

2013 年和 2011 年夏季南黄海和东海表层悬浮颗粒物 中生物标志物的对比分析*

陈曦, 毕蓉**, 张海龙, 赵美训

(中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 分析了 2013 年夏季南黄海和东海 39 个站位的表层颗粒物样品, 获得菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮含量及其分布趋势。通过对比 2013 和 2011 年夏季南黄海和东海结果, 发现三种生物标志物的含量及其分布趋势大体一致。菜子甾醇、生物标志物总量(Σ PB)和叶绿素 a 的高值区与长链烯酮的低值区出现在长江口外海域, 说明研究海域生产力高值区在长江口外附近海域; 且进一步的分析表明, 营养盐是调控生产力分布的主要因素。在相同站位, 2013 年三类脂生物标志物含量总和是 2011 年的 2.3 倍, 这主要是因为 2013 年较大的长江冲淡水水量带来了较多的营养盐。另外, 2013 年东亚夏季风较强, 加强了长江冲淡水向外海扩散, 所以 2013 年生产力高值区比 2011 年略靠近东北方向的外海。2013 年菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮与 Σ PB 比值的高值区分别出现在长江口外海域、长江口外东南海域和南黄海中部海域, 表明硅藻和甲藻在生产力较高的长江口附近海域生长占优势, 而定鞭藻在生产力较低的南黄海中部生长占优势。通过对 2013 年和 2011 年夏季南黄海和东海生物标志物的对比分析, 证明了生物标志物不仅可以准确指示浮游植物生产力和群落结构, 而且可以有效地指示浮游植物生产力和群落结构年际间的变化。

关键词: 生物标志物; 南黄海和东海; 浮游植物; 生产力; 群落结构

中图分类号: P734

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2017)08-103-09

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20160144

引用格式: 陈曦, 毕蓉, 张海龙, 等. 2013 年和 2011 年夏季南黄海和东海表层悬浮颗粒物中生物标志物的对比分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(8): 103-111.

CHEN Xi, BI Rong, ZHANG Hai-Long, et al. Contrastive analysis of biomarkers in suspended particles in the southern Yellow Sea and East China Sea between the summer of 2013 and 2011[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(8): 103-111.

类脂生物标志物是示踪浮游植物生产力和群落结构的有效指标^[1-3]。在古海洋学研究中, 菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮含量已被广泛用来分别指示硅藻、甲藻和定鞭藻生产力^[4]; 类脂生物标志物的比值还可以用来指示浮游植物群落结构的变化^[5]。虽然某些生物标志物如菜子甾醇存在来源不唯一的问题, 但是在很多海域菜子甾醇与硅藻生产力存在很好的线性关系^[6], 因此菜子甾醇可以有效指示硅藻生产力的变化^[4, 5]。在现代海洋研究中, 类脂生物标志物也得到了广泛应用。例如, Hernandez 等用菜子甾醇和长链烯酮分析了克罗泽海台一次赤潮现象^[7]; Wakeham 等探究了西阿拉伯海甾醇生物标志物通量与季风的关系^[8]; Li 等用菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮来分析南海北部浮游植物生产力和群落结构的变化及其影响因素^[9];

Kannan 将甾醇类生物标志物与化学示踪剂和卫星观测相结合, 研究了南黄海受长江冲淡水影响海域的生态环境^[10]; Jeng 和 Huh 探究了长江冲淡水对东海甾醇和烯酮类生物标志物的分布影响^[3]。

黄海和东海是位于西北太平洋边缘的陆架海, 受到季风、黑潮入侵、冲淡水和地形的影响^[11-12]。因此, 浮游植物生产力和群落结构表现出从陆架到河口附近海域的显著梯度变化^[11, 13-15]。在黄海和东海, 叶绿素 a 已被广泛用于指示浮游植物生产力的变化。例如, Tang 等通过分析 1978 年 11 月—1986 年 6 月的中国陆架海域卫星水色遥感数据, 指出浮游植物色素浓度可能与季风相关, 而色素的空间分布可能受河流冲淡、上升流和沿岸流的影响, 高色素含量的沿岸海域将是良好的渔业养殖场所^[14]。Yamaguchi 等利用 SeaWi-

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(415210647)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(41521064).

收稿日期: 2016-04-25; 修订日期: 2016-06-03

作者简介: 陈曦(1990-), 女, 硕士。E-mail: chenxi@163.com

** 通讯作者: E-mail: rongbi@ouc.edu.cn

IFS 近十年来的叶绿素 a 数据,为了规避沿岸较高的颗粒物的影响产生的偏差,引入了修正后的 YOC SCHL 算法,分析得出长江口附近海域生产力较高的结论^[16]。生物标志物也已被应用于指示浮游植物生产力的变化。例如,董良分析了西太平洋表层颗粒物中的菜子甾醇、甲藻甾醇、直链烯酮和长链二醇的分布,发现利用生物标志物得到的浮游植物生物量与叶绿素具有良好的对应关系^[15]。目前,对黄海和东海表层水体中生物标志物的研究主要集中在河口沿岸海域^[3,10,17],而对于南黄海和东海陆架海域生物标志物分布的研究还较为匮乏。最近,Wu 等研究了 2011 年春季和夏季南黄海和东海生物标志物的分布特征,为运用生物标志物法重建古海洋生态环境提供了现代依据^[13]。然而,生物标志物对浮游植物年际间变化的指示作用,目前依然缺少系统研究。

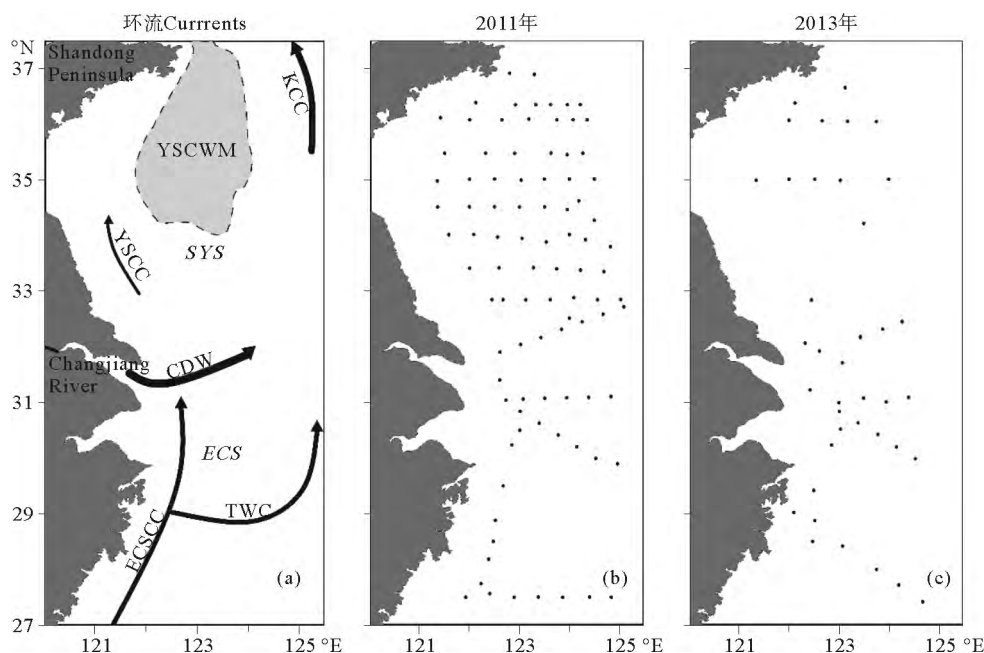
在本研究中,本文分析了 2013 年夏季南黄海和东

海表层颗粒物中的菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮含量及分布,并与同航次的水文参数、营养盐和叶绿素 a 作对比,为利用类脂生物标志物反演南黄海和东海浮游植物的生产力和群落结构提供新的证据。将 2013 年的结果与 2011 年的结果对比,首次利用生物标志物研究浮游植物生产力和群落结构的年际变化。

1 研究海域和实验方法

1.1 研究海域

中国东部的陆架海以长江口北侧的启东角到济州岛连线为界,北部是黄海,南部是东海(见图 1a)。长江是中国径流量最大的河流,尤其在夏季为东海输入大量的冲淡水。在南黄海,黄海沿岸流和朝鲜沿岸流夏季在表层由南向北流;黄海冷水团在夏季形成,存在于黄海中部 50 m 以下。在东海,夏季东海沿岸流混入台湾暖流在表层由南向北流。



((a)夏季研究海域表层环流图,根据 Bian 等^[11]修改;(b)2011 年站位图^[13];(c)2013 年站位图。SYS:南黄海;ECS:东海;KCC:朝鲜沿岸流;YSCC:黄海沿岸流;CDW:长江冲淡水;ECSCC:东海沿岸流;TWC:台湾暖流;YSCWM:黄海冷水团。(a)The currents in the surface layer of study area in summer^[11];(b)Sampling stations in 2011^[13];(c)Sampling stations in 2013. SYS: South Yellow Sea; ECS: East China Sea; KCC: Korea Coastal Current; YSCC: Yellow Sea Coastal Current; CDW: Changjiang Diluted Water; ECSCC: East China Sea Coastal Current; TWC: Taiwan Warm Current; YSCWM: Yellow Sea Cold Water Mass.)

图 1 研究海域环流图 (a)和站位图 (b 和 c)

Fig. 1 Schematic illustration of the surface currents in the study area (a) and sampling stations in summer of 2011 (b) and 2013 (c)

1.2 实验方法

通过 2013 年 7 月 13 日—8 月 2 日的 973 航次,获得了南黄海和东海 39 个站位的表层颗粒物样品,其中有 28 个站位与 2011 年(7 月 5 日—7 月 26 日)的站位相同(见图 1(b)和(c))。表层海水用 Whatman GF/F 膜(450℃灼烧 4h)过滤后,用铝箔纸包裹置于自封袋

中,记录过滤的海水体积,保存于-20℃至分析。

颗粒物滤膜经冷冻干燥后,剪成条状装入 Teflon 瓶中,加入 $n\text{-C}_{19}$ 醇内标,重复用 15 mL 的二氯甲烷:甲醇(3:1)溶液超声萃取,萃取液经氮气吹干后加入 5 mL 6% KOH 的甲醇溶液水解,超声 3 次后过夜,样品超声后用 4 mL 的正己烷超声萃取 8 遍,萃取液经氮

气吹干,将样品转移至硅胶柱中,用 22 mL 的正己烷将样品中的烷烃组分洗脱出来,然后用二氯甲烷:甲醇($v/v = 95:5$)溶液淋洗得到甾醇和烯酮组分。两种组分由氮气吹干后转移至细胞瓶,甾醇和烯酮类组分吹干后,加 80 μL 二氯甲烷和 80 μL 衍生化试剂(BST-FA),70 $^{\circ}\text{C}$ 下衍生化 1h,在干燥器中稳定后进行气相色谱分析。

分析所用的气相色谱型号为 Agilent 7890A,色谱柱为 50 m 的 HP-1 MethylSiloxane 毛细管柱。载气为氢气,流速为 35.0 mL/min。进样量为 1 μL 。手动进样,进样口温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ 。炉温初始温度为 80 $^{\circ}\text{C}$,以 25 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 200 $^{\circ}\text{C}$,然后以 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 250 $^{\circ}\text{C}$,再改为 1.6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 300 $^{\circ}\text{C}$,维持 12 min,再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 320 $^{\circ}\text{C}$,维持 5 min。FID 检测器温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ 。甾醇和烯酮的含量根据其峰面积和内标峰面积的比值计算得到。

2013 年获得 37 个站位的温度、盐度和叶绿素 a 数据,均由 CTD(SBE 9 plus, Sea-Bird Electronics Inc., USA)现场测得。其中温度和盐度数据有 25 个站位与 2011 年的站位相同,叶绿素 a 数据有 23 个站位与 2011 年的站位相同。

2013 年测定营养盐所用的水样从 CTD 采水器中现场采集,磷酸盐、亚硝酸盐和铵盐分别采用磷钼蓝法、重氮偶氮法和靛酚蓝法处理,使用 7230G 分光光度计进行测定。硝酸盐和硅酸盐分别采用铜镉还原法和硅钼蓝法处理,使用 Skalar San++ 营养盐全自动分析仪测定。其中有 19 个站位与 2011 年的站位相同。

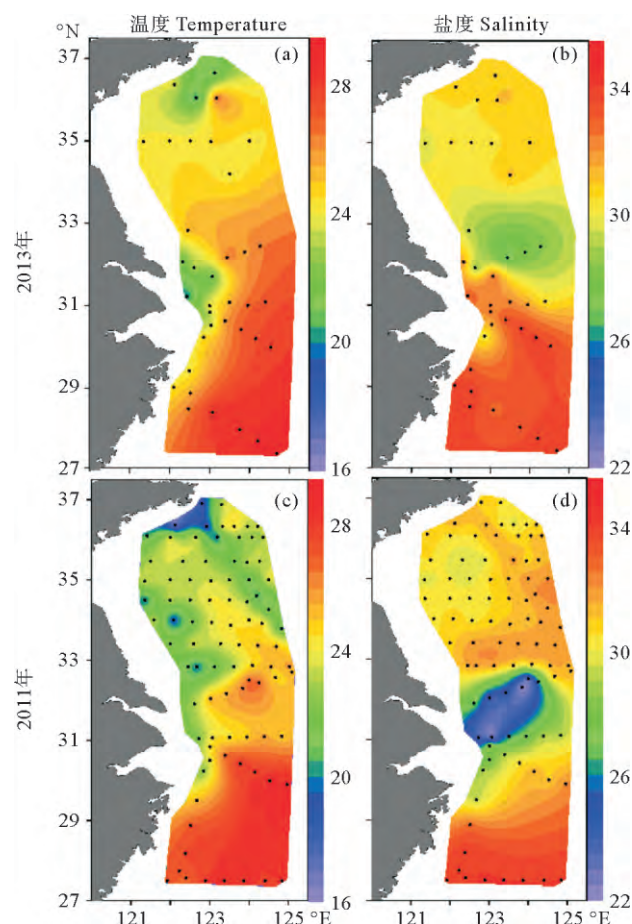
2 结果与讨论

2.1 水文和营养盐参数的时空分布特征

2013 年海表温度变化范围为 20.0~28.7 $^{\circ}\text{C}$ (平均值:25.0 $^{\circ}\text{C}$)。在相同站位,2013 年平均温度(25.1 $^{\circ}\text{C}$)稍高于 2011 年(平均值:24.2 $^{\circ}\text{C}$)。2013 年温度分布趋势大致由南向北逐渐降低,存在两个低值区:长江口外附近海域和山东半岛南部海域。2011 年南黄海温度偏低,分布与 2013 年大致相同(见图 2(a)和(c))。2013 年盐度变化范围为 27.1~33.9 PSU(平均值:31.5 PSU)。在相同站位,2013 年平均值(31.0 PSU)稍高于 2011 年(28.9 PSU)。2013 年盐度分布趋势与 2011 年大体一致,即在长江口东北部海域存在低值区;但低值区比 2011 年更靠近外海方向,且 2013 年的低值区不如 2011 年明显。由于 2013 年盐度的测量深度(4 m)比 2011 年(2~3 m)深,所以 2013 年长江口处盐度没有表现出明显的低值(见图 2(b)和(d))。

2013 年 DIN 含量的平均值为 7.72 $\mu\text{mol}/\text{L}$;在相同站位,2013 年 DIN 平均值(7.2 $\mu\text{mol}/\text{L}$)低于 2011

年(13.5 $\mu\text{mol}/\text{L}$)。DIP 含量的平均值为 0.36 $\mu\text{mol}/\text{L}$;在相同站位,2013 年平均值(0.32 $\mu\text{mol}/\text{L}$)低于 2011 年(0.37 $\mu\text{mol}/\text{L}$)。Si 含量的平均值为 9.97 $\mu\text{mol}/\text{L}$;在相同站位,2013 年平均值(9.1 $\mu\text{mol}/\text{L}$)低于 2011 年(10.6 $\mu\text{mol}/\text{L}$)(金海燕等,未发表数据)。综上所述,在相同站位,2013 年营养盐含量均低于 2011 年。这可能是因为 2013 年取样深度(4 m)略深于 2011 年(2~3 m),并且长江冲淡水带来的营养盐主要存在于表层^[18]。2011 年和 2013 年相比,营养盐高值区均出现在长江口附近海域。



(温度($^{\circ}\text{C}$;(a)和(c)),盐度(PSU;(b)和(d))。2013 年和 2011 年水文参数色条范围一样。2013 年的取样深度为 4 m,2011 年的取样深度为 2~3 m。Temperature ($^{\circ}\text{C}$;(a)and(c)), salinity (PSU; b and d). Note that ranges of color bars for hydrological parameters are the same between 2011 and 2013. The depth for sampling in 2013 was 4 m, and that in 2011 was 2~3 m.)

图 2 2013 年((a)和(b))和 2011 年((c)和(d))夏季南黄海和东海表层水文参数的分布

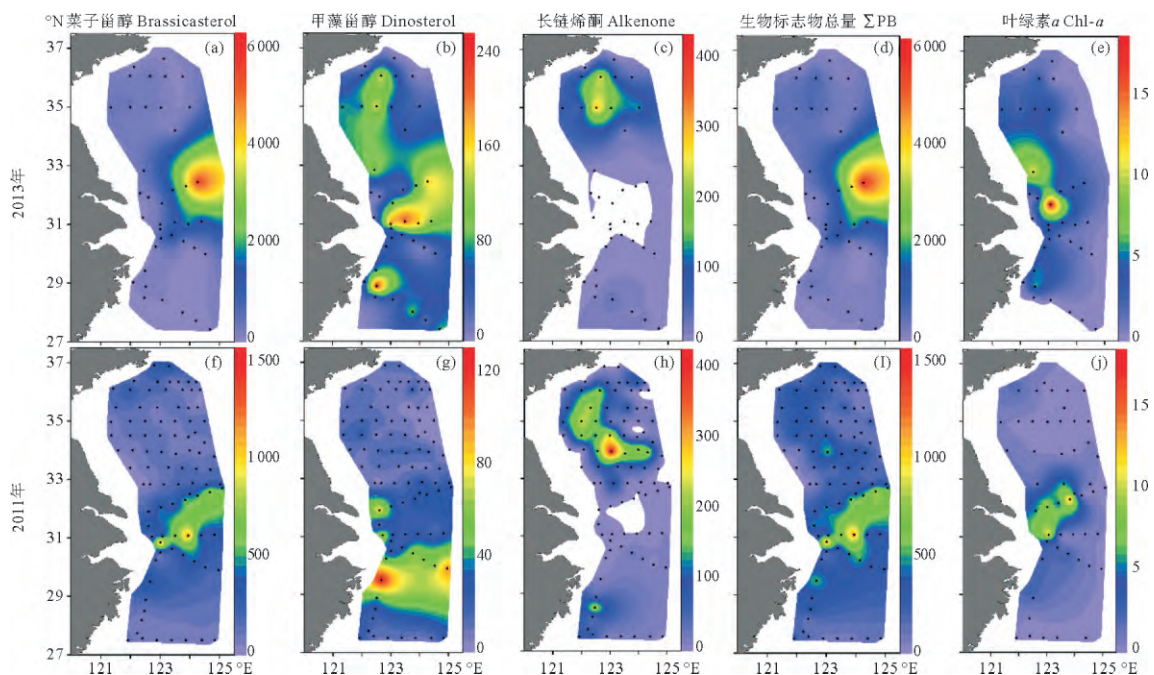
Fig. 2 Distributions of hydrological parameters in the surface water in the SYS and ECS in 2013 ((a)and(b)) and 2011 ((c)and(d))

2.2 生物标志物的时空分布特征及其对浮游植物生产力变化的指示作用

2013 年甾醇含量的变化范围为 37.3~5.342

ng/L(平均值:576.7 ng/L);在相同站位,2013 年平均
值(730.8 ng/L)是 2011 年(300.7 ng/L)的 2.4 倍。
2013 年菜子甾醇高值区出现在长江口东北部海域,分
布趋势与 2011 年大体一致,但比 2011 年高值区稍靠外
海(见图 3(a)和(f))。2013 年甲藻甾醇的含量变化范
围为 3.92~235.3 ng/L(平均值:70.7 ng/L);在相同站
位,2013 年平均值(80.5 ng/L)是 2011 年(31.4 ng/L)
的 2.6 倍。2013 年甲藻甾醇高值区出现在长江口东南
部海域和舟山群岛附近海域,大部分高值位于 2011 年
高值区的偏北部海域(见图 3(b)和(g))。2013 年长链
烯酮的含量变化范围 0~294.5 ng/L(平均值:33.1
ng/L);在相同站位,2013 年平均值(43.2 ng/L)与
2011 年(43.0 ng/L)相差不大。长链烯酮高值区位于
南黄海中部,与 2011 年的分布类似(见图 3(c)和(h))。
2013 年 Σ PB(菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮的总含

量)的变化范围为 42.10~5 503 ng/L(平均值:680.6
ng/L);在相同站位,2013 年平均值(854.4 ng/L)是
2011 年(374.1 ng/L)的 2.3 倍。2013 年 Σ PB 高值区
位于长江口东北部,分布趋势与 2011 年大体一致,但
比 2011 年高值区更靠外海,且与菜子甾醇的空间分布
类似(见图 3(d)和(i))。2013 年叶绿素 *a* 含量平均值
的变化范围为 0.065~18.0 μ g/L(平均值:2.71 μ g/L);
在相同站位,2013 年平均值(2.96 μ g/L)是 2011 年平
均值(2.43 μ g/L)的 1.2 倍。2013 年叶绿素 *a* 高值区
位于长江口附近海域,与 2011 年分布类似(见图 3(e)
和(j))。从总体分布趋势上看,3 种生物标志物及其含
量总和在 2011 年和 2013 年分布大体一致:菜子甾醇和
 Σ PB 高值出现在长江口附近海域,甲藻甾醇高值在长
江口东南部海域和舟山群岛附近海域,长链烯酮高值
在南黄海中部海域(长江口附近海域检测不到)。



(Σ PB: 菜子甾醇+甲藻甾醇+长链烯酮。注:2013 年菜子甾醇、甲藻甾醇、 Σ PB 的色条范围分别是 2011 年的 4 倍、2 倍和 4 倍,但是 2013 年和 2011 年长链烯酮和叶绿素 *a* 的色条范围一样大。 Σ PB: the sum of brassicasterol, dinosterol and C_{37} alkenones. Note that the range of color bar for brassicasterol, dinosterol and Σ PB in 2013 is 4, 2 and 4 times higher than that in 2011, respectively, but that for alkenones and chlorophyll-*a* is the same between 2013 and 2011.)

图 3 2013 年((a)~(e))和 2011 年((f)~(j))生物标志物和叶绿素 *a* 的分布

Fig. 3 Distributions of lipid biomarkers (ng/L) and chlorophyll-*a* (μ g/L) in surface suspended particles in 2013 ((a)~(e)) and 2011 ((f)~(j))

叶绿素 *a* 是指示浮游植物生产力的常用指标并已成功应用到本文的研究海域^[14,16]。实验结果显示, Σ PB 和叶绿素 *a* 具有相似分布趋势,即均在长江口附近海域有高值。而且相关性分析结果显示, Σ PB 和叶绿素 *a* 具有极显著的正相关(相关系数 $r=0.579$; $p<0.001$)。类脂生物标志物可以用来指示南黄海和东海

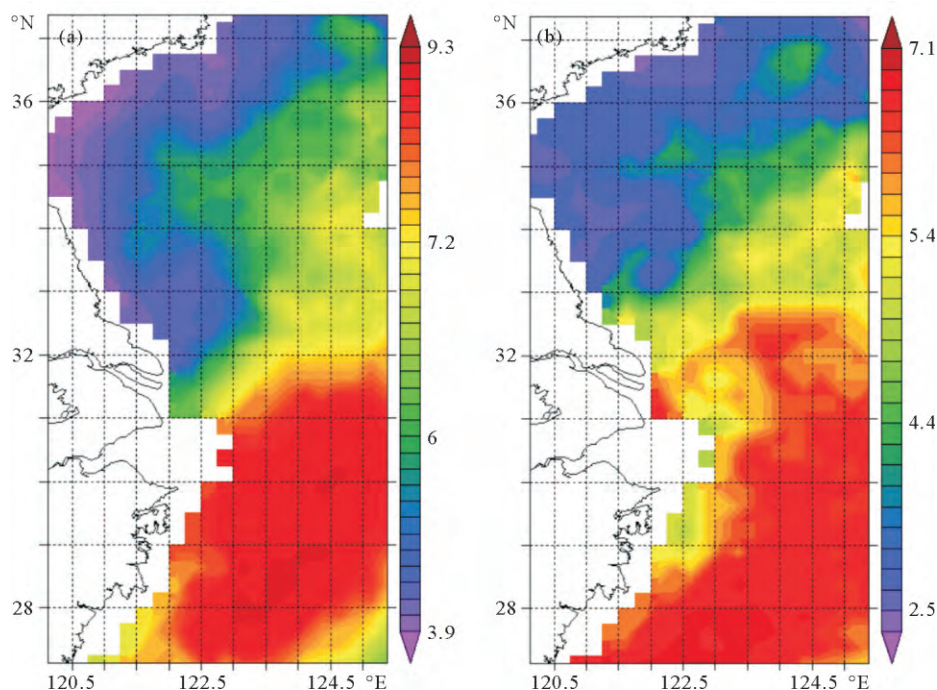
的浮游植物生产力。而 2013 年 Σ PB 比 2011 年的变化量高于叶绿素 *a* 的变化量,导致这种差异可能的因素有很多,且前人指出可能的因素包括:浮游植物中两种指标的产生量不同、以及两种指标对环境变化的响应程度和化学稳定性不同^[13]。

东海营养盐主要由长江冲淡水、台湾暖流和黑潮

控制;浓度是从富营养盐的长江口向寡营养盐的台湾暖流和黑潮表层水逐渐减少^[18]。本文分析表明:营养盐和生产力均在长江口附近海域有高值;盐度与 ΣPB 具有显著负相关(相关系数 $r = -0.482$; $p = 0.003$)。长江冲淡水的特点是低盐度高营养盐,低盐水在一定程度上可以表征长江冲淡水,盐度与生物标志物的负相关性又比较好,并且营养盐和生产力空间分布趋势大体是一致的,所以,高营养盐含量(和低盐度)的长江冲淡水导致了长江口外海域较高的浮游植物生物量^[19]。夏季,南黄海中部温跃层下边的黄海冷水团具有低温($< 10^{\circ}\text{C}$)、低溶解氧和高盐、富营养的特征^[20-21],而黄海中部表层水中的营养盐较少^[22],所以表层水中的浮游植物生长受到低营养盐的限制^[23-24]。但是南黄海南部海域依然受长江冲淡水影响,营养盐得以补充^[20]。生物标志物的研究结果为证明营养盐控制夏季南黄海和东海浮游植物生产力提供了更多的证据。

虽然 2011 和 2013 年生物标志物的分布趋势大体一致,但仍存在细微的差别,例如,2013 年菜子甾醇、甲藻甾醇、 ΣPB 和叶绿素 a 含量均高于 2011 年。根据 2011 和 2013 年长江流域及西南诸河水资源公报^[25-26],2011 年长江流域入海水量为 6 892 亿 m^3 ,2013 年长江

流域入海水量为 8 050 亿 m^3 ,因此 2013 年长江入海水量比 2011 年多 17%。夏季长江冲淡水轴从长江口向济州岛方向延伸^[18, 27-28],济州岛西南海域夏季高生产力主要受长江冲淡水带来的营养盐的影响,所以该海域表层的营养盐主要由长江冲淡水提供。根据前文分析,营养盐是调控研究海域生产力分布的主要因素。所以,相比 2011 年,2013 年流量较大的长江冲淡水带来更多的陆地营养盐,导致了 2013 年的生产力较高。另外,在空间分布上,2013 年菜子甾醇和 ΣPB 的高值区比 2011 年更靠近东北外海海域,所以 2013 年生产力高值区与 2011 年相比更靠近外海。根据卫星监测图像(见图 4)可以看出,2013 年 7 月长江口附近平均风速(7.2 m/s)比 2011 年 7 月(5.4 m/s)高出约 2 m/s,较强的风力有助于长江冲淡水向外海方向的扩展。所以,2013 年长江较大的径流量和较强的季风共同导致了 2013 年生产力高值区比 2011 年更向东北方向偏移。2013 年较大的风速导致海水混合加强,有助于把中层高盐度的海水混合到海表面,这也是 2013 年长江口附近海域盐度比 2011 年高的重要原因。另外,2011 年航次日期比 2013 年提前 8 天,而且由于风力的不同,潜水泵的下潜深度会有差别,这些都有可能导致两年生物标志物含量和分布不同。



(APDRC LAS7 for public)

图 4 2013 年 7 月(a)和 2011 年 7 月(b)南黄海和东海 10m 高度月平均风速卫星观测图

Fig. 4 Satellite observations of average wind speed at 10 m high in July of 2013 (a) and 2011 (b)

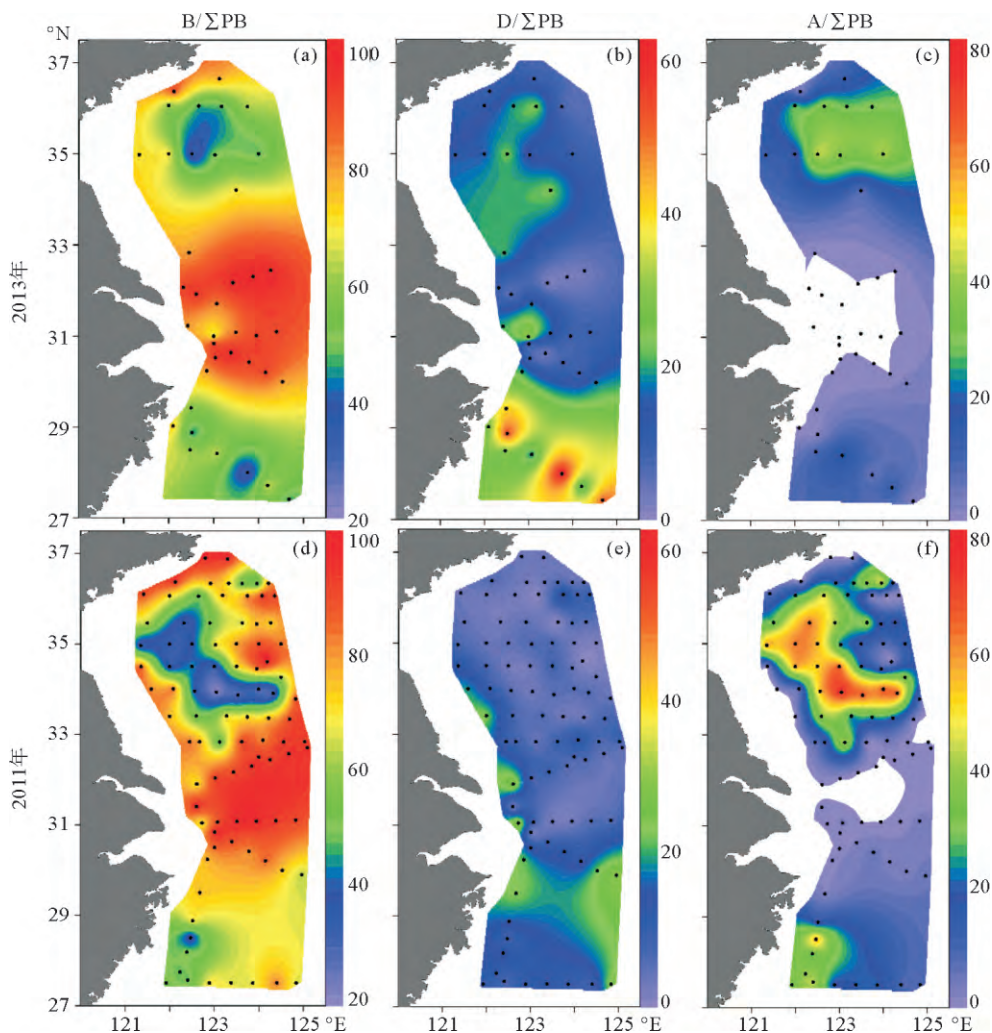
2.3 生物标志物对浮游植物群落结构的指示作用

为了探索不同微藻类群对总生产力的贡献以及群

落结构组成,分析了类脂生物标志物与 ΣPB 的比值在研究海域的变化情况。2013 年 $B/\Sigma PB$ 比值变化范围

为 31.6%~98.0% (平均值: 73.0%), 在长江口附近海域呈现高值; 同样, 2011 年 $B/\Sigma PB$ (范围: 21.0%~97.7% 平均值: 72.0%) 也是在长江口附近海域呈现高值。因此, $B/\Sigma PB$ 在两年中的分布趋势一致 (见图 5 (a) 和 (d))。菜子甾醇、 ΣPB 和 $B/\Sigma PB$ 具有较为类似的分布趋势, 均在长江口外海域有高值, 与 2011 年夏季的结果一致。2013 年 $D/\Sigma PB$ 比值变化范围为 1.97%~62.9% (平均值: 18.0%), 在长江口东南部海域有高值; 同样, 2011 年 (范围: 0~30.1%, 平均值: 8.29%) 也在长江口东南部海域有高值, 但 2013 年甲藻甾醇含量比例比 2011 年要高 (见图 5 (b) 和 (e))。2013 年 $A/\Sigma PB$ 比值变化范围为 0~45.1% (平均值: 9.0%), 在南黄海中部有高值; 同样, 2011 年 (范围: 0~76.1 平均值: 19.7) 也在南黄海中部有高值, 两年分布

趋势大体一致 (见图 5 (c) 和 (f))。上述的类脂生物标志物空间分布趋势与前人研究的浮游植物群落结构的分布趋势类似, 例如, 通过对夏季长江口和沿岸海域浮游植物的生长动力学和色素研究, 同样发现硅藻在河口海域生长占优势^[29]; 通过对长江口及毗邻海域表层色素的研究, 同样发现甲藻在长江口东南部海域含量较高^[30]; 通过对夏季南黄海表层海水色素的分析, 同样说明了定鞭藻在南黄海中部占优势^[31]。综上, $B/\Sigma PB$ 、 $D/\Sigma PB$ 和 $A/\Sigma PB$ 在 2011 年和 2013 年的分布趋势大体一致并且表明: 硅藻在长江口附近占优势, 甲藻在长江口东南部海域占优势, 而定鞭藻在南黄海中部占优势。上述分析表明, 类脂生物标志物与 ΣPB 的比值可以有效指示浮游植物的群落结构。



(菜子甾醇/ ΣPB ($B/\Sigma PB$) (a 和 d), 甲藻甾醇/ ΣPB ($D/\Sigma PB$) (b 和 e), 长链烯酮/ ΣPB ($A/\Sigma PB$) (c 和 f)。2013 年 (a~c) 和 2011 年 (d~f) 的色标范围相同。Brassicasterol/ ΣPB ($B/\Sigma PB$) (a 和 d), dinosterol/ ΣPB ($D/\Sigma PB$) (b 和 e) and C_{37} alkenones/ ΣPB ($A/\Sigma PB$) (c 和 f). Note that ranges of color bar for all parameters are the same between 2011 and 2013.)

图 5 2013 年 (a~c) 和 2011 年 (d~f) 生物标志物含量比值分布 (% of ΣPB)

Fig. 5 Distributions of individual lipid biomarker proportion (% of ΣPB) in surface suspended particles in 2013 (a~c) and 2011 (d~f)

风力导致的海水混合控制着营养盐的流通,而营养盐决定了营光合作用浮游植物的群落结构^[29]。Margalef 提出了浊度、营养盐和群落结构之间的经验关系:甲藻和颗石藻更适应混合较弱的水体,而硅藻更适应混合较强的水体,其中甲藻更适应富营养的环境,而颗石藻更适应寡营养的环境^[32-33]。Jiang 等观察到硅藻和甲藻在长江口及沿岸海域占据优势,硅藻在河口水域旺发,而甲藻在硅藻旺发海域以外生物量更丰富^[19]。Liu 等通过显微镜观察法观察到夏季南黄海硅藻和甲藻的生物量在营养盐含量较高的长江口东北部和山东半岛南部沿岸海域含量较高^[24]。本文结果表明,基于生物标志物法得到了与上述研究相同的结论,即菜子甾醇(指示硅藻)和甲藻甾醇(指示甲藻)高值区均出现在营养盐丰富的河口及沿岸海域。硅藻在水体混合较强的长江口附近海域占优势;而甲藻在长江口东海南部和沿岸海域更占优势,这可能与台湾暖流和黑潮带来的暖水性甲藻有关。另外,长链烯酮(指示定鞭藻)在营养盐丰富的长江口低至检测不到,而在南黄海中部含量比值却较高,这是由于南黄海中部的寡营养盐环境更适宜定鞭藻的生长,从而导致定鞭藻具有取代其他体型较大的藻种成为优势藻种的趋势^[34-36]。

3 结语

通过对比分析 2013 和 2011 年夏季南黄海和东海表层颗粒物中菜子甾醇、甲藻甾醇和长链烯酮的含量及分布,发现两年生物标志物的分布趋势大体一致。菜子甾醇高值区位于长江口外东北海域,甲藻甾醇高值区在长江口东南海域和舟山群岛附近海域,长链烯酮高值区在南黄海中部。 ΣPB 和叶绿素 a 之间相似的分布和较高的相关性证明类脂生物标志物可以作为浮游植物生产力的有效指标。三种生物标志物与 ΣPB 比值的空间分布与前人细胞计数法和色素法得到的相似结论也表明,类脂生物标志物可以作为浮游植物群落结构的有效指标。研究海域生产力高值区在长江口外附近海域,主要是受长江冲淡水带来的营养盐控制;南黄海生产力较低主要是夏季形成了黄海冷水团,海水层化导致表层营养盐较低。硅藻和甲藻在生产力较高的长江口附近海域占优势,而定鞭藻在生产力较低的南黄海中部生长占优势。2013 年三类脂生物标志物含量最高可达 2011 年相同站位的 2.6 倍,说明 2013 年生产力明显高于 2011 年,这主要是因为 2013 年较大的长江径流量带来了较多的营养盐。另外,2013 年东亚夏季风较强导致长江冲淡水向外海扩散较多,所以 2013 年生产力高值区比 2011 年更靠近外海。本研究进一步证明了生物标志物指示浮游植物生产力和群落结构的可行性,也证明了其指示浮游植物生产力和群

落结构年际间变化的能力。

致谢:本文所用营养盐数据由中国海洋局第二研究所金海燕课题组提供,作者对此表示诚挚谢意。

参考文献:

- [1] 王星辰,邢磊,张海龙,等. 北黄海-渤海表层沉积物中浮游植物生物标志物的分布特征及指示意义[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 69-73.
Wang X, Xing L, Zhang H, et al. Distribution of phytoplankton biomarkers in surface sediments from the North Yellow Sea and the Bohai Sea and its implication[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(5): 69-73
- [2] Tolosa I, Miquel J C, Gasser B, et al. Distribution of lipid biomarkers and carbon isotope fractionation in contrasting trophic environments of the South East Pacific[J]. Biogeosciences, 2008, 5(3): 949-968.
- [3] Jeng W L, Huh C A. Lipids in suspended matter and sediments from the East China Sea Shelf[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(5): 647-660.
- [4] Zhao M, Mercer J L, Eglinton G, et al. Comparative molecular biomarker assessment of phytoplankton paleoproductivity for the last 160 kyr off Cap Blanc, NW Africa[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(1): 72-97.
- [5] Schubert C J, Villanueva J, Calvert S E, et al. Stable phytoplankton community structure in the Arabian Sea over the past 200, 000 years[J]. Nature, 1998, 394(6693): 563-566.
- [6] 王妃. 东海和黄海硅藻、颗粒物及沉积物中的甾醇类生物标志物比较研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.
Wang F. Comparisons on Sterol Biomarkers from Algae Cultures, Suspended Particles and Marine Sediments in the East China Sea and the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [7] Hernandez M T, Mills R A, Pancost R D. Algal biomarkers in surface waters around the Crozet plateau[J]. Organic Geochemistry, 2008, 39(8): 1051-1057.
- [8] Wakeham S G, Peterson M L, Hedges J I, et al. Lipid biomarker fluxes in the Arabian Sea, with a comparison to the equatorial Pacific Ocean[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(12): 2265-2301.
- [9] Li L, Liu J, He J, et al. Factors affecting the abundance and community structure of the phytoplankton in northern South China Sea in the summer of 2008: A biomarker study[J]. Science Bulletin, 2014, 59(10): 981-991.
- [10] Kannan N, Kim M, Hong S H, et al. Chemical tracers, sterol biomarkers and satellite imagery in the study of a river plume ecosystem in the Yellow Sea[J]. Continental Shelf Research, 2012, 33(1): 29-36.
- [11] Bian C, Jiang W, Greatbatch R J. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2013, 118(11): 5908-5923.
- [12] Yanagi T, Takahashi S. Seasonal variation of circulations in the East China Sea and the Yellow Sea[J]. Journal of Oceanography, 1993, 49(5): 503-520.

- [13] Wu P, Bi R, Duan S, et al. Spatiotemporal variations of phytoplankton in the East China Sea and the Yellow Sea revealed by lipid biomarkers[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2016, 121: 109-125.
- [14] Tang D L, Ni I H, Müller-Karger F E, et al. Monthly Variation of Pigment Concentrations and Seasonal Winds in China's Marginal Seas[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 511(1): 1-15.
- [15] 董良, 李丽, 王慧, 等. 2008年冬季西太平洋表层海水浮游藻类分布特征——分子有机地球化学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012(1): 51-59.
- Dong L, Li L, Wang H, et al. Phytoplankton distribution in surface water of western Pacific during winter, 2008: A study of molecular organic geochemistry[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012(1): 51-59.
- [16] Yamaguchi H, Ishizaka J, Siswanto E, et al. Seasonal and spring interannual variations in satellite-observed chlorophyll-*a*, in the Yellow and East China Seas: New datasets with reduced interference from high concentration of resuspended sediment[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 59(2): 1-9.
- [17] Sicre M A, Tian R C, Saliot A. Distribution of sterols in the suspended particles of the Chang Jiang Estuary and adjacent East China Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21(1): 1-10.
- [18] Zhang J, Liu S M, Ren J L, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf[J]. *Progress in Oceanography*, 2007, 74(4): 449-478.
- [19] Jiang Z, Chen J, Zhou F, et al. Controlling factors of summer phytoplankton community in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent East China Sea shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 101: 71-84.
- [20] Liu X, Chiang K P, Liu S M, et al. Influence of the Yellow Sea Warm Current on phytoplankton community in the central Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers*, 2015, 106: 17-29.
- [21] Zhang S W, Wang Q Y, Lü Y, et al. Observation of the seasonal evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1996-1998[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(3): 442-457.
- [22] Ming X, Ma D, Wang B. Chemicohydrographic characteristics of the Yellow Sea Cold Water Mass[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(6): 5-11.
- [23] Fu M, Wang Z, Li Y, et al. Phytoplankton biomass size structure and its regulation in the Southern Yellow Sea (China): Seasonal variability[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2178-2194.
- [24] Liu H, Huang Y, Zhai W, et al. Phytoplankton communities and its controlling factors in summer and autumn in the southern Yellow Sea, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(2): 114-123.
- [25] 王新才, 杨永德, 郭海晋, 等. 2011年长江流域及西南诸河水资源公报[C]. 武汉: 长江出版社, 2011: 1-39.
- Wang X, Yang Y, Guo H, et al. Changjiang & southwest rivers water resources bulletin, 2011[C]. Wuhan: Changjiang Press, 2011: 1-39.
- [26] 王新才, 洪卫, 吴国平, 等. 2013年长江流域及西南诸河水资源公报[C]. 武汉: 长江出版社, 2013: 1-44.
- Wang X, Hong W, Wu G, et al. Changjiang & southwest rivers water resources bulletin, 2013[C]. Wuhan: Changjiang Press, 2013: 1-44.
- [27] Chen C, Xue P, Ding P, et al. Physical mechanisms for the offshore detachment of the Changjiang Diluted Water in the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(C2): 122-125.
- [28] Lie H J, Cho C H, Lee J H, et al. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(C3): 209-209.
- [29] Falkowski P G, Oliver M J. Mix and match: How climate selects phytoplankton [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, 5(10): 966-966.
- [30] 余小青, 金海燕, 陈建芳, 等. 2009年初夏长江口及毗邻海区表层浮游植物群落结构的色素表征[J]. *海洋学研究*, 2011, 29(3): 145-154.
- Yu X, Jin H, Chen J, et al. Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Changjiang River Estuary and its adjacent sea areas in summer 2009[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2011, 29(3): 145-154.
- [31] Liu, X, Huang B, Huang Q, et al. Seasonal phytoplankton response to physical processes in the southern Yellow Sea [J]. *Journal of Sea Research*, 2015, 95: 45-55.
- [32] Winder M, Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate[J]. *Hydrobiologia*, 2012, 698(1): 5-16.
- [33] Margalef R. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment[J]. *Oceanol Acta*, 1978, 1(4): 493-509.
- [34] Kinkel H, Baumann K H, ÇEpek M. Coccolithophores in the equatorial Atlantic Ocean; response to seasonal and Late Quaternary surface water variability [J]. *Marine Micropaleontology*, 2000, 39(1-4): 87-112.
- [35] Baumann K H, Andruleit H, Böckel B, et al. The significance of extant coccolithophores as indicators of ocean water masses, surface water temperature, and palaeoproductivity: a review [J]. *Paläontologische Zeitschrift*, 2005, 79(1): 93-112.
- [36] Furuya K, Hayashi M, Yabushita Y, et al. Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 367-387.

Contrastive Analysis of Biomarkers in Suspended Particles in the Southern Yellow Sea and East China Sea Between the Summer of 2013 and 2011

CHEN Xi, BI Rong, ZHANG Hai-Long, ZHAO Mei-Xun

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology of, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Three lipid biomarkers, brassicasterol, dinosterol and C_{37} alkenones, were analyzed in surface suspended particles in the southern Yellow Sea (SYS) and East China Sea (ECS) in the summer of 2013 and 2011. The distribution patterns of lipid biomarkers were broadly similar between the two years. High-value areas of brassicasterol, the sum of biomarkers (ΣPB) and chlorophyll-a, and low-value areas of C_{37} alkenones occurred in the adjacent areas of the Changjiang River Estuary (CRE). Our results indicate that productivity in the study area was mainly regulated by nutrients. At the same stations, ΣPB in 2013 was up to 2.3 times higher than that in 2011, with the higher productivity induced by the high nutrients of the larger runoff of the Changjiang Diluted Water (CDW) in 2013. In addition, the stronger East Asian summer monsoon in 2013 strengthened the diffusion of CDW and thus higher productivity. High-value areas of brassicasterol/ ΣPB , dinosterol/ ΣPB and C_{37} alkenones/ ΣPB occurred in the adjacent areas of the CRE, the southeastern of CRE and the central SYS in 2013, respectively. The distribution patterns were broadly similar with those in 2011. The results indicate the dominance of diatoms and dinoflagellates in the adjacent areas of the CRE with higher productivity, but coccolithophores in the central SYS with lower productivity. This study provides strong evidence not only for the accuracy of lipid biomarkers as proxies for phytoplankton productivity and community structure but also for their potential to be used to distinguish inter-annual variations of phytoplankton in the SYS and ECS.

Key words: biomarkers; southern Yellow Sea and East China Sea; phytoplankton; productivity; community structure

责任编辑 徐 环