

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2015.02033

近130年来北黄海浮游植物生产力和群落结构变化的沉积物生物标志物记录

郭世鑫^{1,2}, 张海龙^{1,2}, 刘东艳³, 杨海丽⁴, 赵美训^{1,2}

(1. 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, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋有机地球化学研究所, 青岛 266100;
3. 中国科学院 烟台海岸带研究所海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003;
4. 国家海洋局 第二海洋研究所国家海洋局海底科学重点实验室, 杭州 310012)

摘要:类脂生物标志物已被广泛用于重建海洋浮游植物生产力及群落结构变化,但是在北黄海和渤海的应用还不多。在²¹⁰Pb定年的基础上,对北黄海西南部箱式柱状样 B25 进行了生物标志物分析,利用其含量及相对比例变化重建了北黄海过去 130 年来浮游植物生产力及群落结构变化,并探讨了其变化规律对气候变化和人类活动的指示作用。结果表明:过去 130 年来,浮游植物生产力总体呈上升趋势,在 1975 年后显著增加。揭示了一种在我国边缘海群落结构变化的新特征,在 1965—1990 年间呈现硅藻比例下降和甲藻比例增加,而 1990 年之后则表现为硅藻比例增加和甲藻比例下降。北黄海近百年来浮游植物生产力的提高主要与东亚冬季风的增强和陆源输入增加有密切关系,而群落结构的改变可能是人类活动和气候变化共同作用的结果。

关键词: 生物标志物; 浮游植物生产力; 群落结构; 北黄海

中图分类号: P736.22 文献标识码: A 文章编号: 0256-1492(2015)02-0033-09

浮游植物是海洋生态系统中最主要的初级生产者,通过光合作用将海水中的无机离子转化为有机质,从而形成海洋生态系统食物链和能量流基础,控制着“生物泵”的效率,其生产力和群落结构变化影响着海洋生物地球化学循环的关键过程,从而对全球碳循环和气候变化产生重要影响^[1]。因此,充分了解浮游植物生产力及群落结构的时空变化规律和机制,有助于理解海洋生态系统对气候变化和人类活动的响应,揭示海洋生态系统的演变规律,对预测海洋生态环境未来变化趋势具有重要意义。

黄海是西太平洋一个半封闭的边缘海,习惯上以山东半岛东端的成山角到朝鲜的长串山之间的连线将黄海分为南黄海和北黄海两部分,北黄海面积约 7.1 万 km²,平均水深 38 m,山东半岛沿岸流、朝鲜沿岸流和黄海暖流余脉组成其主要流系^[2]。北黄海沉积物源主要来自黄河、鸭绿江、沿岸及岛屿侵蚀,每年有大量的陆源物质通过黄河经山东半岛沿岸流的搬运被输送至北黄海^[3-4]。大量陆源物质输

入、高生产力及较高的沉积速率促进黄海陆源和海源有机质在沉积物中的埋藏,使黄海成为一个非常重要的碳汇。另外,由于黄海处于亚洲季风影响区域,又靠近人类活动比较剧烈的经济发达地区,因此,其生态环境受到气候变化和人类活动的双重影响^[5]。

最近几十年来,黄海的生态系统结构已发生了剧烈变化。已有研究表明,由于过度捕捞和环境污染,造成黄海的生物多样性下降^[6]。与 20 世纪 80 年代相比,山东半岛近岸海域的初级生产力水平显著升高,自 20 世纪 50 年代以来,浮游植物的丰度及种类数均有增多的趋势^[7]。Liu 等^[8]通过对取自胶州湾中部的沉积物岩心中硅藻丰度和种类组成的研究表明,气候变化和人类活动引起的富营养化可能是导致近 30 年来硅藻种群结构改变的重要原因。但对北黄海浮游植物生产力和群落结构的研究主要以季节性变化和空间分布为主,长时间高分辨率的生产力和群落结构变化的报道还很少,因此,无法准确把握北黄海生态系统的百年尺度演变规律。

生物标志物是一类由特定生物产生的性质相对稳定的有机化合物,因其能记载特定的母源信息,并且其基本结构在沉降和成岩过程中能够较好保存,因此可用于古环境和古生态重建^[9]。目前,已有研究将脂肪烃、脂肪酸、多环芳烃、甾醇、直链醇、烯酮等生物标志物应用于我国边缘海。例如:Hu 等^[10]利用渤海表层沉积物中脂肪烃的分布指示了有机质

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428901);
国家自然科学基金项目(41221004)

作者简介:郭世鑫(1991—),男,硕士生,研究方向为海洋有机地球化学,E-mail:hh_gsx@163.com

通讯作者:赵美训(1959—),男,教授,主要从事海洋有机地球化学研究,E-mail:maxzhao@ouc.edu.cn

收稿日期:2014-06-11;改回日期:2014-10-09. 文凤英编辑

的分布和来源;鲁小红等^[11]分析了黄-渤海表层沉积物中正构烷烃和甾醇的质量分数和分子组合特征,通过解析有机质来源及空间差异,探讨了陆源输入对海洋有机质的贡献;Xing等^[12]通过对东海表层沉积物海源和陆源生物标志物的分析,得到了东海陆架有机质的来源和空间分布趋势;Hu等^[13]对取自南海北部沉积物岩心生物标志物和生源硅的测定表明,1925—2001年间,人类活动增加引起的南海北部沿岸水域富营养化是导致硅藻和甲藻生产力增加的主要原因。

尽管生物标志物已被广泛应用于我国边缘海,但还未见北黄海百年尺度浮游植物生产力和群落结构变化的报道。本文选择北黄海西南部的一个箱式柱状样,通过测定其生物标志物含量来重建过去130年浮游植物生产力和群落结构的变化,重点探讨气候变化和人类活动对海洋浮游植物生产力和群落结构的影响。

1 样品与方法

1.1 样品采集及保存

北黄海柱状样 B25(37°58' 204' N、122°36' 771' E;水深 51 m)于 2012 年 5 月由基金委共享航次,“东方红 2 号”科学调查船采用箱式采样器采集,插管获得。柱长 45 cm,每隔 1 cm 取样,共得 38 个样品,样品于 -20 °C 保存。采样站位如图 1 所示。

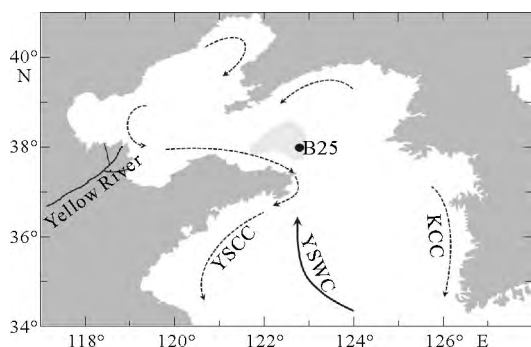


图 1 采样站位及北黄海冬季流系示意图^[14]

(YSWC: 黄海暖流; YSCC: 黄海沿岸流; KCC: 朝鲜沿岸流)

Fig. 1 Location of Core B25 and winter surface circulation in the North Yellow Sea^[14]

(YSWC: Yellow Sea Warm Current; YSCC: Yellow Sea Coastal Current; KCC: Korea Coastal Current)

1.2 实验方法

1.2.1 ²¹⁰Pb 定年

如图 2,柱状样 B25 采用²¹⁰Pb 定年,在国家海

洋局第二海洋研究所完成。根据 B25 柱样沉积物中²¹⁰Pb_{ex}比活度与柱样深度的分布规律可以发现,²¹⁰Pb_{ex}比活度随柱样深度呈指数衰减,可以利用 CIC (Constant Initial ²¹⁰Pb Concentration) 模式计算该站位的沉积速率,约为 0.28 cm/a,与前人在此区域得到的 0.2~0.3 cm/a 相一致^[15]。选取 2012 年为测年零点,时间跨度 134 年。²¹⁰Pb 定年结果表明,此站位近 130 年来沉积速率稳定,指示了稳定的物质来源、较均一的沉积速率。

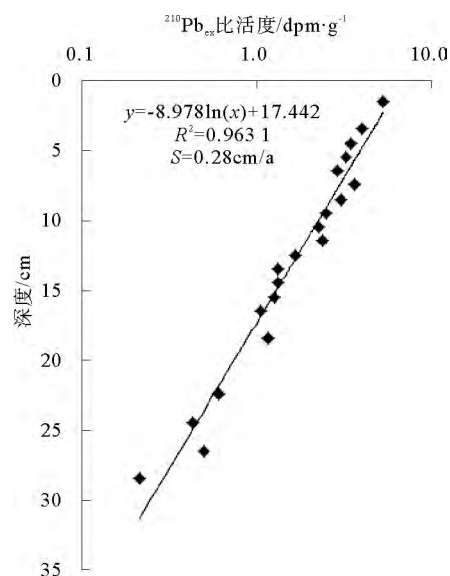


图 2 北黄海柱状样²¹⁰Pb_{ex}比活度随深度变化的曲线

Fig. 2 ²¹⁰Pb specific activity versus depth in the sediment core

1.2.2 TOC 的测定

样品经冷冻干燥、研磨后,取约 1 g 装入玻璃瓶中,用 4 mol/L 的 HCl 除去其中的碳酸钙,离心后去除上清液,加 5~7 mL Milli-Q 水,震荡,超声,离心,去除上清液,重复几次直至上清液呈中性。将洗至中性的样品放入烘箱,55 °C 下烘干,烘干后放入干燥器平衡 24 h,之后研磨使其均质化,称取适量样品用 CHN 元素分析仪(Thermo Flash 2000)测定 TOC 含量。样品测定的标准偏差为 ±0.02% (n=6)。

1.2.3 生物标志物的测定

生物标志物测定包括样品预处理和仪器分析。

样品预处理:将冷冻干燥的样品经研磨后,称取约 5 g 装入 Teflon 样品瓶中,加入萃取剂 CH₃OH : CH₂Cl₂ (v : v = 1 : 3) 和由 19 醇和 24 烷组成的内标,震荡,超声,离心,萃取 4 次,收集上清液于玻璃瓶中,在柔和 N₂ 流下吹干,加入 6% KOH/CH₃OH 溶液进行过夜碱水解。碱水解完成后进行硅胶柱层析分离,用正己烷淋洗得到含有烷烃的非

极性组分,用 $\text{CH}_3\text{OH}:\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ($v:v=5:95$) 淋洗得到含有甾醇和长链烯酮的中性组分,两种组分进行氮吹富集,非极性组分加异辛烷定容后直接上机分析,中性组分加衍生化试剂(BSTFA)和 CH_2Cl_2 衍生化处理(70°C , 1 h)后上机分析。

仪器分析:处理后的样品用气相色谱仪(GC, Agilent 6890N)定量分析,生物标志物的含量由其峰面积与内标峰面积对比计算得到。色谱条件:色谱柱为毛细管柱 HP-1(型号:19091Z-015, $50\text{ m}\times 0.32\text{ mm}\times 0.17\ \mu\text{m}$),进样口温度: 300°C ,FID 检测器温度: 300°C ,采用不分流进样, H_2 作为载气,流速 $1.2\text{ mL}/\text{min}$ 。柱箱初始炉温 80°C ,其升温程序为: 80°C 保持 1 min,以 $25^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 200°C ,再以 $4^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 250°C ,再以 $1.7^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 300°C 保持 15 min,再以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 320°C 保持 5 min。图 3 是其中一个样品(14~15 cm)中性组分的气相色谱图。

所用的生物标志物如下:菜子甾醇(Brassicasterol, B)指示硅藻;甲藻甾醇(Dinosterol, D)指示甲藻; C_{37} 长链烯酮(C_{37} -alkenones, A)指示颗石藻。3 种浮游植物生物标志物的总含量指示海洋浮游植物总生产力(Marine Organic Matter, $\text{MOM} = \text{A} + \text{B} + \text{D}$)的变化, $\text{C}_{28} + \text{C}_{30} + \text{C}_{32}$ 正构醇指示陆源输入(Terrestrial Organic Matter, $\text{TOM} = \text{C}_{28} + \text{C}_{30} + \text{C}_{32}\text{ n-alcohols}$)的变化,浮游植物生物标志物相对比例(B/MOM , D/MOM , A/MOM , D/B)指示群落结构的变化,TOC 为总有机碳含量。

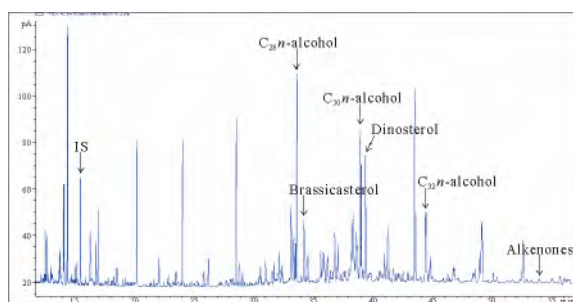


图 3 样品的气相色谱图(14~15 cm)

Fig. 3 GC spectrum of a sediment sample from B25 (14~15 cm)

2 结果

2.1 浮游植物生物标志物的含量

图 4a 是 B25 站位过去 130 年以来各浮游植物生物标志物含量及总量的变化。海源生物标志物

中,长链烯酮含量变化范围为 $18\sim 190\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,菜子甾醇为 $126\sim 780\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,甲藻甾醇为 $198\sim 1360\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。3 种浮游植物生物标志物的含量,甲藻甾醇最高,菜子甾醇次之,长链烯酮最低。菜子甾醇和甲藻甾醇的含量在 1975 年之前缓慢上升,1975 年之后迅速增加。长链烯酮的含量在 1975 年之前无明显变化,1975 年之后呈上升趋势。3 种浮游植物生物标志物总含量为 $357\sim 2330\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其变化趋势与菜子甾醇和甲藻甾醇较为一致,总体呈上升趋势,1975 年之后迅速增加。作为陆源生物标志物的 $\text{C}_{28} + \text{C}_{30} + \text{C}_{32}$ 正构醇含量变化为 $942\sim 1895\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,1975 年之后呈上升趋势。TOC 的变化范围为 $0.46\%\sim 0.69\%$,1960 年之前,TOC 处于相对低值且无明显变化趋势,1960—1985 年迅速增加,1985 年之后在高值波动。

2.2 浮游植物生物标志物的比例

图 5 是 B25 站位过去 130 年以来各浮游植物生物标志物相对比例的变化。1965 年之前,菜子甾醇的相对比例在 0.35 上下波动,甲藻甾醇的相对比例在 0.56 上下波动,且二者均无明显变化趋势;1965—1990 年,菜子甾醇相对比例自 0.33 下降至 0.25,在 1990 年达到最低值,甲藻甾醇相对比例自 0.61 上升至 0.65,在 1990 年达到最高值;1990 年之后,二者表现为相反的变化趋势,菜子甾醇相对比例上升,甲藻甾醇相对比例下降。130 年间长链烯酮的相对比例一直处于相对低值,在 0.08 上下波动。甲藻甾醇/菜子甾醇与甲藻甾醇相对比例的变化趋势较为一致,1965 年之前在 1.4 上下波动,1965—1990 年自 1.8 上升至 2.4,1990 年达到最高值,1990 年之后呈下降趋势。

3 讨论

3.1 浮游植物生产力的变化

甲藻甾醇主要由甲藻产生,可用于指示甲藻生产力;菜子甾醇作为硅藻的生物标志物已被广泛使用; C_{37} 长链烯酮由颗石藻产生,用于指示颗石藻的生产力^[9]。本文用菜子甾醇、甲藻甾醇和 C_{37} 长链烯酮的总含量指示海源浮游植物生产力, $\text{C}_{28} + \text{C}_{30} + \text{C}_{32}$ 正构醇指示陆源输入的变化。

过去 130 年间,各种生物标志物变化的总趋势是上升的,1975 年以来开始迅速上升,表层(0~3 cm)生标含量最高。脂肪酸、甾醇、烷烃等有机物在表层

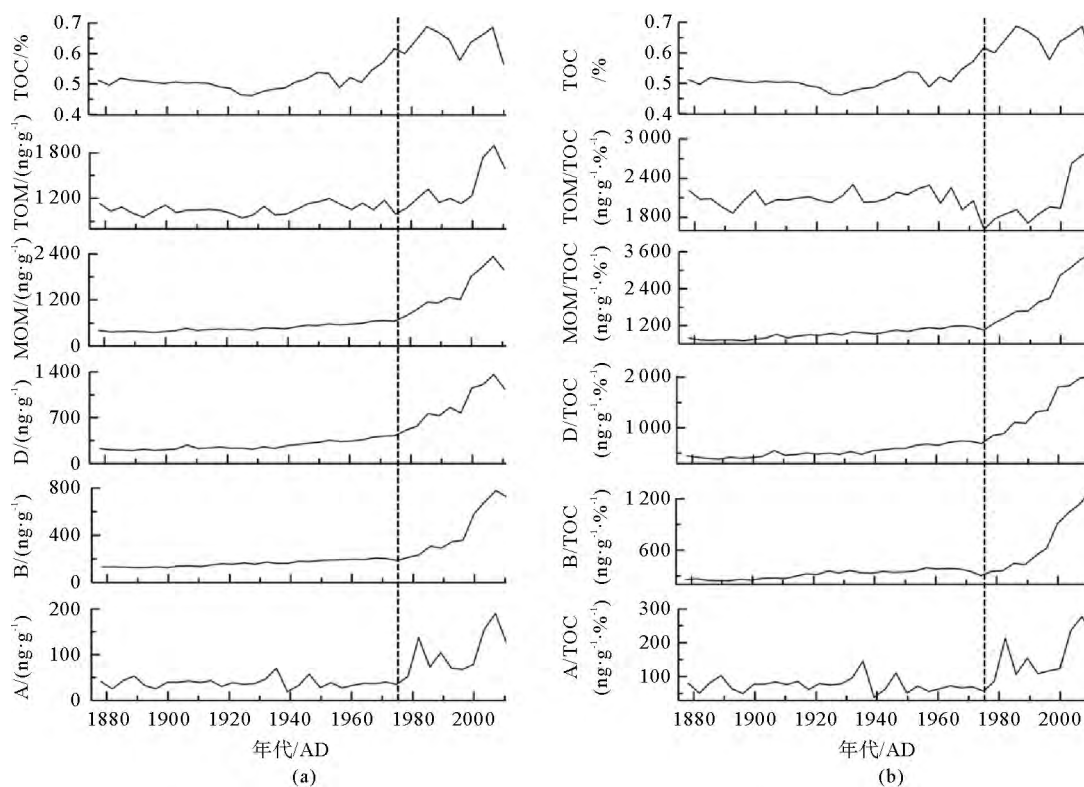


图 4 北黄海 B25 柱状样生物标志物含量($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$)(a)及其与 TOC 比值($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \%$)(b)的变化
(A: C_{37} 长链烯酮; B: 菜子甾醇; D: 甲藻甾醇; MOM: C_{37} 长链烯酮 + 菜子甾醇 + 甲藻甾醇; TOM: $\text{C}_{28} + \text{C}_{30} + \text{C}_{32}$ 正构醇;
TOC: 总有机碳; 虚线代表发生明显变化的时间)

Fig. 4 The variation in biomarker contents($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$) (a) and TOC-normalized biomarker contents($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \%$) (b) in the core B25

(A: C_{37} -alkenones; B: Brassicasterol; D: Dinosterol; MOM: the sum of C_{37} -alkenones, brassicasterol and dinosterol;
TOM: $\text{C}_{28} + \text{C}_{30} + \text{C}_{32}$ n-alcohols; TOC: Total Organic Carbon. Dashed lines represent the timing of major changes)

(0~2.5 cm)降解速率常数最高,而在表层之下的有机物则处于相对稳定状态^[16]。因此,表层生物标志物的高含量可能与有机质氧化降解程度低有关,受到了降解和输入的双重影响,而表层之下的生物标志物已完成了快速降解过程,主要受输入变化的影响。为消除粒度、沉积速率和成岩作用对生物标志物含量的影响,把生物标志物含量与 TOC 作比值,由图 4b 可以看出,各种生物标志物的含量与生物标志物/TOC 比值的变化趋势基本一致,这说明生物标志物含量的变化主要受生产和输入的影响。因此,海源生物标志物含量的变化可用来指示浮游植物生产力的变化,陆源生物标志物含量的变化可用来指示陆源输入的变化。

海源生物标志物含量的增加反映了浮游植物生产力的增加,浮游植物生产力的变化主要受营养盐浓度的影响,北黄海 B25 站位的营养盐浓度主要与陆源物质输入和季风有关。北黄海沉积物粒度和矿物组成与分布特征表明,北黄海西部的沉积物源以黄河输入为主,沿岸流和黄海暖流是山东近岸泥质

沉积搬运和沉积形成的主要动力^[4]。对黄河近 50 年来的入海水量和沉积物通量的研究表明,由于建坝和水利等人类活动以及 ENSO 加强引起的降雨减少,导致了近 50 年来黄河入海水量和沉积物通量的逐步下降^[17],2000—2004 年,黄河的年均入海水量和沉积物通量仅为 1950s 的 11.3%和 4.0%^[18]。由于农业化肥的使用、工业和家庭污水的排放,以及径流量的减小,近 50 年来黄河营养盐浓度显著增加,但黄河入海的 DIN 通量并未增加^[18]。

而 B25 站位的陆源生物标志物却指示了陆源输入的增加,这可能是由于北黄海的陆源物质主要来自沿岸流对黄河物质的搬运,近百年来增强的东亚冬季风^[19-20]一方面增加了近岸海域陆源物质的再悬浮作用,另一方面还增强了沿岸流的强度,从而使沿岸流搬运来了更多的陆源物质,导致了 B25 站位陆源输入的增加,进而提高了生产力。同时,冬季风的加强还可以增加混合层的厚度和强度,加强水体的垂直混合,沉积物和底层水与上层水的交换可以带来更多的营养盐,导致生产力上升。北黄海的陆

源物质除河流输入外,大气沉降也贡献了相当部分的营养盐,也对黄海海洋初级生产力产生了重要影响,其作用甚至比河流输入更为重要^[21]。冬季风的增强有利于陆源物质通过大气沉降输送到海洋,对我国北方近 50 年沙尘暴和扬沙天气的研究也表明,我国北方强沙尘暴的发生次数自 50 年代到 90 年代呈上升趋势,沙尘暴频数自 2000 年以来急剧增加^[22]。因此,大气沉降引起的陆源有机质输入增加也可能是 B25 站位浮游植物生产力增加的一个原因。但是由于数据的缺乏,目前还无法定量判断大气沉降带来营养盐入海通量的长期变化。因此,目前认为冬季风增强导致的陆源输入增加和海水混合程度加强,是导致 B25 站位浮游植物生产力增加的主要原因。

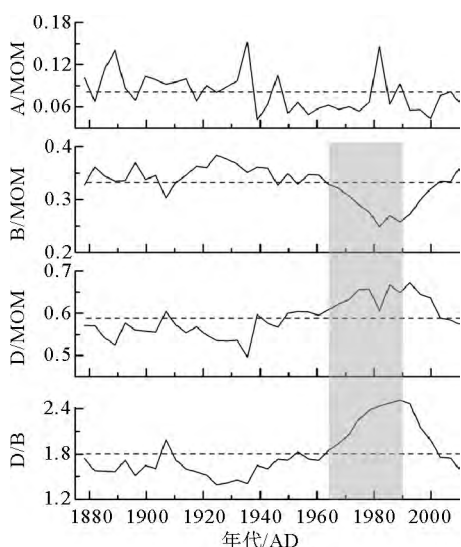


图 5 北黄海 B25 柱状样生物标志物相对比例的变化
(A: C₃₇ 长链烯酮; B: 菜子甾醇; D: 甲藻甾醇; MOM: C₃₇ 长链烯酮 + 菜子甾醇 + 甲藻甾醇; D/B: 甲藻甾醇/菜子甾醇; 虚线代表平均值, 阴影区域代表发生明显变化的时间)

Fig. 5 The variation in biomarker ratios in the core B25
(A: C₃₇-alkenones; B: Brassicasterol; D: Dinosterol; MOM: the sum of C₃₇-alkenones, brassicasterol and dinosterol; D/B: Dinosterol/Brassicasterol. Dashed lines represent the average values, and shaded areas indicate the timing of major changes)

3.2 浮游植物群落结构的变化

目前,由于菜子甾醇、甲藻甾醇、长链烯酮的细胞产量及其在环境中的保存效率还不清楚,因此,这 3 种生物标志物的相对比例并不能定量重建浮游植物群落结构,但其比例的变化可以指示群落结构的

变化趋势^[23]。如图 5,1965 年之前,浮游植物群落结构波动但是无明显变化趋势;1965—1990 年,硅藻比例下降、甲藻比例增加,甲藻/硅藻比值呈现上升的趋势;1990 年之后,硅藻比例增加、甲藻比例下降,甲藻/硅藻比值呈现下降的趋势;颗石藻比例一直在低值波动。

研究显示,颗石藻在高温高盐、低营养盐的条件下更具有竞争优势,而低温低盐的浅海环境则不利于颗石藻的生长^[24]。现代调查也显示,北黄海的浮游植物群落结构以硅藻、甲藻等温带近岸和广布性种为主^[25],这与本研究结果相一致。在高硅营养盐环境下,硅藻更具有竞争优势;而在 P、Si 相对缺乏,高 N/P 的环境下,硅藻的生长则受到抑制,甲藻更具有竞争优势,浮游植物的优势藻种会由硅藻向甲藻转变^[26]。

北黄海营养盐受黄河输入影响较大,因此,人类活动引起的营养盐结构变化可能对北黄海浮游植物群落结构产生较大影响。20 世纪 50、60 年代以来,随着农业的发展,化肥的使用、建坝以及城市污水和养殖废水的排放使河流入海营养盐的 N/P 增加,硅营养盐减少。1959—1998 年间,黄河口三角洲海域营养盐结构呈现 P、Si 减少,而 N/P 增加的趋势^[18],上述人类活动影响使甲藻更具有竞争优势。Zhang 等^[27]对渤海中部营养盐的动力学研究表明,由于 N/P 的增加和 Si/N 的下降,导致该海区硅藻/甲藻由 1958—1960 年的 56.5 下降至 1998—1999 年的 6.7(图 6)。对黄海 37°N 断面自 1976 到 2000 年营养盐和生态系统的调查研究也显示^[5],25 年间 P、Si 降低,N/P 增加,浮游植物优势藻种由硅藻向非硅藻(甲藻)转变,特别是 1985—1989 年间,P、Si 营养盐的浓度处于最低值,达到了硅藻生长的生态阈值,这与本研究 80 年代末硅藻相对比例处于最低值相

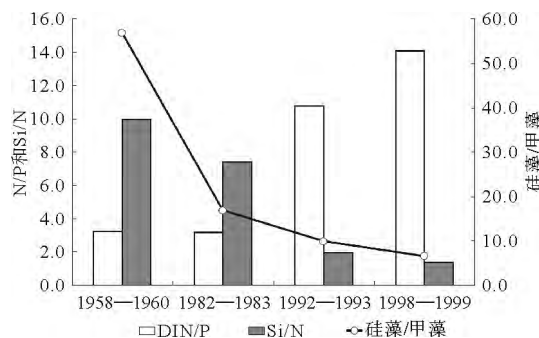


图 6 1958—1999 年渤海中部海域营养盐结构和硅藻/甲藻比值的变化^[28]

Fig. 6 Regime shift of nutrients and ratios of diatom to dinoflagellate in the Central Bohai Sea during 1958—1999^[28]

一致(图5)。因此,人类活动引起的营养盐结构改变是导致1965—1990年硅藻比例下降、甲藻比例增加的主要因素。

90年代以后,浮游植物群落结构表现为相反的变化趋势,甲藻比例下降、硅藻比例增加(图5)。这种转变在我国边缘海重建记录中是一个新现象,可能是多种因素共同作用的结果。对胶州湾近50年浮游植物群落结构的调查发现,1990年以来,中肋骨条藻(硅藻种)数量有明显增加,且在一年中的大部分季节常居优势地位,水域的富营养化和水温的变化是导致胶州湾浮游植物数量增加和群落结构改变的主要因素^[28];邢磊等^[29]对南黄海10694站位的研究显示,南黄海浮游植物群落结构在过去100年中有硅藻比例上升、甲藻比例下降的趋势,并认为这主要与东亚冬季风增强和ENSO增强所导致的冷涡加强、陆源输入加强和海水混合增强有关;金海燕等^[30]对取自长江口外沉积物柱状样生物硅和叶绿素的研究表明,1950s—1980s海洋浮游藻类以硅藻为主,1980s后硅藻生物量降低,其他藻类生物量有所增加,这是由营养盐浓度和结构的变化导致的;而Li等^[31]的研究也发现,由于长江向东海输送营养盐通量和比例的变化导致1980—2000年长江口赤潮种由硅质藻类向非硅质藻类转变。综上所述,在我国边缘海,不同环境因素的变化和人类活动的影响所引起浮游植物群落结构的变化不尽相同。对北黄海B25站位90年代以后浮游植物群落结构的改变可归结为以下几个因素:

(1)SST的影响。在全球变暖的大背景下,世界平均海水表面温度(SST)自20世纪以来已上升了 $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[32]。受北太平洋变暖事件的影响,我国边缘海SST也呈现上升趋势,1957—2005年间,黄海SST已上升 $0.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[33],全球变暖已对海洋生态系统产生了显著影响。Lin等^[34]通过对1960—1997年渤海SST的研究认为,SST的上升可能是导致浮游植物、浮游动物、鱼类等的生物量和多样性减少的原因。Lin等^[5]对黄海 37°N 断面SST的长期观测也显示,1976—2000年间黄海SST整体呈上升趋势。Wei等^[35]对1977—1998年黄海温盐的年际观测发现,22年间黄海海域的夏季平均SST无明显变化趋势,而冬季平均SST可分为两个阶段:1977—1990年黄海冬季平均SST呈明显上升趋势,1990—1998年SST虽比前一阶段要高,但只是在相对高值波动,并未呈现升温趋势。Liu等^[36]利用卫星遥感反演得到的1997—2011年渤海年际SST变化表明,最近十几年渤海SST呈下降

趋势。通过以上研究,对黄海SST变化规律可总结如下:1960—1990年黄海SST上升;1990—1997年黄海SST虽处于相对高值,但无明显变化趋势;1997—2011年黄海SST下降。

影响藻类生产力和种群结构的因素有pH值、盐度、营养盐、温度等,温度对藻类细胞生物化学反应过程的速率有重大影响,温度高时,反应速率增加,而对于硅藻,这种温度依赖性却不如其他因素重要,导致硅藻在温度低于年均温度时占据优势^[37]。对湖泊中浮游植物生长周期的研究发现,硅藻在低温时具有相对高的生长速率,这使它们相对于其他藻类更具有竞争优势,因为一些非硅质藻类在高温时($12\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$)才有较高的丰度^[38]。已有研究者发现,温度的变化会对硅藻产生较大影响,Vyverman等^[39]对巴布亚新几内亚不同海拔高度湖泊中硅藻种群结构的研究发现,硅藻种群结构的变化与海拔高度有显著的相关性,这种相关性可被用来构建反映海拔高度(也即湖泊水温)的硅藻-温度转换函数。Roseacute等^[40]也认为瑞典北部湖泊表层沉积物中硅藻群落组成可用来重建过去夏季气温的变化。而由于SST的升高,导致了近30年来胶州湾柱状沉积物中硅藻丰度的下降和暖性种比例的上升^[8]。1990年后黄海SST无明显增温趋势,自1997年黄海SST开始下降,本研究自1990年开始出现甲藻相对比例的下降,硅藻相对比例的增加,且甲藻相对比例下降到平均值($D/MOM=0.59$)以下也是在2000年左右,因此SST的降低可能使硅藻种群结构发生了改变,并使硅藻相对于甲藻更具有竞争优势,从而导致1990年后硅藻相对比例增加、甲藻相对比例下降(图5)。

(2)季风-混合的影响。黄海SST的下降在一定程度上也反映了冬季风的增强。研究表明,东亚冬季风异常与我国近海海域和黑潮区域海温异常有密切关系,异常强的冬季风会引起同期黑潮和我国近海海温异常降低^[41]。东亚冬季风具有明显的年际及年代际变化特征,目前处于年代际偏强的气候背景下,自90年代以来,东亚冬季风呈逐年增强趋势^[42],增强的冬季风促进了水体的混合作用,表层水与底层水的混合导致黄海SST的降低,而底层水较表层水更富含硅酸盐,由底层水带来的高含量硅酸盐更有利于硅藻的生长,造成1990年后硅藻相对比例的增加(图5)。

(3)营养盐结构的改变。2002年以来,黄河“调水调沙”对黄河口及邻近海域的营养盐和生态系统造成了一定的影响,“调水调沙”期间各营养盐的浓

度和组成均发生了明显变化,颗粒态营养盐的比例明显增加,氮的浓度、N/P 下降,磷与硅的浓度、Si/N 升高^[43]。自 2002—2009 年以来的八次“调水调沙”期间,黄河的入海水量和沉积物通量分别占到了全年的 14%~55% (平均 28%) 和 26%~66% (平均 41%)^[43],营养盐的输送量占到全年输送量的 27%~90%^[44]。“调水调沙”不仅增加了营养盐的输送量,而且进一步改变了营养盐结构,从而可能对渤海乃至北黄海的生态系统产生影响,导致浮游植物生产力和群落结构的转变,使硅藻比例增加、甲藻比例下降(图 5)。

4 结论

(1) 菜子甾醇、甲藻甾醇和 C₃₇ 长链烯酮等浮游植物生物标志物记录显示,北黄海 B25 站位过去 130 年来浮游植物生产力呈上升趋势,1975 年以来显著提高,这与近百年来增强的东亚冬季风导致的陆源输入增加和海水混合程度加强有密切关系;

(2) 自 1965 年以来,浮游植物群落结构发生了明显改变。1965—1990 年,硅藻比例下降、甲藻比例增加,人类活动引起的北黄海 Si 营养盐减少、N/P 比增加是导致该时期群落结构变化的主要因素;1990 年之后,硅藻比例增加、甲藻比例下降,这与北黄海 SST 的降低及营养盐结构的改变有关。而“调水调沙”对黄河三角洲海域及渤海浮游植物生产力和群落结构的影响,还有待进一步的观察研究。

致谢:感谢国家自然科学基金委 2012 年渤海共享航次提供所需样品;感谢中国海洋大学刘素美老师提供部分渤海数据。

参考文献 (References)

- [1] Archer D, Winguth A, Lea D, et al. What caused the glacial/interglacial atmospheric $p\text{CO}_2$ cycles? [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 159-189.
- [2] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 96-100. [SUN Xiangping. Chinese Coastal Marine[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008; 96-100.]
- [3] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1-2): 93-120.
- [4] 李安春, 李艳, 黄朋, 等. 北黄海沉积矿物组成分布特征及其物源环境意义[C]//中国海洋湖沼学会第十次全国会员代表大会暨学术研讨会论文集. 2012. [LI Anchun, LI Yan, HUANG Peng, et al. Sedimentary characteristics and mineral composition distribution in the North Yellow Sea and its provenance significance[C]// Symposium Proceedings of the tenth National Congress and the China Institute of Oceanology and Limnology. 2012.]
- [5] Lin C, Ning X, Su J, et al. Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976-2000 [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, 55(3): 223-234.
- [6] 刘瑞玉. 关于我国海洋生物资源的可持续利用[J]. *科技导报*, 2004(11): 28-31. [LIU Ruiyu. On sustainable exploitation of marine biological resources in China[J]. *Resource & Environment*, 2004(11): 28-31.]
- [7] 李先超. 山东近岸海域(黄海部分)生态环境现状及演变特征研究[D]. 中国海洋大学, 2011. [LI Xianchao. The study on the current ecological environment situation and its developmental feather in off-shore area of Shandong province (focus on Yellow Sea)[D]. Ocean University of China, 2011.]
- [8] Liu D, Sun J, Zhang J, et al. Response of the diatom flora in Jiaozhou Bay, China to environmental changes during the last century[J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 66(3-4): 279-290.
- [9] 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.
- [10] Hu L, Guo Z, Feng J, et al. Distributions and sources of bulk organic matter and aliphatic hydrocarbons in surface sediments of the Bohai Sea, China[J]. *Marine Chemistry*, 2009, 113(3-4): 197-211.
- [11] 鲁晓红, 陈颖军, 黄国培, 等. 黄渤海表层沉积物中正构烷烃和甾醇的分布及来源研究[J]. *生态环境学报*, 2011(Z1): 1117-1122. [LU Xiaohong, CHEN Yingjun, HUANG Guopei, et al. Distribution and sources of lipid biomarkers in surface sediments of the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011(Z1): 1117-1122.]
- [12] Xing L, Zhang H, Yuan Z, et al. Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Sea shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(10): 1106-1115.
- [13] Li D, Zhao M, Tian J, et al. Comparison and implication of TEX₈₆ and U37K' temperature records over the last 356kyr of ODP Site 1147 from the northern South China Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 376: 213-223.
- [14] Wang L, Yang Z, Zhang R, et al. Sea surface temperature records of core ZY2 from the central mud area in the South Yellow Sea during last 6 200 years and related effect of the Yellow Sea Warm Current [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(15): 1588-1595.
- [15] 胡邦琦, 李国刚, 李军, 等. 黄海、渤海铅-210 沉积速率的分布特征及其影响因素[J]. *海洋学报*, 2011, 33(6): 125-133. [HU Bangqi, LI Guogang, LI Jun, et al. Spatial variability of the ²¹⁰Pb sedimentation rates in the Bohai and Huanghai Seas and its influencing factors[J]. *Acta Oceanologica Sinica (Chinese Vision)*, 2011, 33(6): 125-133.]

- [16] Canuel E A M. Reactivity of recently deposited organic matter: Degradation of lipid compounds near the sediment-water interface[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(10): 1793-1806.
- [17] Liu F, Yang Q, Chen S, et al. Temporal and spatial variability of sediment flux into the sea from the three largest rivers in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 87: 102-115.
- [18] Fan H, Huang H. Response of coastal marine eco-environment to river fluxes into the sea: A case study of the Huanghe (Yellow) River mouth and adjacent waters[J]. *Marine environmental research*, 2008, 65(5): 378-387.
- [19] Wang H, Yang Z, Wang Y, et al. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3-4): 318-332.
- [20] 徐建军,朱乾根. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性[J]. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 1-8. [XU Jianjun, ZHU Qian-gen. Sudden and periodic changes of East Asian Winter Monsoon in the past century[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10(1): 1-8.]
- [21] Zhang J, Liu M G. Observations on nutrient elements and sulphate in atmospheric wet depositions over the northwest Pacific coastal oceans-Yellow Sea[J]. *Marine Chemistry*, 1994, 47(2): 173-189.
- [22] 钱正安,宋敏红,李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106-111. [QIAN Zheng'an, SONG Minhong, LI Wanyuan. Analyses on distribution variation and forecast sand-dust storms in recent 50 years in north China[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(2): 106-111.]
- [23] 丁玲,邢磊,赵美训. 生物标志物重建浮游植物生产力及群落结构研究进展[J]. *地球科学进展*, 2010(9): 981-989. [DING Ling, XING Lei, ZHAO Meixun. Applications of biomarkers for reconstructing phytoplankton productivity and community structure changes[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(9): 981-989.]
- [24] Falkowski P G, Oliver M J. Mix and match: how climate selects phytoplankton[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2007, 5(10): 813-819.
- [25] 杜秀宁,刘光兴. 2006年冬季北黄海网采浮游植物群落结构[J]. *海洋学报*, 2009, 31(5): 132-147. [DU Xiuning, LIU Guangxing. Community structure of net-phytoplankton in the northern Huanghai Sea in the winter of 2006[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(5): 132-147.]
- [26] Richardson K. Harmful or exceptional phytoplankton blooms in the marine ecosystem[J]. *Advances in Marine Biology*, 1997, 31: 301-385.
- [27] Zhang J, Yu Z G, Raabe T, et al. Dynamics of inorganic nutrient species in the Bohai Sea waters[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(3-4): 189-212.
- [28] 吴玉霖,孙松,张永山. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 487-498. [WU Yulin, SUN Song, ZHANG Yongshan. Long term change of environment and its influence on phytoplankton community structure in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6): 487-498.]
- [29] 邢磊,赵美训,张海龙,等. 二百年以来黄海浮游植物群落结构变化的生物标志物记录[J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2009, 39(2): 317-322. [XING Lei, ZHAO Meixun, ZHANG Hailong, et al. Biomarker records of phytoplankton community structure changes in the Yellow Sea over the last 200 years[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(2): 317-322.]
- [30] 金海燕,陈建芳,翁焕新,等. 长江口外赤潮多发区近几十年来的古生产力记录及环境意义[J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 113-119. [JIN Haiyan, CHEN Jianfang, WENG Huanxin, et al. Variations of paleoproductivity in the past decades and the environmental implications in the Changjiang Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 113-119.]
- [31] Li M, Xu K, Watanabe M, et al. Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(1-2): 3-12.
- [32] Jones P D, Trenberth K E, Ambejpe P, et al. Observations: surface and atmospheric climate change[C] // In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007: 235-336.
- [33] Belkin I M. Rapid warming of large marine ecosystems[J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 81(1-4): 207-213.
- [34] Lin C, Su J, Xu B, et al. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem[J]. *Progress in Oceanography*, 2001, 49(1): 7-19.
- [35] Wei H, Shi J, Lu Y, et al. Interannual and long-term hydrographic changes in the Yellow Sea during 1977-1998[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(11-12): 1025-1034.
- [36] Liu D, Wang Y. Trends of satellite derived chlorophyll-a (1997-2011) in the Bohai and Yellow Seas, China: Effects of bathymetry on seasonal and inter-annual patterns[J]. *Progress in Oceanography*, 2013, 116: 154-166.
- [37] Anderson N J. Miniview: Diatoms, temperature and climatic change[J]. *European Journal of Phycology*, 2000, 35(4): 307-314.
- [38] Denicola D M. Periphyton responses to temperature at different ecological levels[M]. *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego, California, 1996: 149-181.
- [39] Vyverman W. Diatom-temperature transfer functions based on the altitudinal zonation of diatom assemblages in Papua New Guinea: a possible tool in the reconstruction of regional palaeoclimatic changes[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1995,

- 13(1): 65-77.
- [40] Roseacute, N P, Hall R, et al. Diatom transfer-functions for quantifying past air temperature, pH and total organic carbon concentration from lakes in northern Sweden[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2000, 24(2): 109-123.
- [41] 李忠贤,陈建萍. 东亚冬季风与冬季黑潮海温异常的关系[J]. *江西气象科技*, 2005, 28(1): 10-14. [LI Zhongxian, CHEN Jianping. Relationship of East Asian Winter Monsoon and winter Kuroshio SSTA [J]. *Jiangxi Meteorological Science & Technology*, 2005, 28(1): 10-14.]
- [42] 王东阡,周兵,孙丞虎,等. 2012/2013 年东亚冬季风活动特征及其可能成因分析[J]. *气象*, 2013, 39(7): 930-937. [WANG Dongqian, ZHOU Bing, SUN Chenghu, et al. Features and possible causes for East Asian Winter Monsoon in 2012/2013[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(7): 930-937.]
- [43] Liu S M, Li L W, Zhang G L, et al. Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 430-431: 103-110.
- [44] 陈沛沛,刘素美,张桂玲,等. 黄河下游营养盐浓度、入海通量月变化及“人造洪峰”的影响[J]. *海洋学报*, 2013, 35(2): 59-71. [CHEN Peipei, LIU Sumei, ZHANG Guiling, et al. Monthly variations of nutrient concentrations and flux in the lower Huanghe River: under the influence of artificial floods [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(2): 59-71.]

SEDIMENT BIOMARKER RECORDS OF PHYTOPLANKTON PRODUCTIVITY AND COMMUNITY STRUCTURE CHANGES OF THE NORTH YELLOW SEA AND ITS IMPLICATIONS FOR CLIMATE CHANGE AND ANTHROPOGENIC ACTIVITIES OVER THE LAST 130 YEARS

GUO Shixin^{1,2}, ZHANG Hailong^{1,2}, LIU Dongyan³, YANG Haili⁴, ZHAO Meixun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Marine Organic Geochemistry, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai 264003, China; 4. Second Institute of Oceanography, SOA, Laboratory of Submarine Geoscience, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Biomarkers are now widely used in reconstruction of marine phytoplankton productivity and community structure changes. However, there are few biomarker records in the North Yellow Sea (NYS) and the Bohai Sea (BS). In this study, contents and ratios of various biomarkers for a ²¹⁰Pb dated core B25 from the North Yellow Sea are applied for the reconstruction of changes in phytoplankton productivity and community structure over the last 130 years. The results indicate that phytoplankton productivity increased gradually over the last 130 years and increased rapidly after 1975. From 1965 to 1990, the relative contribution of dinoflagellates increased and the relative contribution of diatoms decreased, but the trend was opposite since 1990. It suggests that the strengthened East Asia Winter Monsoon (EAWM) and increased terrestrial inputs caused higher phytoplankton productivity. The phytoplankton community structure changes are attributed to both anthropogenic activities and climate changes.

Key words: biomarker; North Yellow Sea; phytoplankton productivity; community structure