足,营养盐含量较低(如 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 < 1 \mu\text{mol/L}$),对浮游植物的初级生产造成不同程度的限制($\text{Chl a} < 1 \text{ mg/m}^3$)。

营养盐作为浮游植物生长最重要的调控因子,其与浮游植物生长的关系得到广泛的研究。Justić 等^[31]在总结前人对浮游植物营养盐吸收动力学的基础上,提出营养盐限制的起始浓度分别为 $\text{Si} = 2 \mu\text{mol/L}$, $\text{DIN} = 1 \mu\text{mol/L}$, $\text{P} = 0.1 \mu\text{mol/L}$ 。Cañellas^[32]对浮游植物生长动力学研究表明,小型浮游植物(如硅藻类)在无机氮浓度为 $0.9 \mu\text{mol/L}$ 时生长不受营养盐向细胞表面扩散的限制。另外,根据 Chisholm^[33]提出的计算公式,在自然海区维持小型浮游植物最大生长速率的无机氮浓度为 $0.72 \mu\text{mol/L}$ ^[34]。上述实验和理论计算结果与本文的观测结果一致,可认为南黄海夏季当 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 > 1 \mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3 > 2 \mu\text{mol/L}$ 时浮游植物生长不受水体 N 和 Si 绝对浓度的限制。活性磷酸盐(PO_4)在整个调查海区均处于较低水平(大多数 $< 0.4 \mu\text{mol/L}$)甚至低于检测限,与叶绿素 a 未表现出明显的规律性。海洋环境中浮游植物生物量与磷酸盐关系较为复杂,首先磷的矿化速率较快途径复杂,其次当水环境中活性磷酸盐(PO_4)被生物消耗殆尽时,溶解有机磷(DOP)会成为浮游生态系中磷的重要来源^[33],这可能是本次调查结果活性磷酸盐与叶绿素 a 未表现出明显的相关性的重要原因。

此外,本航次调查结果显示南黄海中央海域为浮游动物生物量高值区,因此除了营养盐限制,浮游动物的摄食压力也可能是该地区浮游植物生物量低的原因之一。

4 结语

南黄海夏季浮游植物叶绿素 a 分布具有明显的空间区域化特征:水平分布总体表现为近岸混合区(尤其

是长江冲淡水影响区)叶绿素 a 浓度高于底部由黄海冷水团覆盖的外海层化区,且叶绿素 a 高值区趋向于在浅海陆架锋附近聚集;在垂直方向上,外海层化区存在明显的叶绿素次表层最大值现象,SCM 的深度和量值随区域而变化。表层浮游植物现存量的分布规律是在多种环境因子的相互作用共同影响下形成的,营养盐是其分布的主要调控因子,温度、光照和浮游动物摄食也在一定程度和空间对浮游植物的生长具有调节作用。

References:

- [1] Andre M, David A. Small Critters-Big Effects. *Science*, 2002, 296(5575):1980—1982.
- [2] Li B H, Fu K C, Zeng X Q. The distribution characteristics of chlorophyll-a in later summer in the Southern Yellow Sea area. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(3): 300—305.
- [3] Wang B D. Characteristics of variations and interrelations of biogenic elements in the Huanghai Sea Cold Water Mass. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(6): 47—52.
- [4] Xia B, Lü R H, Sun P X. Spatial-temporal distributions and size compositions of chlorophyll-a in the typical areas of the Yellow Sea and East China Sea in the Autumn of 2000. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Sea*, 2001, 19(4): 37—42.
- [5] Huang B Q, Liu Y, Chen J X, Wang D Z, Hong H S, Lü R H, Huang L F, Lin Y A, Wei H. Temporal and spatial distribution of size-fractionized phytoplankton biomass in East China Sea and Huanghai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(2):156—164.
- [6] Zheng G X, Song J M, Dai J C, Wang Y M. Distribution of chlorophyll-a and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the southern Huanghai Sea waters. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(3): 109—118.
- [7] Zhang S W. Effect mechanisms on chlorophyll-a vertical distribution in the summer within Yellow Sea Cold Water Mass. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(2): 179—186.
- [8] Hu H G, Wan Z W, Yuan Y L. Simulation of seasonal variation of phytoplankton in the southern Huanghai (Yellow) Sea and analysis on its influential factors. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(6): 74—88.
- [9] Yu F, Zhang Z X, Diao X Y, Guo J S, Tang Y X. Analysis of evolution of the Huanghai Sea Cold Water Mass and its relationship with adjacent water masses. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(5):26—34.
- [10] Li H B, Xiao T, Ding T, Lü R H. Effect of the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM) on distribution of bacterioplankton. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26:1012—1020.
- [11] Li H B, Xiao T, Lü R H, Ding T. Impact of tidal front on the distribution of bacterioplankton in the southern Yellow Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11):2608—2615.
- [12] Wei H, Wang Y H, Wan R J, Su H. Tidal front and the convergence of anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs in the Yellow Sea. *Fisheries Oceanography*, 2003, 12(4-5):434—442.
- [13] Liu G M, Sun S, Wang H, Liu H L. Influences of Yellow Sea tidal front on the distribution of *Calanus Sinicus* in spring and autumn. *Advances in Natural Science*, 2002, 12(11): 1150—1154.
- [14] The specification for oceanographic survey-observations of chemical parameters in sea water (GB 12763.4-91). General Administration of Quality Supervision, 1991.
- [15] Parsons T R, Maita Y, Lalli C M. A manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, 1984. 107—109, 115—122.
- [16] Xie L P, Wei X H, Wang Z L, Zhan R, Shi X Y, Wang B D. Distribution of total organic carbon and its influence factors in the Southern Yellow Sea in summer. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(4): 497—505.
- [17] Zhao B R, Tu D Z, Bi Y W. Multi-year variations of the tidal front in the section 34°N on the continental shelf of the western Yellow Sea and numeric model of the circulations in the section across the front. *Marine Science*, 1992, 2: 41—45.
- [18] Arin L, Estrada M, Salat J, Cruzado A. Spatio-temporal variability of size fractionated phytoplankton on the shelf adjacent to the Ebro river (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*, 2005, 25: 1081—1095.
- [19] Calliari D, Gómez M, Gómez N. Biomass and composition of the phytoplankton in the Rio de la Plata: large-scale distribution and relationship with environmental variables during a spring cruise. *Continental Shelf Research*, 2005, 25: 197—210.
- [20] Longhurst A R. *Ecological Geography of the sea*. USA: Academic Press, 1998.
- [21] Hanson C E, Pesant S, Waite A M, Pattiaratchi C B. Assessing the magnitude and significance of deep chlorophyll maxima of the coastal eastern Indian Ocean. *Deep-Sea Research II*, 2007, 54: 884—901.
- [22] Lund-Hansen L C, Ayala P C D A, Reglero A F. Bio-optical properties and development of a sub-surface chlorophyll maxima (SCM) in southwest Kattegat, Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 68:372—378.

- [23] Dugdale R C, Goering J J. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnology and Oceanography*, 1967, 12: 196—206.
- [24] Behrenfeld M J, Falkowski P G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1479—1491.
- [25] Cullen J J. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, 39:791—803.
- [26] Teira E, Mourão B, Marañón E, Pérez V, Pazó M J, Serret P, Armas D, Escáñez J, Woodward E M S, Fernández E. Variability of chlorophyll and primary production in the Eastern North Atlantic Subtropical Gyre: potential factors affecting phytoplankton activity. *Deep-Sea Research*, 2005, 52: 569—588.
- [27] Popovich C A, Marcovecchio J E. Spatial and temporal variability of phytoplankton and environmental factors in a temperate estuary of South America (Atlantic coast, Argentina). *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 236—244.
- [28] Cloern J E. The relative importance of light and nutrient limitation of phytoplankton growth: a simple index of coastal ecosystem sensitivity to nutrient enrichment. *Aquatic Ecology*, 1999, 33: 3—16.
- [29] Kocum E, Underwood G J C, Nedwell D B. Simultaneous measurement of phytoplanktonic primary production, nutrient and light availability along a turbid, eutrophic UK east coast estuary (the Colne Estuary). *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 231: 1—12.
- [30] Irigoien X, Castel J. Light limitation and distribution of chlorophyll pigments in a highly turbid estuary: the Gironde (SW France). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1997, 44:507—517.
- [31] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, Dortch Q. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 1995, 40: 339—356.
- [32] Cañellas M. Nutrient acquisition and partitioning in oceanic microphytoplankton. Ph. D. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Universitat de Barcelona and Consell Superior d'Investigacions Científiques.
- [33] Chisholm S W. Phytoplankton size. In P. G. Falkowski and A. D. Woodhead eds. *Primary production and biogeochemical cycles in the sea*. New York: Plenum Press, 1992. 213—237.
- [34] Agawin N S, Duarte C M, Agustí S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(3):591—600.
- [35] Orre K, Karl D M. Dissolved organic phosphorus production in surface waters. *Limnology and Oceanography*, 1987, 32: 383—395.

参考文献:

- [2] 李宝华,傅克付,曾晓起. 南黄海夏末叶绿素 a 的分布特征. *海洋与湖沼*,1999,30(3):300~305.
- [3] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系. *海洋学报*,2000,22(6):47~52.
- [4] 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. *黄渤海海洋*,2001,19(4):37~42.
- [5] 黄邦钦,刘媛,陈纪新,王大志,洪华生,吕瑞华,黄凌风,林以安,魏皓. 东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布. *海洋学报*, 2006,28(2):156~164.
- [6] 郑国侠,宋金明,戴纪翠,王益鸣. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度. *海洋学报*,2006,28(3):109~118.
- [7] 张书文. 黄海冷水团夏季叶绿素垂向分布结构的影响机制. *海洋与湖沼*,2003,34(2):179~186.
- [8] 胡好国,万振文,袁业立. 南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析. *海洋学报*,2004,26(6):74~88.
- [9] 于非,张志欣,刁新源,郭景松,汤毓祥. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析. *海洋学报*,2006,28(5):26~34.
- [11] 李洪波,肖天,刘桂梅,吕瑞华,丁涛. 南黄海潮汐锋对浮游细菌生物量分布的影响. *生态学报*,2004,24(11):2608~2615.
- [13] 刘桂梅,孙松,王辉,刘会莲. 春秋季黄海海洋锋对中华哲水蚤分布的影响. *自然科学进展*,2002,12(11):1150~1154.
- [14] 《海洋调查规范 海水化学要素观测》(GB 12763.4-1991). 国家技术监督局, 1991.
- [16] 谢琳萍,魏修华,王宗灵,战闰,石晓勇,王保栋. 夏季南黄海总有机碳的分布特征及其影响因素. *海洋科学进展*,2008,26(4):497~505.
- [17] 赵保仁,涂登志,毕亚文. 黄海西部 34°N 断面潮生陆架锋的多年变化及跨锋断面的环流结构. *海洋科学*,1992,2:41~45.