

东海区叶绿素 *a* 和初级生产力季节变化特征*

张玉荣 丁跃平 李铁军 薛 彬 郭远明

(浙江省海洋水产研究所 浙江省海水增殖重点实验室 舟山 316100)

摘要 依据 2008 年春季(5 月)、夏季(8 月)、秋季(11 月)和 2009 年冬季(2 月)的现场调查结果,分析了东海区叶绿素 *a*、初级生产力的平面分布、垂直分布和季节变化的特征,并探讨了其影响因素。结果表明,四个航次叶绿素 *a* 浓度分别为 1.33、0.93、1.61 和 0.65 mg/m³, 秋季>春季>夏季>冬季。春季、夏季和秋季最大值均出现在 0—10m 水层,冬季最大值出现在底层。叶绿素 *a* 浓度远海年季变化较小,近岸区和垂直分布年季变化较大。四个航次初级生产力平均为 375.03、414.37、245.45 和 102.60 mg/(m³ h),夏季>秋季>春季>冬季。叶绿素 *a* 浓度和初级生产力水平均高于历史同期值。鱼外渔场的年平均初级生产力最大,海州湾渔场最小。通过分析叶绿素 *a* 和环境因子的相关性表明,叶绿素 *a* 与浮游植物显著正相关;春季和秋季的低温以及春季和夏季的低盐比较适合浮游植物的生长;活性磷酸盐可能是限制春季和秋季叶绿素 *a* 的重要因素。

关键词 东海区; 叶绿素 *a*; 初级生产力; 季节变化; 环境因子

中图分类号 Q178.1 **doi:** 10.11693/hyhz20151100283

东海区是我国生产力最高的海域之一,孕育着丰富的渔业资源,是东、黄海主要经济鱼类的天然良好产卵场与索饵场,每年春夏汛期间带鱼、大黄鱼、小黄鱼、鲳鱼等鱼种均洄游到此海域进行产卵、索饵(程家骅等, 1999)。东海区作为北太平洋的陆架海,东邻西北太平洋,受源自台湾东南的黑潮的强烈影响;西接大陆,受到陆海相互作用特别是长江入海物质通量的强烈影响;北有黄海冷水团的影响,使得东海区的生态环境趋于复杂化、多样化,成为有重要研究价值的海区之一(焦念志等, 1998; 周伟华等, 2003)。近年来,东海区赤潮频发,生态系统不稳定(孙晓霞等, 2012),渔业资源产量和质量严重下降,甚至出现了东海无鱼的相关报道。因此,调查和分析东海区及邻近海域的生态系统动态变化,对合理开发和利用该海区的生物资源具有重要的意义。

海洋中叶绿素 *a* 浓度可反映水体浮游植物的丰度及其变化规律,是浮游植物现存量的重要指标,也是表征光能自养生物量和反应海域贫瘠程度的重要

指标,海洋初级生产力是度量浮游植物光合作用活跃程度的传统参数,是海洋生态系统研究的重要内容,其动态变化直接影响到生态系统的结构和功能,也是海域生物资源评估的重要依据(费尊乐等, 1988; 朱明远等, 1993; 孙晓霞等, 2011)。不同历史时期对东海区的调查,比如 1984—1985 年对渤海、黄海和东海图集的研究, 1997—2000 年的海洋生物资源补充调查与评价, 2006—2007 年的中国近海海洋综合调查与评价(文斐等, 2012),调查分析了东海区叶绿素 *a* 以及初级生产力等参数,为东海生态系统演变规律研究积累了宝贵的历史资料;但是,主要针对近海、近岸、海湾、河口、上升流及一些养殖区以及年季中的个别季节,由于海洋调查的复杂性和高成本,国内关于东海区的调查研究资料非常匮乏,尤其是针对东海区主要渔场重要渔业资源海区的叶绿素 *a* 和初级生产力的年季变化特征的研究很少涉及。

2008—2009 年,在国家科技支撑计划“东海区主要渔场重要渔业资源的调查与评估”的支持下,浙江

* 国家科技支撑计划项目资助, 2007BAD43B01 号; 浙江省科技计划项目, 2016F30023。张玉荣, 硕士, 工程师, E-mail: yurongzhang2008@163.com

通讯作者: 郭远明, 教授级高工, E-mail: guoyuanming@msn.com

收稿日期: 2015-11-11, 收修改稿日期: 2015-12-29

省海洋水产研究所等单位对东海区的渔业水域环境、浮游生物、鱼卵仔稚鱼、叶绿素 a 和初级生产力等进行了系统调查, 结合历史资料系统分析该海区生态系统的动态变化, 为东海渔业环境现状和渔业资源的评估和可持续利用提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 采样时间、站位与采样方法

2008 年春季(5 月)、夏季(8 月)和秋季(11 月)以及 2009 年冬季(2 月)对东海区(26.0°N—35.0°N, 122°E—126.5°E)进行了四个航次的综合调查, 共设置 42 个叶绿素 a 站位和 20 个初级生产力站位(图 1)。叶绿素 a 根据水深取表层(水深<0.5m)、10m、30m 和底层水样; 初级生产力设置 100%、50%、10%、1%共 4 个光学深度层次, 当层间隔小于 1m 时合并成 1 层。

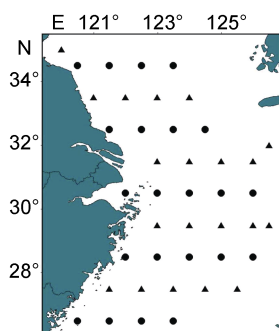


图 1 叶绿素 a 和初级生产力调查站位图

Fig.1 Map of investigation stations for chlorophyll a and primary productivity

●表示叶绿素 a 站位, ▲表示叶绿素 a 站位和初级生产力站位

1.2 样品测定

叶绿素 a 浓度测定采用荧光法, 用 90%以上丙酮萃取, 然后震荡, 冷藏 12—24 h 后使用 Trilogy 实验室荧光测定仪测定; 初级生产力浓度测定采用 ^{14}C 法测定, 采集的水样在弱光下用 200 μm 筛绢过滤, 加入一定量的 $\text{NaH}_2^{14}\text{CO}_3$ 示踪剂, 在流动的水槽中光照培养 6 h 左右。用 Whatman GF/F 滤膜收集浮游植物样品, 冰冻保存, 带回实验室用 Tri-carb2900TR 型液闪计数器测定样品的放射性强度(国家技术监督局, 2007)。

1.3 环境要素

温度、盐度等水文参数由浙江省海水增殖重点实验室张洪亮老师提供, 亚硝酸盐、硝酸盐、氨氮、活性磷酸盐的数据由农业部渔业环境及水产品质量监督检验测试中心(舟山)提供, 其采集和测定依据海洋调查规范进行(国家技术监督局, 2007)。

1.4 相关数据处理

绘图采用 Arcview10.0 软件, 数据分析采用 SPSS 软件进行相关性分析。本文提到的初级生产力均为水柱初级生产力。

2 结果与讨论

2.1 叶绿素 a 浓度的平面分布

春季, 叶绿素 a 浓度范围为 0.04—28.19 mg/m^3 , 垂向四个层次叶绿素 a 的范围分别为 0.07—10.35、0.09—28.19、0.08—19.89 和 0.04—11.76 mg/m^3 。春季的高值区($>1.0 \text{ mg}/\text{m}^3$)主要分布在大陆沿岸和调查海区的北半部, 与 1994 年的高值区分布特征基本一致(宁修仁等, 1995)。高值区的厚度较深, 一般可达 30m 左右, 长江口外、浙江沿岸甚至可达底层, 从表层至底层的叶绿素 a 最大值均出现在站位(122°E, 28.5°N), 均高于 10 mg/m^3 富营养的阈值(邹景忠等, 1983)。春季各层叶绿素 a 的平面分布特征基本一致, 其中, 10m 和 30m 层的高值区比表层更加密集的分布在浙江沿岸(图 2a), 分析原因可能为黑潮的影响形成的上升流注入丰富的营养盐, 富含营养盐的台湾暖流底层水和近岸海水交汇, 利于各水层浮游生物的生长(周伟华等, 2004)。福建沿海和舟山群岛附近的叶绿素 a 基本在 1.0 mg/m^3 左右。其它海区的叶绿素 a 浓度基本在 1.0 mg/m^3 以下。

夏季, 叶绿素 a 浓度范围为 0.02—7.60 mg/m^3 , 垂向四个层次叶绿素 a 浓度范围为 0.03—7.60、0.09—5.98、0.02—7.40 和 0.04—3.51 mg/m^3 。高值区主要分布在大陆沿岸, 冲绳海槽附近和济州岛南部各有一小范围的高值区($>1.0 \text{ mg}/\text{m}^3$), 其它海区的叶绿素 a 基本在 1.0 mg/m^3 以下。因夏季季风转为偏南风, 长江口、钱塘江入海径流量大增, 冲淡水混合沿岸流向东偏北方向而去, 注入大量营养物质, 长江口外的高值区和春季相比明显北移(宁修仁等, 1986)(图 2b)。

秋季, 叶绿素 a 浓度范围为 0.00—6.84 mg/m^3 , 垂向四个层次的叶绿素 a 浓度范围分别为 0.00—6.62、0.00—7.00、0.00—6.84、0.00—6.82 mg/m^3 , 垂向分布较均匀。由于长江入海口径流量大大降低, 以及上升流和东海黑潮的影响, 秋季的高值区主要分布在调查的南部海区(图 2c)。

冬季, 叶绿素 a 浓度范围为 0.02—3.97 mg/m^3 , 垂向四个层次叶绿素 a 浓度范围为 0.12—1.34、0.10—2.07、0.13—2.64、0.02—3.79 mg/m^3 。水平和垂向分布都较为均匀, 在调查的北部海区, 调查的底层站位

(123.5°E, 32.5°N)出现最大值(3.79 mg/m³), 高值区(>1.0 mg/m³)主要分布在浙江上升流海区和调查的北部海区, 中部海区基本低于 1.0 mg/m³ (图 2d)。

调查结果显示, 四个航次远岸区叶绿素 *a* 浓度年季变化较小, 而近岸区由于受到台湾暖流、对马暖流、黑潮暖流和沿岸流等海流季节变化、以及长江冲淡水引起的营养盐季节变化、泥沙含量导致的水体透

明度的季节显著变化的影响, 近岸区叶绿素 *a* 浓度季节变化较显著(宁修仁等, 1995; 李国胜等, 2003)。

2.2 叶绿素 *a* 浓度的垂直分布

叶绿素 *a* 浓度垂直分布特征主要表现为随水深的增加而减小(表 1), 这主要是因为海水中的光照强度随着深度增加逐渐减弱, 当水深按算术级数增加时, 光照强度呈指数递减(刘子琳等, 2001)。另外, 海

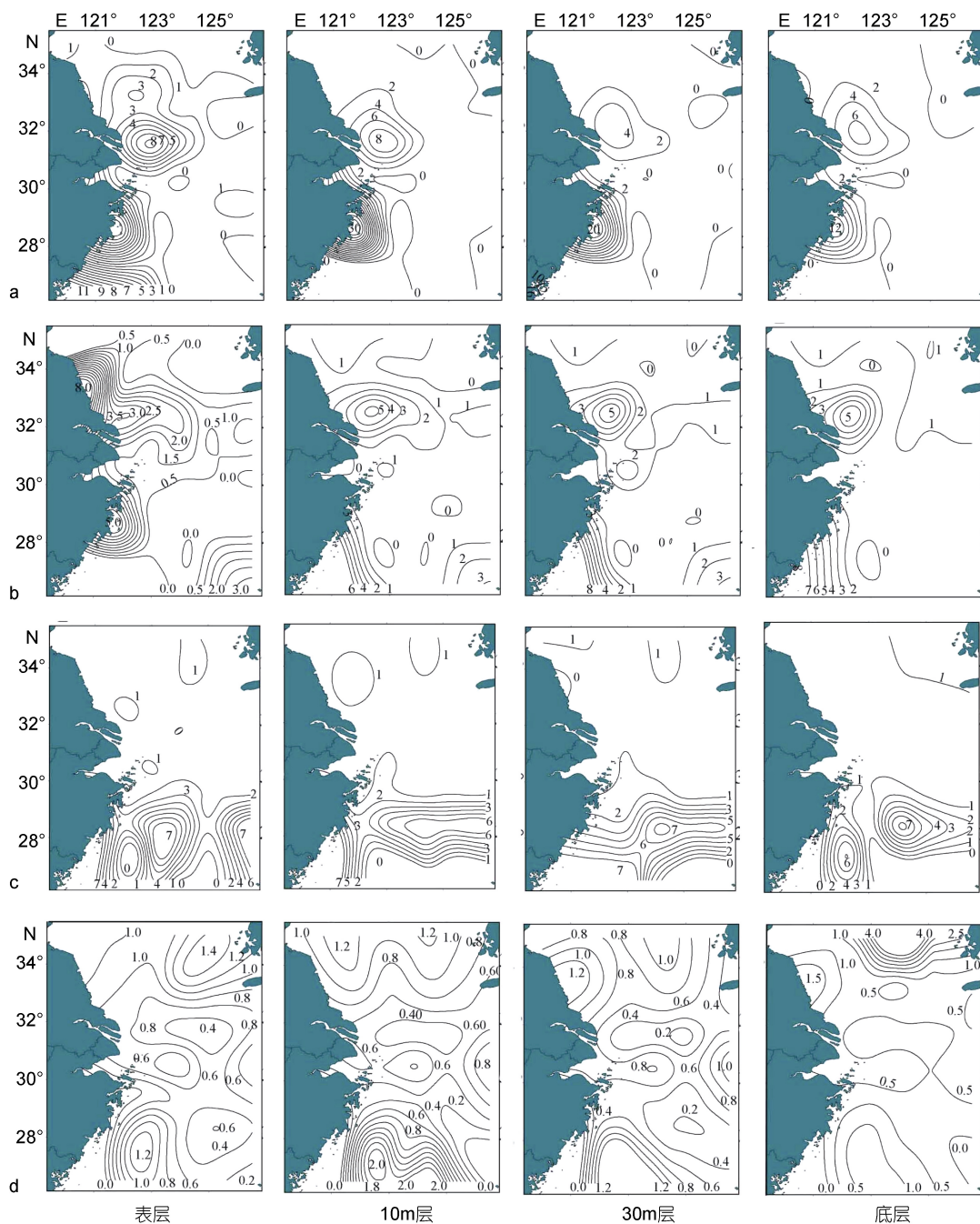


图 2 叶绿素 *a* 浓度(mg/m³)平面分布图

Fig.2 The distribution of chlorophyll *a* concentration
a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季

表 1 全年各水层中叶绿素 a 浓度
Tab.1 The chlorophyll a concentration at different depths in a year

叶绿素 a 浓度 (mg/m^3)	表层	10m	30m	底层	季节平均
春季	1.22	1.66	1.30	1.08	1.33
夏季	1.02	0.94	0.98	0.78	0.93
秋季	1.70	1.81	1.74	1.15	1.61
冬季	0.65	0.67	0.63	0.66	0.65

底层深度范围为 10—150m

区各种海洋水文状况对叶绿素 a 浓度的垂直分布有很大影响, 因此叶绿素 a 的垂直分布在不同的季节具有不同的特点(李国胜等, 2003)。

2.3 叶绿素 a 浓度的季节变化

2.3.1 平面分布的季节变化特征 从表 1 可以看出, 叶绿素 a 浓度为秋季>春季>夏季>冬季。叶绿素 a 浓度秋季最高, 为 $1.61 \text{ mg}/\text{m}^3$; 春季略低, 为 $1.32 \text{ mg}/\text{m}^3$; 夏季为 $0.93 \text{ mg}/\text{m}^3$, 冬季最低, 为 $0.65 \text{ mg}/\text{m}^3$, 叶绿素 a 年季变化具有明显的双峰特点, 与 1998 年调查结果一致(李国胜等, 2003)。春季海水温度逐渐增高, 同时浙江沿岸、舟山群岛的上升流将下层的营养盐向上运输, 为浮游植物的生长提供丰富的营养物质(黄邦钦等, 2006); 春季和夏季是大多数底栖生物和鱼虾类的繁殖期, 其幼体对浮游植物的消耗量较大, 导致夏季的叶绿素 a 较低, 随着幼体对浮游植物的消耗量相对减少以及夏季营养盐的高度积累, 秋季的叶绿素 a 水平达到最高值(崔毅等, 2000)。

与历史不同时期叶绿素 a 调查相比较, 本次调查叶绿素 a 浓度最大值和平均值, 尤其是春季和夏季, 均高于 1984—1985、1997—2000、2006—2007 和 2011 历史同期调查结果(宁修仁等, 1995; 唐启升, 2006; 王春生, 2011), 而本次调查的初级生产力水平同样高于历史同期值, 分析其原因可能是东海区赤潮频发引起的结果。2008 年, 中国沿海赤潮多发区主要集中在东海海域, 共发生赤潮 47 次(全国 68 次), 累计面积为 12070 km^2 (国家海洋局, 2009), 可能会造成本研究中的叶绿素 a 浓度和初级生产力水平的观测值较高。

2.3.2 垂直分布的季节变化特征 东海突出的水文特征是在东海陆架区和深水海域上层具有强盛的浅海季节性跃层, 同时在深水海域存在常年性跃层(冯士筌等, 1999), 水文对叶绿素 a 浓度垂直分布的影响具体结合 26.5°N 、 30.5°N 和 30.5°N 断面分析(图 3)。5 月份东海浅海区的温跃层已相当强盛, 春季叶绿素 a 浓度的垂向分布已经呈现明显的层化现象(图

3c 春季)。受到黑潮暖流和对马暖流的影响, 30.5°N 断面, 125° — 126°E 范围叶绿素 a 垂向分布非常均匀(图 3b 春季)。夏季, 长江冲淡水的极度扩展(可达 126°E)与降水的增多, 强烈的增温降盐使夏季东海表层水所达的范围相当广阔(宁修仁等, 2004), 导致夏季叶绿素 a 的垂向分布非常均匀(图 3b 夏季)。秋季, 浙江近岸出现“逆温跃层”的, 导致 26.5°N 断面, 出现叶绿素 a 从表层至底层逐渐增加的现象(图 3a 秋季)。冬季, 随着温度的下降, 热交换和强烈的蒸发使海洋的失热加剧, 表层海水密度变大下沉, 涡动和对流的增强使混合层在浅水区直达海底, 因此, 东海冬季大部分海区的垂向分布非常均匀(图 3 冬季)。

3 初级生产力

3.1 初级生产力的平面分布特征

春季初级生产力的变化范围为 0.84 — $997.11 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$, 平均为 $178.09 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$, 高值区主要分布在调查海区的南部海区(图 4 春季), 此区域为南下沿岸流和北上台湾暖流间的上升流富营养区, 以及来自黑潮的高温、高盐、低营养盐的大洋水和来自陆架的低盐度、高营养盐海区(焦念志等, 1998), 初级生产力最大值出现在站位(123°E , 28.5°N), 与 1984—1985(宁修仁, 1995)和 1994 初级生产力分布特征基本一致(焦念志等, 1998)。初级生产力分布低值区出现在长江口和杭州湾附近、长江口以北, 以及黑潮以外。

夏季初级生产力的变化范围为 4.17 — $1365.59 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$, 平均为 $375.03 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$ 整个东海区初级生产力均处于较高水平, 长江口外和杭州湾外高值区范围明显向东部和北部移动, 从近岸区到远岸初级生产力先逐渐增大后逐渐减小, 在中部海区站位($122^\circ30'$ — $123^\circ30' \text{E}$)出现最大值(图 4 夏季)。在近岸区, 由于海水和冲淡水的强烈混合, 长江悬浮泥沙的输入和海底沉积物的再悬浮导致入海口海水浑浊, 光成为浮游植物生长的主要限制因子; 随着冲淡水向外海方向扩散, 水体层化, 垂直稳定度大, 悬浮泥沙迅速沉降, 透明度增大, 在河口输入的营养盐较好的满足浮游植物快速增长, 因此出现了初级生产力的高值区; 在冲淡水区的东部, 由于向外海方向陆源营养盐被稀释, 尽管水体透明度很高, 初级生产力迅速下降, 形成低值区(Ning *et al.*, 1988; 宁修仁等, 2004)。

秋季初级生产力的变化范围为 0.63 — $1637.21 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$, 平均为 $245.45 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$ 。由于受到台湾暖流和黑潮的影响, 高值区分布在调查的中部和南

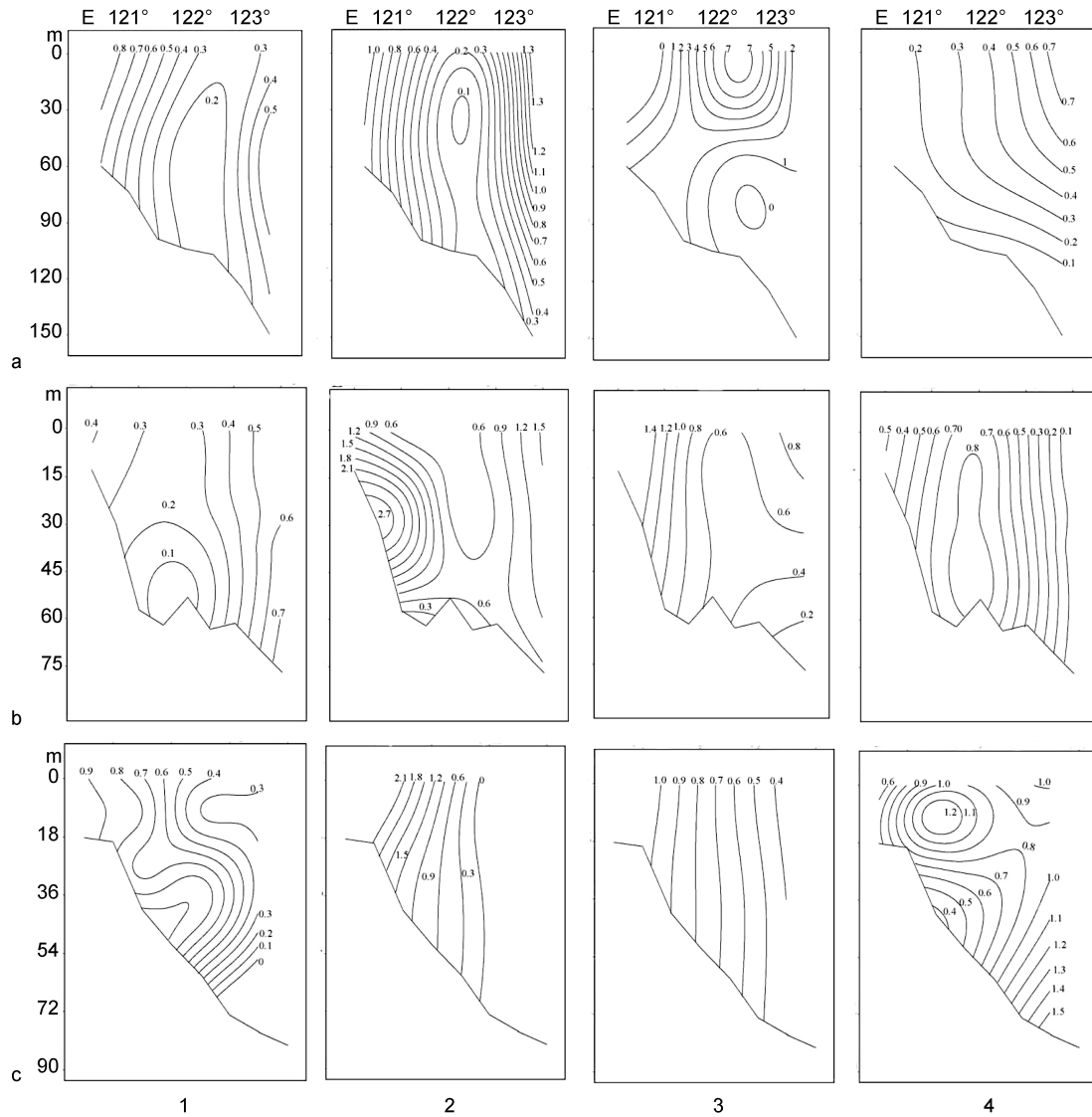
图3 各断面不同水深叶绿素 *a* (mg/m^3) 分布图

Fig.3 The distribution of chlorophyll *a* concentration (mg/m^3) at three sections in different depths
a. 34.5°N , b. 30.5°N , c. 26.5°N ; 1. 春季, 2. 夏季, 3. 秋季, 4. 冬季

部海区。由于温度降低和陆源营养物质注入减少, 杭州湾外、长江口外和长江口以北, 初级生产力平均水平与夏季相比明显降低(图4秋季)。

冬季, 初级生产力的变化范围为 $0.85\text{—}351.28 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$, 平均为 $102.60 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{ h})$ 。初级生产力分布较为均匀, 但是, 由于受到台湾暖流和黑潮的影响, 从台湾岛东北部一直延伸到济州岛西部, 初级生产力相对较高(图4冬季)。

3.2 初级生产力的季节变化特征

从表2可以看出, 东海区初级生产力水平为夏季>秋季>春季>冬季。春季因温度回升和长江冲淡水的影响, 初级生产力水平较高, 夏季, 因长江冲淡水总

量和影响范围的扩大, 初级生产力达到最大, 到了秋季, 温度已经不是限制初级生产力水平的因素, 初级生产力水平也较高, 冬季温度降低, 真光层浅, 初级生产力水平最低。本次调查结果与其它调查结果相比, 初级生产力明显高于1984—1985、1997—2000、2006—2007和2011年(宁修仁等, 1995; 唐启升, 2006; 王春生, 2011; 文斐等, 2012)历史同期的初级生产力水平。

3.3 主要渔场初级生产力特征

春季, 由于受到南下沿岸流和北上台湾暖流间的上升流影响, 五大渔场中, 鱼外渔场、鱼山渔场、和闽东渔场所在海域的初级生产力相对较高; 夏季,

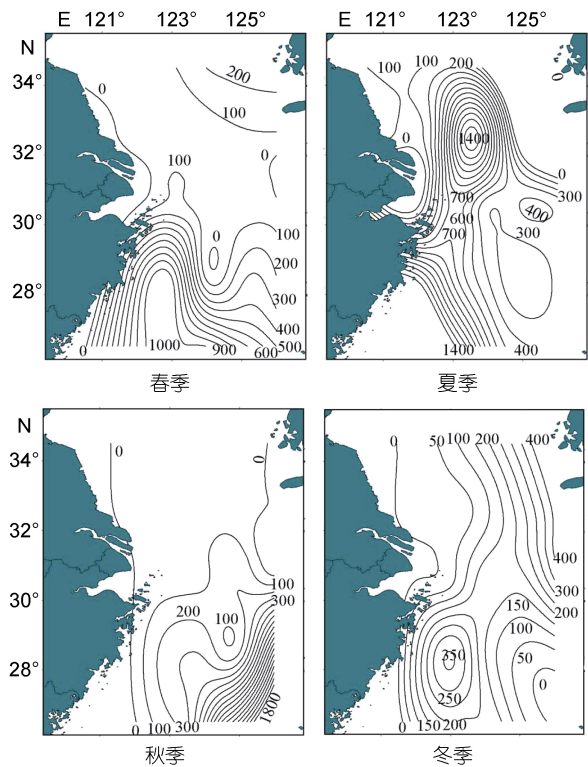


图 4 各季节初级生产力[$\text{mg}/(\text{m}^3 \text{h})$]平面分布图
Fig.4 Horizontal distribution of primary productivity [$\text{mg}/(\text{m}^3 \text{h})$] in different seasons

表 2 不同季节初级生产力
Tab.2 Primary productivity in different seasons

季节	春季	夏季	秋季	冬季	平均值
初级生产力 [$\text{mg}/(\text{m}^3 \text{h})$]	178.09	375.03	245.45	89.60	222.04
光照时间(h)	11.00	13.00	10.50	9.50	11.00
初级生产力 [$\text{mg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$]	2137.08	4500.36	2945.40	1075.20	2664.48

由于受到陆源冲淡水的影响,除海州湾渔场外,其它渔场所在海域的初级生产力均处于较高水平,鱼山鱼场最高,为 $680.07 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{h})$; 秋季,渔外渔场所在海域的初级生产力最高,为 $1277.59 \text{ mg}/(\text{m}^3 \text{h})$; 冬季,除海州湾渔场和吕泗渔场外,其它渔场的初级生产

力水平分布较均匀(表 3)。初级生产力年平均鱼外渔场最大,海州湾渔场最小,舟外渔场、鱼山渔场、闽东渔场、连清石渔场的初级生产力水平较高。

表 3 主要渔场的初级生产力[$\text{mg}/(\text{m}^3 \text{h})$]
Tab.3 Primary productivity [$\text{mg}/(\text{m}^3 \text{h})$] in major fishing grounds

重要渔场	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
海州湾渔场	21.19	54.34	7.58	1.16	21.07
连清石渔场	93.14	152.27	88.43	84.82	104.66
吕泗渔场	40.01	184.51	18.06	17.94	65.13
大沙渔场	53.31	861.70	37.96	93.42	261.60
舟山渔场	57.80	342.00	85.20	99.44	146.11
舟外渔场	20.52	374.27	74.44	340.67	161.06
鱼山渔场	516.91	680.07	192.55	171.19	390.18
鱼外渔场	202.11	323.48	1277.59	42.41	461.40
闽东渔场	245.31	239.73	658.18	27.71	292.73

3.4 叶绿素 *a* 的影响因素分析

控制东海区叶绿素 *a* 时空变化的因素复杂多变,不同海区叶绿素 *a* 时空变化的主要限制因素有所不同。本研究中,对四个航次的叶绿素 *a* 与浮游植物、温度、盐度、油类、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮和活性磷酸盐和氮磷比作相关性分析,从表 4 可以看出,叶绿素 *a* 与浮游植物丰度呈显著正相关;叶绿素 *a* 与春季和秋季的水温显著正相关,与春季和夏季的盐度显著负相关,说明春季和秋季的低温以及春季和夏季的低盐比较适合浮游植物的生长;春季叶绿素 *a* 与氨氮显著正相关,与活性磷酸盐显著负相关,与氮磷比显著正相关,因此,春季磷酸盐可能是限制初级生产力的限制因子,这与王保栋(2003)和文斐等(2012)的研究结果基本一致。秋季初级生产力与活性磷酸盐显著负相关,秋季虽然浮游植物大量生长,但是沿岸径流补充的氮盐依然可以满足浮游植物的生长,活性磷酸盐依然是浮游植物大量生长的限制因子。因此,活性磷酸盐可能是春季和秋季限制叶绿素 *a* 的重要因素。

表 4 叶绿素 *a* 与环境因子的相关性分析
Tab.4 Correlations between chlorophyll *a* and environmental factors

时间	浮游植物(水采)	水温	盐度	亚硝酸盐	硝酸盐	氨氮	活性磷酸盐	氮磷比
春季	0.928**	0.626**	-0.462*	-0.006	0.219	0.774**	-0.173**	0.232*
夏季	0.724**	-0.132	-0.673**	0.168	0.326	0.288	0.715	-0.455
秋季	0.120*	0.551**	0.112	-0.676	0.002	-0.074	-0.463*	-0.025
冬季	0.263*	0.030	-0.099	0.276	0.233	-0.075	0.004	-0.025

**表示 $P<0.01$, *表示 $P<0.05$

4 结论

四个航次叶绿素 *a* 浓度变化范围分别为 0.04—28.19、0.02—7.60、0.00—6.84、0.02—3.97 mg/m³, 平均值分别为 1.33、0.93、1.61 和 0.65 mg/m³, 秋季>春季>夏季>冬季。春季、夏季和秋季叶绿素 *a* 最大值出现在 0—10m, 冬季最大值则出现在底层。叶绿素 *a* 浓度的水平分布远岸年季变化小, 近岸年季变化大, 垂直分布年季变化较大。春季各站位初级生产力的变化范围为 4.17—1365.59 mg/(m³ h), 平均为 375.03 mg/(m³ h), 高值区主要分布调查的南部海区。夏季站位初级生产力的变化范围为 0.63—1637.21 mg/(m³ h), 平均为 414.37 mg/(m³ h) 整个东海区初级生产力均处于较高水平。秋季初级生产力的变化范围为 0.63—1637.21 mg/(m³ h), 平均为 245.45 mg/(m³ h), 高值区分布在调查的中部和南部海区。冬季, 初级生产力的变化范围为 0.85—351.28 mg/(m³ h), 平均为 102.60 mg/(m³ h), 整个东海初级生产力分布较为均匀。初级生产力平均值为夏季>秋季>春季>冬季。

叶绿素 *a* 浓度和初级生产力水平平均高于 1984—1985、1997—2000、2006—2007 年历史同期值, 原因可能是 2008 年东海区赤潮频发引起的结果。初级生产力年平均鱼外渔场最大, 海州湾渔场最小, 舟外渔场、鱼山渔场、闽东渔场、连清石渔场的初级生产力水平较高。叶绿素 *a* 和初级生产力有一定相关性。叶绿素 *a* 与浮游植物丰度显著正相关; 春季和秋季的低温以及春季和夏季的低盐比较适合浮游植物的生长; 活性磷酸盐可能是春季和秋季限制叶绿素 *a* 的重要因素。

致谢 同航次水温、盐度和营养盐数据分别由张洪亮老师和农业部渔业环境及水产品质量监督检验测试中心(舟山)提供, 张洪亮老师和李振华老师在作图中给予了大力帮助, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 王春生, 2011. 叶绿素 *a* 与初级生产力. 见: 我国近海海洋生物与生态调查研究报告(上). 杭州: 国家海洋局第二海洋研究所, 93—94
- 王保栋, 2003. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制.

- 应用生态学报, 14(7): 1122—1126
- 文 斐, 孙晓霞, 郑 珊等, 2012. 2011 年春、夏季黄、东海叶绿素 *a* 和初级生产力的时空变化特征. 海洋与湖沼, 43(3): 438—444
- 冯士筌, 李凤歧, 李少菁等, 1999. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 473—484
- 宁修仁, 史君贤, 刘子琳等, 1986. 长江口及浙江近海夏季叶绿素 *a* 和 ATP 的分布特征. 海洋学报, 8(5): 603—610
- 宁修仁, 史君贤, 蔡昱名等, 2004. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应. 海洋学报, 26(6): 96—105
- 宁修仁, 刘子琳, 史君贤, 1995. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估. 海洋学报, 17(3): 72—84
- 朱明远, 毛兴华, 吕瑞华, 1993. 黄海水域的叶绿素 *a* 和初级生产力. 黄渤海海洋, 11(3): 38—51
- 刘子琳, 宁修仁, 蔡昱明, 2001. 杭州湾-舟山渔场秋季浮游植物现存量 and 初级生产力. 海洋学报, 23(2): 93—99
- 孙晓霞, 任琳琳, 郑 珊等, 2012. 2011 年春夏季黄、东海浮游植物粒级结构. 海洋与湖沼, 43(3): 419—428
- 孙晓霞, 孙 松, 张永山等, 2011. 胶州湾叶绿素 *a* 及初级生产力的长期变化. 海洋与湖沼, 42(5): 654—661
- 李国胜, 王 芳, 梁 强等, 2003. 东海初级生产力遥感反演及其时空演化机制. 地理学报, 58(4): 483—493
- 邹景忠, 董丽萍, 秦保平, 1983. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. 海洋环境科学, 2(2): 41—54
- 国家技术监督局, 2007. 海洋调查规范海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 3—18
- 国家海洋局, 2009. 2008 年中国海洋灾害公报
- 周伟华, 袁翔城, 霍文毅等, 2004. 长江口邻域叶绿素 *a* 和初级生产力的分布. 海洋学报, 26(3): 143—150
- 周伟华, 霍文毅, 袁翔城等, 2003. 东海赤潮高发区春季叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征. 应用生态学报, 14(7): 1055—1059
- 费尊乐, 毛兴华, 朱明远等, 1988. 渤海生产力研究——I. 叶绿素 *a* 的分布特征与季节变化. 海洋学报, 10(1): 99—106
- 唐启升, 2006. 初级生产力. 见: 张合成, 王衍亮主编. 中国专属经济区海洋生物资源与栖息环境. 北京: 科学出版社, 224—275
- 黄邦钦, 刘 媛, 陈纪新等, 2006. 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, 28(2): 156—164
- 崔 毅, 陈碧鹃, 马绍赛, 2000. 乳山湾浮游植物与环境因子的相关关系研究. 应用生态学报, 11(6): 935—938
- 程家骅, 严利平, 林龙山等, 1999. 东海区伏季休渔渔业生态效果的分析研究. 中国水产科学, 6(4): 81—85
- 焦念志, 王 荣, 李超伦, 1998. 东海春季初级生产力与新生生产力的研究. 海洋与湖沼, 29(2): 135—140
- Ning X R, Vaulot D, Liu Z S *et al*, 1988. Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of Changjiang (Yangtse River) and the adjacent East China Sea. Marine Ecology Progress Series, 49: 141—150

ANNUAL VARIATIONS OF CHLOROPHYLL *a* AND PRIMARY PRODUCTIVITY IN THE EAST CHINA SEA

ZHANG Yu-Rong, DING Yue-Ping, LI Tie-Jun, XUE Bin, GUO Yuan-Ming

(Marine Fishery Institute of Zhejiang Province, Zhejiang Province Key Lab of Mariculture and Enhancement, Zhoushan 316100, China)

Abstract We analyzed the seasonal variations in horizontal and vertical distributions of chlorophyll *a* and primary productivity in the East China Sea based on investigation data collected during 2008—2009. Results show that chlorophyll *a* (Chl *a*) concentration in the four seasons from spring to winter was 1.33, 0.93, 1.61, and 0.65 mg/m³, respectively. Generally, maximum Chl *a* concentration was observed at 0—10m depth in spring, summer, and autumn, but at the bottom in winter. However, in the distant sea, Chl *a* concentration varied less in season, while in offshore area, vertical variation was observed. The primary productivity of the four seasons was 1375.03, 414.37, 245.45, and 102.60 mg/(m³ h), respectively. Both Chl *a* concentration and primary productivity were higher than those of the same periods in historical references. The highest average primary productivity was observed in the Yuwai Fishery, and lowest in Haizhou Bay Fishery. In addition, Chl *a* concentration and primary productivity were significantly positively interrelated. Low temperature in spring and autumn and low salinity in spring and summer were suitable for the growth of phytoplankton. Phosphate may be an important controlling factor to limit Chl *a* growth in spring and autumn.

Key words the East China Sea; chlorophyll *a*; primary productivity; seasonal variation; environmental factors