

南黄海近海富营养化长期演变的沉积记录*

杨 庶 杨 茜 曲克明 孙 耀^①

(中国水产科学研究院 黄海水产研究所 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛 266071)

摘要 限于现场调查起步晚、系统性不足,南黄海水体富营养化的历史演变进程目前尚不明确,严重制约了其形成机制及生态响应的深入研究。本文基于沉积物柱状样中保存的海洋环境演变信息,通过 ^{210}Pb 构建沉积物的年代学框架,利用生物硅指示古初级生产力,探讨了近 100 年来南黄海近海的富营养化进程。结果显示:1980s 以前,南黄海近海初级生产力总体偏低,其年代际波动与华北地区的干湿气候变化有关,水体未出现明显的富营养化;1980s 以后,初级生产力的波动背离了气候变化的调控,大幅升高了约 31%—254%,说明改革开放以后随着我国经济的快速发展,南黄海近海水体开始出现严重的富营养化。经分析得出,近年来大量含氮污染物的排放入海可能是导致该海域水体富营养化的主要原因。

关键词 南黄海;富营养化;沉积物柱状样;气候变化;人类活动

中图分类号 P734

doi: 10.11693/hyhz20160800170

改革开放以来,随着我国经济的快速发展,大量陆源污染物输入入海,近岸水体富营养化严重(Wang, 2006),造成赤潮、绿潮频发(周名江等, 2006; Tang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2013a, b; 吴在兴等, 2014),带来了严重的经济损失和生态安全风险。对近岸水体富营养化形成演变机制及生态响应的探讨与评估已成为我国海洋环境治理及保护工作的重中之重(王保栋等, 2012)。目前,在赤潮频发海域,比如渤海、长江口、珠江口等海域,由于研究起步相对较早,水体富营养化的研究工作已相对较为系统(Huang *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2007; 张志锋等, 2012; Yu *et al.*, 2012; Strokhal *et al.*, 2015),而在绿潮孕育和暴发的主要场所南黄海,水体富营养化的研究工作尚显薄弱。通过现场调查数据我们已经了解了南黄海水体营养盐的平面分布、季节及年际变化规律(Wang *et al.*, 2003; Lin *et al.*, 2005; 韦钦胜等, 2010; 韦钦胜等, 2011);富营养化的评价结果显示南黄海已经出现了明显的富营养化现象(徐明德等, 2006; 周斌等, 2010; Zhu *et al.*, 2014),而且绿潮的暴发也与该海域的富营养化密切

相关(Liu *et al.*, 2013a, b),但限于现场调查开展较晚、研究系统性不足,现在尚不清楚南黄海水体富营养化的长期演变过程。对于南黄海富营养化始于何时以及造成富营养的可能原因等基本问题,目前均不明确,这显然制约了该海域富营养化形成机制及生态响应的深入研究。

沉积物是记录海洋环境长期演变信息的有效载体。目前已有相关研究通过特征生物标志物反演古环境的演变(Turner *et al.*, 1994; Castañeda *et al.*, 2011; Rohrsen *et al.*, 2013)。一般来说,水体富营养化时,充足的营养物质能够明显促进浮游植物的生长,初级生产力常较往年大幅增加。基于此,沉积记录中初级生产力异常大幅增加的历史时期与水体富营养化时期存在较好的对应关系(Schelske *et al.*, 1983; Turner *et al.*, 1994),因此作为重建上覆水体古初级生产力的有效生物标志物,沉积物中的生物硅(biogenic silica, BSi)能够用于指示水体富营养化的演变过程(Schelske *et al.*, 1983; Turner *et al.*, 1994; Zimmerman *et al.*, 2000)。Turner 等(1994)及 Rabalais 等(2007)成功地

* 国家自然科学基金联合基金, U1406403 号; 国家重点基础研究发展计划(973 计划), 2010CB428902 号, 2015CB453303 号。

杨 庶, 助理研究员, E-mail: yangshu707@163.com

^① 通讯作者: 孙 耀, 研究员, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2016-08-12, 收修改稿日期: 2016-09-18

使用 BSi 沉积记录探讨了密西西比河口及墨西哥湾水体的富营养化进程。鉴于此, 本文考察了南黄海近海沉积物柱状样中记录的高分辨率沉积信息, 利用 BSi 探讨了近 100 年来南黄海近海初级生产力的年代际变化趋势, 并由此分析了该海域富营养化的长期演变过程。

1 材料与方法

1.1 采样位置及方法

南黄海近海毗邻我国山东省和江苏省, 并有起源于渤海湾的黄海沿岸流流经, 其生态环境除遵循自身海洋环境变化规律外还受到邻近省份及黄河流域等陆地环境的显著影响。

为了探讨该海域富营养化的长期演变进程, 本文于 2009 年 3 月利用箱式采泥器在山东半岛南部海域两个站位采集了沉积物柱状样(图 1), 其中 B19 站位($36^{\circ}00'05''\text{N}$, $121^{\circ}59'51''\text{E}$; 水深: 43m)沉积柱柱长 49cm, B18 站位($35^{\circ}30'07''\text{N}$, $122^{\circ}30'12''\text{E}$; 水深: 61m)沉积柱柱长 30cm, 沉积物均为泥质。

采样后, 沉积柱于 4°C 环境下冷藏保存, 直至完成分样。沉积柱表层以下 15cm 以 1cm 间隔分样, 其下以 2cm 间隔分样; 随后根据样品测定要求分别于室温或 60°C 烘干至恒重, 研磨粉碎, 过 120 目筛, 室温干燥保存备用。

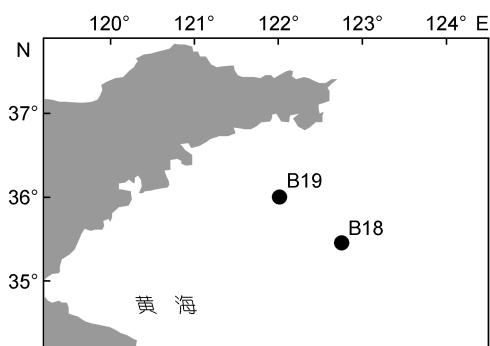


图 1 研究区域及采样站位

Fig.1 The study area and sampling stations

1.2 沉积物年代学测定

根据沉积物 ^{210}Pb 活度的垂直分布趋势, 估算相应海域的沉积速率(Goldberg, 1963), 随后以沉积物采样时间为测年基点, 构建沉积柱的年代学框架。其中 B18 站位沉积物 ^{210}Pb 活度在中国科技大学极地环境研究室利用高纯锗伽马能谱仪测定(Zhou *et al.*, 2012), B19 站位沉积物 ^{210}Pb 活度引自赵一阳等(1991)

的测定结果。

1.3 沉积物 BSi 的测定

BSi 的测定使用赵颖翥等(2005)的方法, 简单来说, 取适量研磨过筛后的沉积物干样, 分别使用 10% 的 H_2O_2 和 1mol/L 的盐酸处理以除去其中的有机物和碳酸盐, 然后使用 2mol/L 的 Na_2CO_3 溶液提取沉积物中的 BSi, 并通过硅钼蓝法测定其浓度。对 BSi 含量 $\geq 3\%$ 的样品, 本方法标准偏差为 0.05%, 当 BSi 含量 $< 3\%$ 时, 本方法标准偏差为 0.005%(杨茜, 2012)。

1.4 上覆水初级生产力长期演变趋势的构建

沉积物中 BSi 的积累与上覆水初级生产力有着密切的关系, 因此 BSi 的时空分布可被应用于古生产力的变化指示(Leinen *et al.*, 1986; Lyle *et al.*, 1988)。硅藻是南黄海近海浮游植物的优势种群, 比例可占 57%—99%(黄文祥等, 1984; 王俊, 2001; 吕末晓等, 2016), 故主要由硅藻产生的 BSi 能够有效指示该海域初级生产力的总体波动趋势; 而且现有研究结果也表明南黄海海域沉积物中 BSi 含量的波动与上覆水初级生产力的变化具有显著正相关关系(杨茜, 2012), 因此上覆水初级生产力的长期演变趋势总体类似于沉积物中 BSi 的长期变化趋势。本文即通过沉积物中 BSi 的长期变化趋势指示上覆水初级生产力的相对波动趋势。

2 结果

2.1 沉积物的年代学分析

B19 和 B18 站位沉积物的 ^{210}Pb 活度垂直分布均呈现明显的衰变趋势(图 2), 表明研究海域的沉积环境较为稳定, 其中 B19 站位沉积物表层存在 3cm 的混合层。经计算, B19 和 B18 海域沉积物的沉积速率分别约为 0.44cm/a 和 0.17cm/a, 以沉积物采样年份 2009 年为测年基点进行估算, 两站位沉积柱均为近 100 余年的沉积。

2.2 沉积物的 BSi 含量及垂直分布趋势

南黄海近海沉积物中 BSi 含量在 0.89%—8.26% 之间, 其中 B19 站位平均为 $3.35\% \pm 2.61\%$, 高于 B18 站位的 $1.98\% \pm 0.39\%$ 。该海域沉积物的 BSi 含量与浙江近岸海域相近(周鹏, 2007), 明显高于长江口外海域(叶曦雯等, 2004; 赵颖翥等, 2005)。随着沉积物深度的变化, 两站位 BSi 含量均波动明显, 不过 B18 站位的波动振幅相对较小(图 3)。虽然两站位 BSi 随深度的波动趋势差异明显, 不过在近表层沉积物中即近代沉积中, 两者 BSi 的含量均出现明显升高。

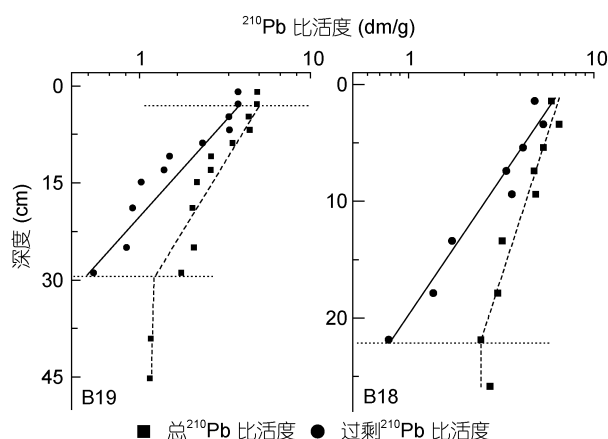


图2 南黄海近海沉积物中 ^{210}Pb 活度的垂直分布趋势
Fig.2 Vertical distributions of sedimental ^{210}Pb activity in coastal waters of the southern Yellow Sea

2.3 上覆水初级生产力的年代际波动趋势

沉积物 BSi 的含量受到粒度、沉积环境、上覆水初级生产力等多种环境因素的影响(Loucaides *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2014)。在本文的研究中, B19 和 B18 沉积物中 ^{210}Pb 活度的垂直分布均表现为典型的衰变趋势, 而且沉积物粒度总体波动不大, 表明近 100 年来该海域的沉积环境较为稳定, 因此沉积物中 BSi 的波动主要受控于上覆水体中浮游植物的生长繁殖。据此, 本文认为南黄海近海初级生产力的长期演变趋势类似于沉积物中 BSi 的长期变化趋势。

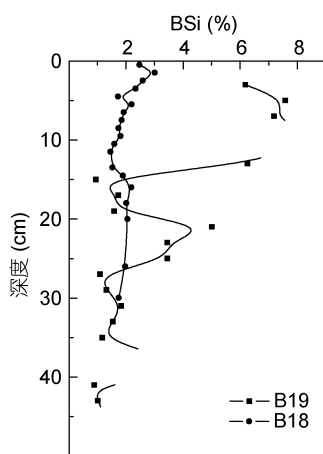


图3 南黄海近海沉积物中 BSi 的垂直分布趋势
Fig.3 Vertical distributions of sedimental BSi in coastal waters of the southern Yellow Sea

虽然两站位 BSi 随深度的波动趋势差异较大, 但考虑沉积速率的差异后, 两站位 BSi 的时间序列显现相似的波动趋势(图 4)。在近 100 余年里南黄海近海沉积物中的 BSi 及上覆水初级生产力均存在明显波

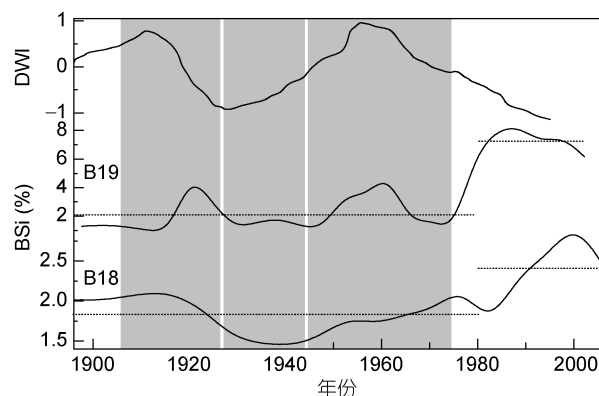


图4 南黄海近海上覆水初级生产力(沉积物 BSi)和华北平原及邻近地域干湿指数(DWI)的年代际波动趋势

Fig.4 Decadal changes in primary productivity (indicated by sedimental BSi) in coastal waters of the southern Yellow Sea and dry-wet index in North China Plain and adjacent areas (DWI)
注: 华北平原及邻近地域干湿指数的原始数据引自 Zheng 等 (2006), 本文使用其 10 年移动平均处理结果

动, 其中在 1920s、1960s 以及 1980s 以来三个时期相对较高, 而在 1930s 明显较低。

需说明的是, B19 站位更靠近陆地, 其沉积物中 BSi 含量明显高于远离近岸的 B18 站位, 这可能指示了随着离岸距离的增加, 水体初级生产力明显降低。不过由于本文更关注初级生产力长期波动的相对趋势, 故在此不会深入探讨不同站位间 BSi 以及初级生产力数值上的差异。

3 讨论

3.1 南黄海近海初级生产力年代际波动的驱动因素分析

近百余年来, 南黄海近海初级生产力呈现明显的年代际波动。1980s 以前, 南黄海近海初级生产力的变化与华北平原及邻近地域(包括山东省全部)干湿指数(dry-wet index, DWI)的波动趋势(Zheng *et al.*, 2006)具有较好的对应关系。在 1910s—1920s 和 1950s—1960s 华北平原及邻近地域 DWI 较高时, 即气候相对湿润多雨时, 南黄海近海初级生产力总体较高; 而在华北平原及邻近地域干旱少雨的 1930s, 初级生产力明显降低。这很可能反映了陆地生态环境对临近海洋生态环境的影响。在南黄海近海, 陆源营养物质的输入是真光层水体营养盐补充的重要途径(Shi *et al.*, 2015)。当华北平原及邻近地域湿润多雨时(1910s—1920s 和 1950s—1960s), 随着降雨量的增加, 大量陆源营养物质由陆地径流输入近岸海域, 能够有效提高近海水体的营养盐水平, 有利于浮游植物的生长, 从而促使初

级生产力升高(Maneesha *et al.*, 2011; Reichwaldt *et al.*, 2012; Valiela *et al.*, 2012); 而在华北平原及邻近地域干旱少雨的 1930s, 由于陆地径流的减少, 南黄海近海的陆源营养物质补充量降低, 可能造成水体营养水平相对偏低, 从而限制了浮游植物的生长, 初级生产力相对偏低。因此在 1980s 以前南黄海初级生产力的波动与临近陆地的干湿气候关系密切。

1980s 以后, 华北平原及邻近地域降雨量明显减弱, 若没有其他因素影响, 陆源营养物质的输入随地面径流的减少而减少, 南黄海近海的初级生产力理应呈现降低的趋势, 而实际上, 此时浮游植物初级生产力明显升高, 这可能是受到了人类活动的显著影响所致。改革开放以后, 随着我国经济的快速发展, 大量陆源污染物排入近海, 充足的营养盐补给能够明显促进浮游植物的生长(Dai *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2015)。黄海暖流和黄海冷水团同样能够影响南黄海近海水体的营养盐分布, 但对 1980s 以后该海域初级生产力急剧升高的贡献可能较为有限。黄海暖流发源于外海, 水团营养盐水平总体较低, 不足以支撑南黄海近海初级生产力的急剧升高。黄海冷水团的垂向输运虽然是南黄海表层水体营养盐补充的重要途径之一, 但一方面近年来黄海表层水温的增加不利于该海域水体的垂向混合(Lin *et al.*, 2005), 黄海冷水团对表层营养盐的补充反而受到阻碍; 另一方面文献资料显示近年来黄海冷水团水体的营养盐水平并未发生明显的增加(王保栋等, 1999; 米铁柱等, 2012), 故源自黄海冷水团的营养盐补充难以明显提高近年来南黄海近海表层水体的营养盐水平, 并进而支撑南黄海近海初级生产力的增加。因此 1980s 以后, 南黄海近海浮游植物初级生产力的急剧增加可能主要受到人类活动的影响。

3.2 南黄海近海富营养化的历史演变进程

1980s 以前, B19 和 B18 站位沉积物中 BSi 虽有波动, 但总体偏低, 平均分别为 $2.05\% \pm 1.33\%$ 和 $1.83\% \pm 0.23\%$, 此时南黄海初级生产力相对较低。而 1980s 前后, 两站位 BSi 急剧升高, 并在此后长期保持较高水平, 平均约为 $7.25\% \pm 0.88\%$ 和 $2.40\% \pm 0.47\%$, 分别比此前升高了 254% 和 31%, 这指示了 1980s 以后南黄海初级生产力的急剧升高。现场调查数据显示: 1985 年春季和 1984 年夏季, 本文研究海域真光层初级生产力均在 $200\text{--}600\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间(朱明远等, 1993), 而 2011 年春、夏季则分别增至 $1000\text{--}1500\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $750\text{--}2000\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (文斐等, 2012)。现场调查数据得出的南黄海近海初级生产力

升高幅度与本研究沉积记录分析结果完全吻合, 这不仅进一步验证了通过沉积物中 BSi 指示上覆水初级生产力变化的合理性, 也证实了 1980s 以后南黄海近海初级生产力急剧升高的现象。1980s 以后初级生产力急剧升高, 清晰地反映了随着我国经济发展和陆源污染物的排放, 南黄海近海水体开始出现严重的富营养化; 而在此之前, 人类活动尚不足以明显影响南黄海近海的海洋环境, 气候变化是当时环境波动的主要驱动因素, 水体初级生产力偏低, 并未表现明显的富营养化特征。另外 1980s 以来, B19 站位初级生产力的升高幅度约为 B18 站位的 8 倍。考虑到 B19 站位比 B18 站位更临近陆地, 受陆源营养物质输入的影响更明显, 其较大的初级生产力升高幅度指示了 B19 站位临近海域具有比 B18 站位海域更高的富营养化水平。目前通过现场调查数据对南黄海近海富营养化的研究尚难以追溯该海域富营养化的起始年代。虽然 Bashkin 等(2002)通过 1994—1997 年的现场调查数据分析, 认为源自人类活动的氮营养盐输入已经造成了黄海的富营养化, 且胶州湾、海州湾、苏北沿岸等邻近海湾的赤潮自 20 世纪 90 年代初已有报道(吴玉霖等, 2005), 但直至 21 世纪以后才出现南黄海近海开阔海域富营养化的评估报道(徐明德等, 2006)。现有评价结果显示南黄海水体已经明显富营养化(徐明德等, 2006; 周斌等, 2010), 而本文的分析结果表明这种富营养化现象始于 1980s。

根据 Lin 等(2005)的统计结果, 1980s 以后虽然南黄海水体中溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)的含量持续增高, 但磷酸盐和硅酸盐浓度均明显低于此前(图 5), 特别是硅酸盐在 1990s 以后其含量仅约为 1980s 以前的一半。而此时浮游植物初级生产力反而急剧升高并维持在较高水平, 这表明南黄海近海水体的富营养化应主要由近年来水体中持续增加的 DIN 所致。1980s 以前南黄海水体主要表现为 N 限制, 此后随着大量陆源含氮污染物的排放入海, 水体 DIN 含量持续增加, 增幅约达 200%, 虽然磷酸盐和硅酸盐的含量降低明显, 但水体 N/P 和 N/Si 尚在 Redfield 比值附近波动(图 5)(Lin *et al.*, 2005), 浮游植物的生长并未受到明显的 P 限制或 Si 限制, 故随着 DIN 浓度的增加, 水体富营养化严重, 浮游植物大量增殖(朱明远等, 1993; 文斐等, 2012), 绿潮频发。基于此, 在今后的海洋环境修复及治理中, 控制及减少南黄海水体及入海径流中的氮营养盐理论上能够较好的缓解该海域的富营养化问题。

4 结论

基于沉积物中 BSi 的时间序列分析, 近 100a 来南黄海近海浮游植物初级生产力存在明显的波动: 1980s 以前, 上覆水初级生产力总体偏低, 其波动主要受控于

临近陆地的干湿气候变化, 水体并未出现明显的富营养化特征; 而 1980s 以后, 初级生产力明显增加, 表明随着我国经济的快速发展, 南黄海水体开始出现严重的富营养化问题。经分析, 近年来大量陆源含氮污染物的排放入海可能是导致该海域水体富营养化的主要原因。

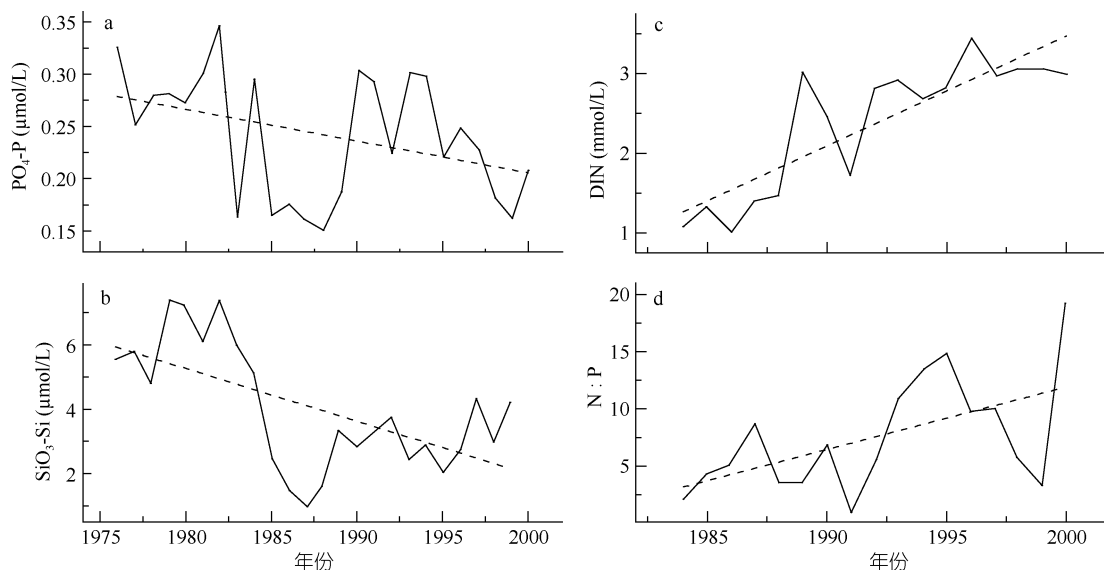


图 5 南黄海表层水体 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、DIN 和 N:P 的年际变化(引自 Lin 等(2005))

Fig.5 The interannual variation trends of $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$, DIN and N:P in surface water in the southern Yellow Sea (Lin *et al.*, 2005)

参 考 文 献

- 王 俊, 2001. 黄海春季浮游植物的调查研究. 海洋水产研究, 22(1): 56—61
- 王保栋, 王桂云, 郑昌洙等, 1999. 南黄海营养盐的平面分布及横向输运. 海洋学报, 21(6): 124—129
- 王保栋, 孙 霞, 韦钦胜等, 2012. 我国近岸海域富营养化评价新方法及应用. 海洋学报, 34(4): 61—66
- 韦钦胜, 傅明珠, 葛人峰等, 2010. 南黄海冷水域 35°N 断面化学水文学特征及营养盐的季节变化. 环境科学, 31(9): 2063—2074
- 韦钦胜, 臧家业, 魏修华等, 2011. 秋季南黄海西部营养盐的分布及其与环流场的关系. 海洋学报, 33(1): 74—82
- 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
- 叶曦雯, 刘素美, 赵颖翥等, 2004. 东、黄海沉积物中生物硅的分布及其环境意义. 中国环境科学, 24(3): 265—269
- 吕末晓, 栾青杉, 彭 亮等, 2016. 2014 年夏黄海浮游植物群落及其对物理过程的响应. 海洋科学进展, 34(1): 70—84
- 朱明远, 毛兴华, 吕瑞华等, 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
- 米铁柱, 姚庆祯, 孟佳等, 2012. 2011 年春、夏季黄海、东海营养盐分布特征研究. 海洋与湖沼, 43(3): 678—688
- 杨 茜, 2012. 东、黄海泥质区沉积断面中古生产力的长期记

- 录. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山, 2005. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 36(6): 487—498.
- 吴在兴, 俞志明, 宋秀贤等, 2014. 基于水质状态和生态响应的综合富营养化评价模型——以山东半岛典型海域富营养化评价为例. 海洋与湖沼, 45(1): 20—31
- 张志锋, 贺 欣, 张 哲等, 2012. 渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性. 海洋环境科学, 31(4): 465—468, 483
- 周 斌, 王 悠, 王进河等, 2010. 山东半岛南部近岸海域富营养化状况的多元评价研究. 海洋学报, 32(2): 128—138.
- 周 鹏, 2007. 东海沉积物岩芯中生物硅的测定及其地层学分析. 厦门: 厦门大学硕士学位论文
- 周名江, 朱明远, 2006. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展. 地球科学进展, 21(7): 673—679
- 赵一阳, 李凤业, DeMaster D J 等, 1991. 南黄海沉积速率和沉积通量的初步研究. 海洋与湖沼, 22(1): 38—43
- 赵颖翥, 刘素美, 叶曦雯等, 2005. 黄、东海柱状沉积物中生物硅含量的分析. 中国海洋大学学报, 35(3): 423—428
- 徐明德, 韦鹤平, 张海平, 2006. 黄海南部近岸海域水质现状分析. 中北大学学报, 27(1): 66—70
- 黄文祥, 沈亮夫, 朱 琳, 1984. 黄海的浮游植物. 海洋环境科学, 3(3): 19—28
- Bashkin V N, Park S U, Choi M S *et al.*, 2002. Nitrogen budgets for the Republic of Korea and the Yellow Sea region.

- Biogeochemistry, 57(1): 387—403
- Castañeda I S, Werne J P, Johnson T C *et al*, 2011. Organic geochemical records from Lake Malawi (East Africa) of the last 700 years, part II: biomarker evidence for recent changes in primary productivity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 303(1—4): 140—154
- Dai J C, Song J M, Li X G *et al*, 2007. Environmental changes reflected by sedimentary geochemistry in recent hundred years of Jiaozhou Bay, North China. *Environmental Pollution*, 145(3): 656—667
- Goldberg E D, 1963. Geochronology with ^{210}Pb . In: *Radioactive Dating*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 121—131
- Huang X P, Huang L M, Yue W Z, 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 47(1—6): 30—36
- Leinen M, Cwienk D, Heath G R *et al*, 1986. Distribution of biogenic silica and quartz in recent deep-sea sediments. *Geology*, 14(3): 199—203
- Lin C, Ning X, Su J *et al*, 2005. Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976–2000. *Journal of Marine Systems*, 55(3—4): 223—234
- Liu D Y, Keesing J K, He P M *et al*, 2013a. The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: formation and implications. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129: 2—10
- Liu F, Pang S J, Chopin T *et al*, 2013b. Understanding the recurrent large-scale green tide in the Yellow Sea: temporal and spatial correlations between multiple geographical, aquacultural and biological factors. *Marine Environmental Research*, 83: 38—47
- Loucaides S, Van Cappellen P, Roubex V *et al*, 2012. Controls on the recycling and preservation of biogenic silica from biomineralization to burial. *Silicon*, 4(1): 7—22
- Lyle M, Murray D W, Finney B P *et al*, 1988. The record of late Pleistocene biogenic sedimentation in the eastern tropical Pacific Ocean. *Paleoceanography*, 3(1): 39—59
- Maneesha K, Sarma V V S S, Reddy N P C *et al*, 2011. Meso-scale atmospheric events promote phytoplankton blooms in the coastal Bay of Bengal. *Journal of Earth System Science*, 120(4): 773—782
- Rabalais N N, Turner R E, Gupta B K S *et al*, 2007. Sediments tell the history of eutrophication and hypoxia in the northern Gulf of Mexico. *Ecological Applications*, 17(S5): S129—S143
- Reichwaldt E S, Ghadouani A, 2012. Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: between simplistic scenarios and complex dynamics. *Water Research*, 46(5): 1372—1393
- Rohrsen M, Love G D, Fischer W *et al*, 2013. Lipid biomarkers record fundamental changes in the microbial community structure of tropical seas during the Late Ordovician Hirnantian glaciation. *Geology*, 41(2): 127—130
- Schelske C L, Stoermer E F, Conley D J *et al*, 1983. Early eutrophication in the lower Great Lakes. *Science*, 222(4621): 320—322
- Shi X Y, Qi M Y, Tang H J *et al*, 2015. Spatial and temporal nutrient variations in the Yellow Sea and their effects on *Ulva prolifera* blooms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 36—43
- Strokal M, Kroeze C, Li L L *et al*, 2015. Increasing dissolved nitrogen and phosphorus export by the Pearl River (Zhujiang): a modeling approach at the sub-basin scale to assess effective nutrient management. *Biogeochemistry*, 125(2): 221—242
- Tang D L, Di B P, Wei G F *et al*, 2006. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea. *Hydrobiologia*, 568(1): 245—253
- Turner R E, Rabalais N N, 1994. Coastal eutrophication near the Mississippi river delta. *Nature*, 368(6472): 619—621
- Valiela I, Camilli L, Stone T *et al*, 2012. Increased rainfall remarkably freshens estuarine and coastal waters on the Pacific coast of Panama: magnitude and likely effects on upwelling and nutrient supply. *Global and Planetary Change*, 92—93: 130—137
- Wang B D, 2006. Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: history and perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69(3—4): 471—477
- Wang B D, Wang X L, Zhan R, 2003. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(1): 127—136
- Wang L, Fan D J, Li W R *et al*, 2014. Grain-size effect of biogenic silica in the surface sediments of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 81: 29—37
- Wang Z H, Feng J, Nie X P, 2015. Recent environmental changes reflected by metals and biogenic elements in sediments from the Guishan Island, the Pearl River Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 164: 493—505
- Yu Y, Song J M, Li X G *et al*, 2012. Geochemical records of decadal variations in terrestrial input and recent anthropogenic eutrophication in the Changjiang Estuary and its adjacent waters. *Applied Geochemistry*, 27(8): 1556—1566
- Zhang J, Liu S M, Ren J L *et al*, 2007. 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. *Progress in Oceanography*, 74(4): 449—478
- Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S *et al*, 2006. Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1500 years. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17(3): 579—592
- Zhou X, Sun L G, Huang W *et al*, 2012. Precipitation in the Yellow River drainage basin and East Asian monsoon strength on a decadal time scale. *Quaternary Research*, 78(3): 486—491
- Zhu Z Y, Wu Y, Zhang J *et al*, 2014. Reconstruction of anthropogenic eutrophication in the region off the Changjiang Estuary and central Yellow Sea: from decades to centuries. *Continental Shelf Research*, 72: 152—162

Zimmerman A R, Canuel E A, 2000. A geochemical record of eutrophication and anoxia in Chesapeake Bay sediments:

anthropogenic influence on organic matter composition. *Marine Chemistry*, 69(1—2): 117—137

SEDIMENTAL RECORDS OF EUTROPHICATION IN COASTAL WATERS OF THE SOUTHERN YELLOW SEA

YANG Shu, YANG Qian, QU Ke-Ming, SUN Yao

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Fisheries Science Academy, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao 266071, China)

Abstract Frequent harmful algal blooms in coastal waters of China in recent years have been believed to be the result of eutrophication. However, in the southern Yellow Sea, the historical process of water eutrophication is not clear for lack of survey data. Focusing on this problem, we examined the clues of marine environmental changes preserved in sediment cores. With the use of ^{210}Pb and biogenic silica (BSi), we estimated the age of sediment and rebuilt the change trend of paleo-productivity. The historical process of eutrophication in the past 100a in coastal waters of the area is discussed. Results revealed obviously the variation in primary productivity in the past 100a. Results show that before 1980s, primary productivity was relatively low in the study area, and its decadal fluctuation was closely related to dry/wet climate changes in North China. However, after 1980s, primary productivity increased significantly by 31%—254%, which obviously departed from the regulation of natural climate changes. This sudden increase clearly indicates that eutrophication has become serious, for which the massive emission of terrestrial nitrogenous contaminants to coastal waters is responsible, under the rapid development of Chinese economy.

Key words the southern Yellow Sea; eutrophication; sediment core; climate change; human activity