

东海、黄海近代沉积中有机碳源解析及对浮游植物总量的重建潜力

杨茜¹, 宋娴丽^{1,2}, 孙耀^{1*}

(1. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 26607; 3. 山东省海水养殖研究所, 山东 青岛 266002)

关键词: 黄海、东海海域; 沉积物; 有机碳源解析; 浮游植物总量重建

中图分类号: P736.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2012)04-0188-07

1 引言

沉积物中的有机碳是指存在于沉积物总有机质中的碳, 是重要的碳汇, 因沉积物能够较好地保存环境中的有机质信息及良好的时间次序, 同时也是碳循环重要的出口, 故而沉积物中有机碳的积累与生产力在时间和空间尺度的变化有一定联系^[1-2]。

利用总有机碳重建古生产力的研究, 在北大西洋、大西洋西岸、印度洋和东太平洋沿岸上升流区已取得大量成果。早在 1979 年 Muller 和 Suess 便提出并总结了由总有机碳近似估算古生产力的经验公式^[3], 随后 Stein 和 Sarnthein 等分别建立了根据沉积物中有机碳的含量来推算古生产力的经验公式^[4-5]。20 世纪 80 年代, 国内对古生产力的研究也有了进展, 1995 年吴时国等研究南沙群岛海区有机碳沉积作用, 得出应用有机碳重建地质历史时期的古生产力是一种比较理想的方法^[6]。房殿勇等采用 Sarnthein 提出的古生产力与有机碳的关系式估算了南沙海区南部的古生产力, 得出此海区冰期时的古生产力高于间冰期的生产力, 认为南沙海区南部亦遵循低纬西太平洋表层古生产力变化的趋势^[7]。向荣成功应用钙质生物碳酸盐与有机碳的函数关系推算出了古生产力^[8]。然而以上研究主要集

中在南海, 黄海作为我国重要的陆架海在古生产力重建等领域起步较晚且取得的成果较少, 目前仅有少数科学家就该海域进行了古生产力及古环境的反演及反演潜力的研究, 如赵美训等利用东黄海生物标记物重建古生态^[9-10], 2010 年孙耀等以生物硅为指标探讨其作为该海域古生产力的潜力并取得了良好的成果^[11]。

在东海、黄海海域, 因其靠近陆源, 与人类的生存和发展息息相关, 一直是海洋研究中十分重要的海域, 但是受陆源输入的影响利用总有机质重建生产力可能存在一定偏差^[12]。本文在以往众多专家研究的基础上, 首次将海源有机质分离出来, 以海源有机碳(C_a)为指标, 将其在沉积物中的含量与近代勘察数据相结合来探讨其对东、黄海浮游植物总量反演的潜力。该研究不仅可以揭示海洋生态环境的演变规律、预测其未来变化趋势, 而且可以为碳循环的研究提供基础资料, 同时也为同步进行的生态环境研究提供科学依据。

2 实验部分

2.1 调查方法与站位设置

本次调查的站位位于东海和黄海流系, 由黑潮流系(Kuroshio)和沿岸流系构成(见图 1)。黄海主要受北上的黄海暖流(YSWC)与南下的黄海沿岸流

收稿日期: 2011-02-22; 修订日期: 2011-08-09。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40876088); 国家重点基础研究发展计划(2010CB428900)。

作者简介: 杨茜(1984—), 女, 山东省青岛市人, 博士, 主要从事环境化学方面研究。E-mail: yaqibob@163.com

* 通信作者: 孙耀, 研究员, 主要从事环境化学方面的研究。E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn

(YSCC)构成的黄海环流的影响,东海主要受到黑潮、台湾暖流、沿岸流以及长江径流的影响。其中黄海沿岸流(YSCC)是黄海低盐水向黄海和东海输送的通道,可一直流至长江口以北进入东海,其前锋冬季时可达长江口附近。调查时间为2006年4月和10月。沉积物样品均使用多管沉积物采样器($\varphi=10\text{ cm}$)采集。样品以1~2 cm分层后,冷藏保存

(0~5 °C)。取实验样品,在60 °C恒温烘干至恒重,用电动研钵仪研磨,过60目筛,待测定。

2.2 总有机碳含量测定

称取烘干研磨好的沉积物样品1.00 g左右,经24 h浓盐酸熏蒸后,总碳分析仪测定沉积物中TOC的含量[$c(\text{TOC})$]。相对标准偏差为9.5%,相对误差为0.42%。

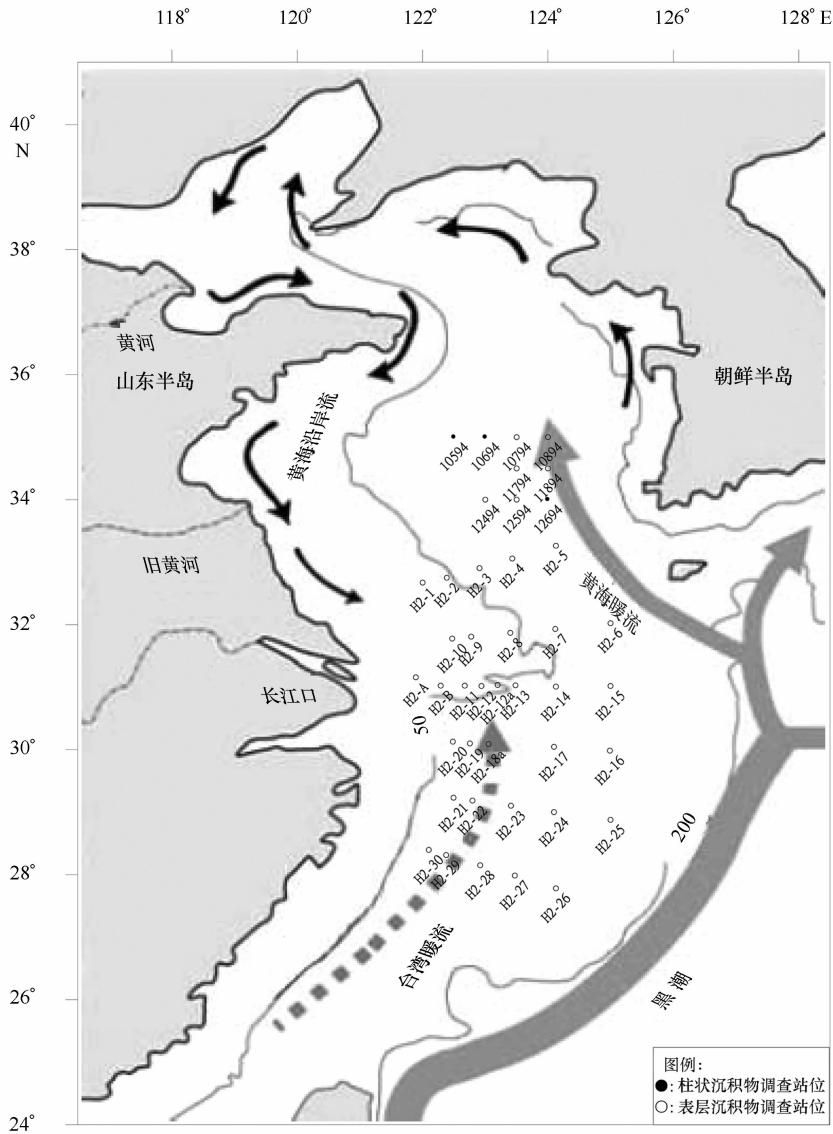


图1 调查站位及洋流图

2.3 总氮含量测定

用蛋白质分析仪测定沉积物中的总氮含量[$c(\text{TOC})$]。采用标准为:GB/T 6432-94。相对标准偏差1.14%,相对误差为1.6%。

2.4 近代沉积年代序列的确立

样品采用 ^{210}Pb 测年,每个柱样分别取10个样品进行测定。选择取样时间2006年作为测年零点,利用沉积速率得到柱状样年龄。

3 结果与讨论

3.1 近代沉积年代测定结果

南黄海 10594, 10694 和 12694 站位²¹⁰Pb 放射性活度随岩心深度的衰变图详见“东海、黄海近代沉积物中生物硅含量的分布及其反演潜力”^[11], 经过计算得到 10594, 10694 和 12694 站位的沉积速率分别为 0.350, 0.143, 0.153 cm/a, 底部年龄分别约为 150, 200 和 230 a, 该结论与前人研究结果一

致^[13]。

3.2 有机碳的平面分布及碳源解析

总有机碳的平面分布见图 2a, 在本次调查海域中 TOC 的含量范围为 0.47%~1.56%, 平均值为 0.94%。其分布特征与该海域的 $c(\text{TOC})/c(\text{TN})$ (C/N) 比(见图 2c) 较为相似, 呈现南北高、中部低的分布趋势, 这可能是 TOC 的分布受陆源输入影响所致; 与浮游植物现存量的平面分布(见图 2d) 特征在调查海域的中南部有部分相似。

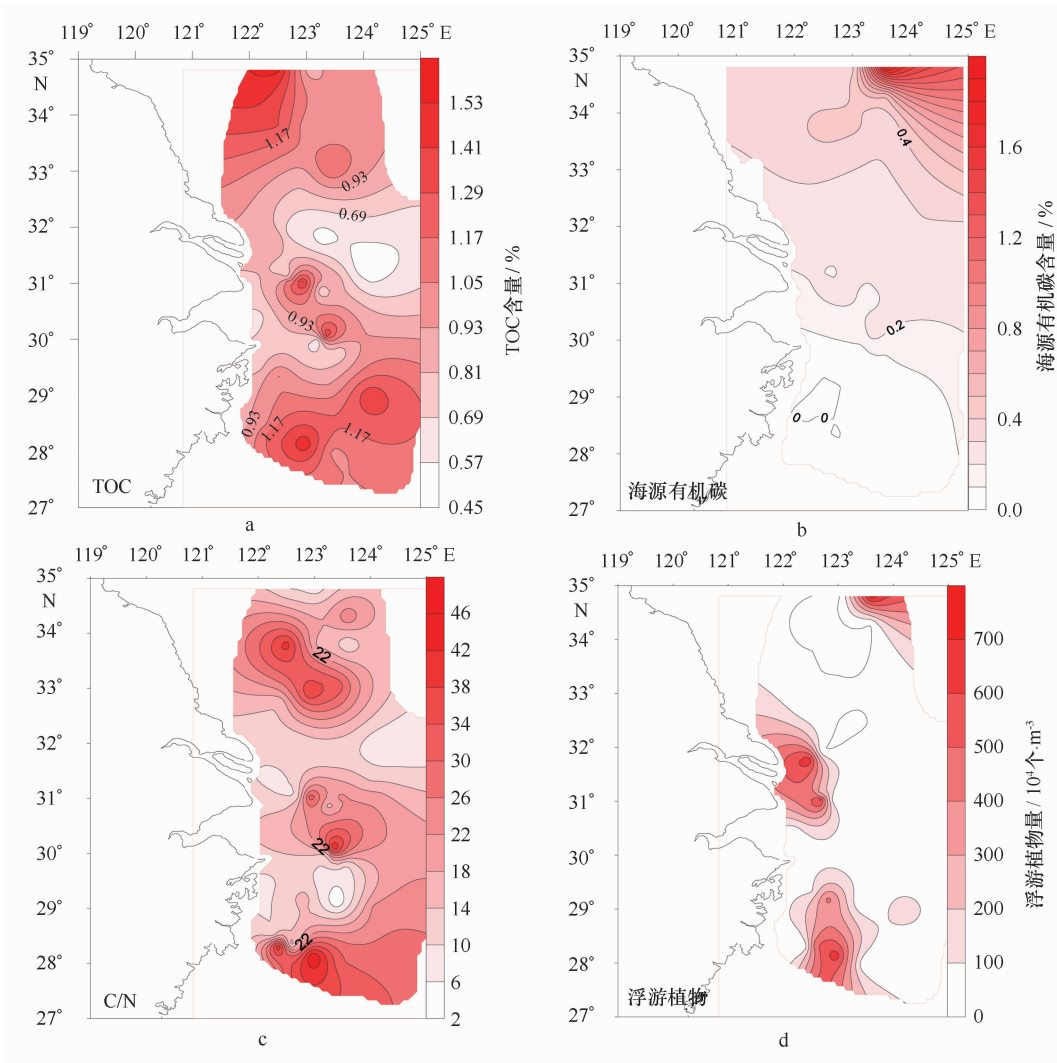


图 2 沉积物中 TOC(%), 海源有机碳(%), C/N, 浮游植物量($\times 10^4$ 个/ m^3)的平面分布

贾国东等曾利用 $c(\text{TOC})/c(\text{TN})$ [$c(\text{C})/c(\text{N})$] 比值进行碳源解析, 定量估算总有机碳中海源有机碳 [$c(\text{C}_a)$], 氮 [$c(\text{N}_a)$] 和陆源有机碳 [$c(\text{C}_t)$], 氮 [$c(\text{N}_t)$] 的方法^[14]。依此方法, 并假设海源和陆源有机质的 $c(\text{C})/c(\text{N})$ 比值分别为 5 和 20 (作为零级近似), 则上

述参数存在如下关系:

$$\begin{aligned} c(\text{TOC}) &= c(\text{C}_a) + c(\text{C}_t), \\ c(\text{TN}) &= c(\text{N}_a) + c(\text{N}_t), \\ c(\text{C}_a)/c(\text{N}_a) &= 5, \\ c(\text{C}_t)/c(\text{N}_t) &= 20, \end{aligned}$$

式中,设 $c(\text{TOC})$; $c(\text{TN})$ 为测量值。解由上述关系式组成的方程组,可得海源有机碳的计算公式如下:

$$c(\text{C}_a) = [(20 c(\text{TN}) - c(\text{TOC})] / 3.$$

运用上述公式对柱状样海源有机碳的含量进行分析(见图 2b),发现在本次调查海域中海源有机碳(C_a)的含量范围为 0~1.27%,平均值为 0.19%。从图中可以看出位于调查海域东北部的黑潮侵入区海域, C_a 含量达到最大值,与浮游植物总量在该海域的平面分布相近,两者的对应关系比较稳定。然

而随着与陆源的靠近,水文条件逐渐复杂,受沿岸流和河流注入的影响 $c(\text{C})/c(\text{N})$ 值升高, C_a 含量逐渐降低,到闽浙沿岸的 C_a 几乎为零,该分布趋势与浮游植物总量分布趋势不同,其主要原因可能是受到陆源稀释作用所造成的。

3.3 有机碳的垂直分布及碳源解析

对 10594, 10694, 12694 站位进行有机碳的垂直分布研究及碳源解析, TOC 在沉积物中的相对含量及 C_a 在沉积物中的相对含量和 $c(\text{C})/c(\text{N})$ 比值变化见图 3。

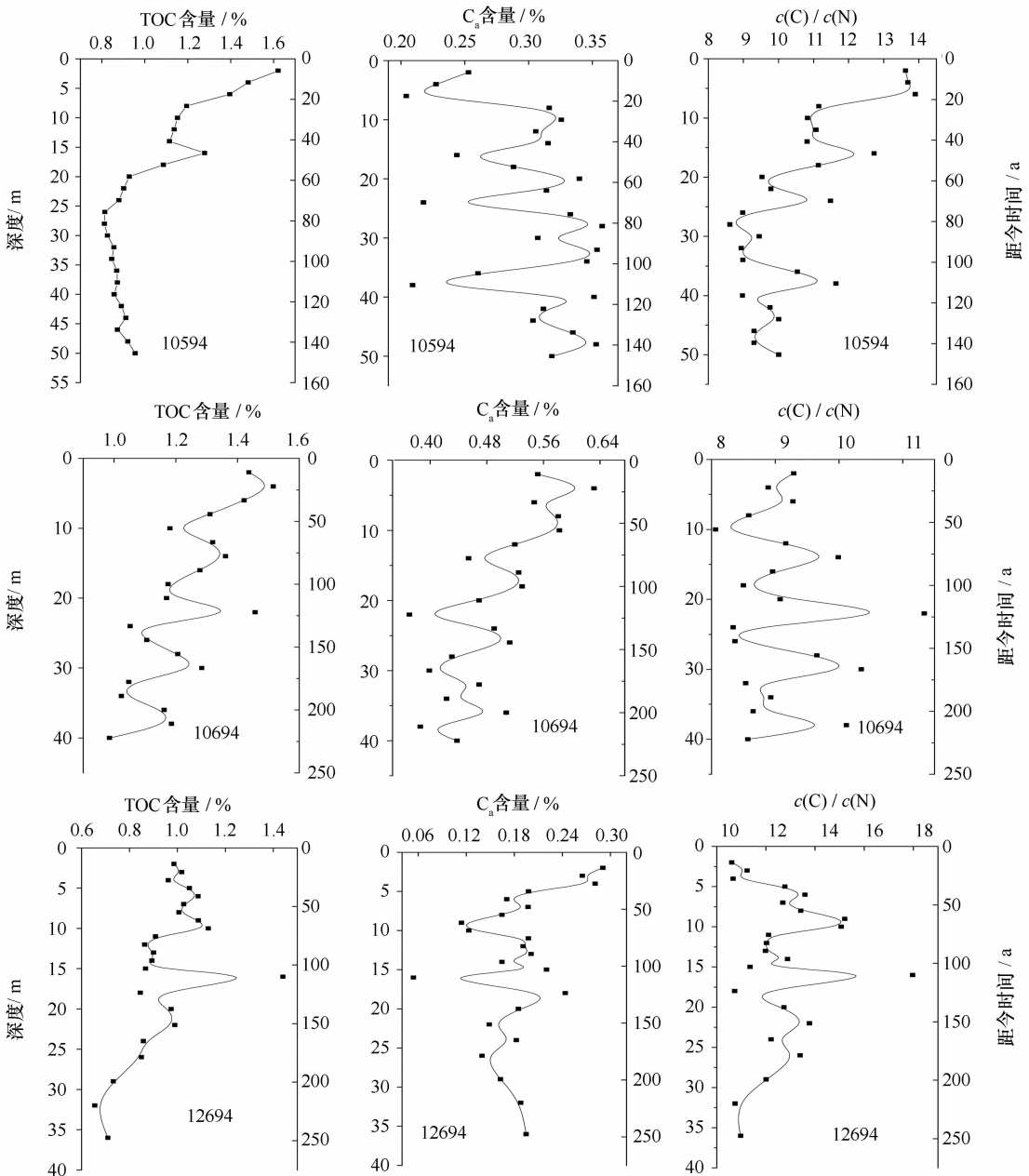


图3 有机碳的垂直变化

10594 站位 $c(C)/c(N)$ 较大, 平均值为 10.57, 有机质为混源有机质, 该站位 TOC 其相对含量范围为 0.81%~1.62%, 平均值为 1.02%, 整体来说 TOC 的含量由表层到深层逐渐降低, 到 29 cm 处逐渐趋于稳定。该站位 C_a 的含量稳定, 含量范围为 0.20%~0.36%, 平均值为 0.30%, 各层均以平均值为中心小幅度波动。

10694 站位 $c(C)/c(N)$ 较小, 平均值为 9.35, 有机质为混源有机质, 整体分布趋势稳定, 振幅较小。TOC 的相对含量范围为 1.02%~1.52%, 平均值为 1.25%, 百分含量由表层到深层震荡下降。 C_a 的相对含量范围为 0.37%~0.63%, 平均值为 0.49%, 该站位相对变化幅度较大, 由表层到深层呈逐渐降低趋势。

12694 站位, 各层 $c(C)/c(N)$ 均大于 10, 平均值为 12.61, 说明该站位有机质为混源有机质, 且受陆源影响较大。TOC 的百分含量范围为 0.66%~1.44%, 平均值为 0.95%, 相对含量稳定, 自表层到深层逐渐降低, 仅在 16 cm 处出现最大值, 其原因可能是在该层陆源输入的影响使 TOC 含量升高; C_a 的百分含量范围为 0.054%~0.29%, 平均值为 0.18%, 其分布趋势比较稳定, 呈自表层到深层逐渐下降的趋势。

4 沉积物中有机碳对浮游植物总量的重建潜力

有机碳与浮游植物总量的关系密切, 因而可以认为在水文环境相对稳定的前提下, 将调查海域的有机碳与浮游植物总量进行定量分析, 有利于判断古生产力的波动, 记录海区营养盐变化以及富营养化发生和发展的历程。

4.1 表层沉积物中有机碳与浮游植物现存量之间的相关性

本文将有机碳分布与浮游植物总量做一元线性回归方程来讨论二者相关性(表 1)。研究发现, 从整个调查海域而言, TOC 与浮游植物总量有正相关性但相关性不显著^[15-18]。 C_a 与浮游植物总量无相关性, 从调查结果可以推断表层有机碳无法反映真光层中浮游植物现存量各指标的变化趋势, 其原因可能是因为有机碳的分布主要受初级生产力、氧化条件、沉积物再悬浮、沉积物的结构以及所在海域的水文条件等多种因素控制, 在不同地区这些因素的影响不同, 从而导致在表层沉积物中有机碳随海域的变化有所不同, 同时海洋环境中浮游植物呈现块状分布从而使两者相关性不显著。

4.2 不同年代有机碳与浮游植物总量的相关性

由于历史原因和数据管理上缺乏共享性等原因, 仅根据 1961 年到 2006 年全国海洋综合调查报告以及相关文献的记录, 难以对近 200 a 来的浮游植物总量进行系统分析, 所以本文依照趋势线法和同类相似借鉴法, 以四季的平均值来表示浮游植物的年总量, 尽可能的估算出相对合理的数据进行分析^[19-26], ①。

由表 1 可以看出 TOC 与浮游植物的相关性在垂直调查站位均不显著, 其主要原因可能是陆源输入对 TOC 的稀释作用所引起的。

利用海源有机碳(C_a)与浮游植物的相关性进行分析, 有利于降低陆源输入对有机碳分布的影响, 经研究发现, 在垂直调查站位 C_a 与浮游植物的相关性均显著; 尤其是 12694 站位, C_a 与浮游植物的相关性系数 $R^2 = 0.74$, ($P = 2.32 \times 10^{-2}$), 其原因可能是因为受黑潮支流黄海暖流的影响使该站位的水文条件稳定, 从而使 C_a 能够更有效的反应该海域的浮游植物总量的变化。

表 1 各垂直调查站位沉积物中 $c(\text{TOC})/c(\text{TN})$ 的平均值及不同年代 TOC 与浮游植物总量的相关性

站位	$c(\text{TOC})$		$c(C_a)$	
	P	R^2	P	R^2
平面分布	1.26×10^{-2}	16.37×10^{-2}	6.10×10^{-2}	0.60×10^{-2}
10594	10.10×10^{-2}	8.97×10^{-2}	1.12×10^{-2}	0.58
10694	20.40×10^{-2}	0.12×10^{-2}	1.76×10^{-2}	0.58
12694	2.06×10^{-2}	21.80×10^{-2}	2.32×10^{-2}	0.74

① 全国海洋综合调查报告第八册[R]. 1965.

4.3 有机碳在沉积物中的稳定性

古生产力指标在沉积物中的稳定性也是应用其反演古生产力需要重点考虑的问题之一。为了检验本次实验中古生产力指标是否稳定,分别将各站点的总有机碳和海源有机碳的量相加,与年代进行线性回归分析^[11,27]。从图4a可以看出,10594和10694站位有机碳均能稳定存在100a,自1900年前后便出现下降趋势,其具体原因还有待进一步研究,而12694站位可能是由于所处海域比较稳定,有机碳于1840年才出现下降趋势;且经过比较发现各站位海源有机碳相对于总有机碳而言稳定性更好。

综上所述,本次调查的表层沉积物因受水文条件、氧化条件、沉积物再悬浮、沉积物的结构等多种因素的影响无法由沉积物中有机碳(包括TOC和 C_a)的含量直接判断浮游植物总量的分布趋势。

在柱状沉积物中,因受陆源物质的稀释作用,TOC与浮游植物总量相关性不显著,从而无法有效地重建过去近200a中浮游植物总量的变化;相对而言,可能是由于垂直调查站位的影响因素相对单一,所处的水文条件相对稳定,所以 C_a 较TOC能够更有效的反应浮游植物总量的变化,尤其在位于黑潮流系影响下的12694站位二者的相关性最显著,说明在水文条件稳定的海域 C_a 能够作为浮游植物的有效指标重建其总量的变化。

需要指出的是,由于沉积物中 $c(\text{TOC})/c(\text{TN})$ 比值的变化还有其他影响因素,以及海源有机质 $c(\text{C})/c(\text{N})$ 比值并非恒定,并且在计算中人为设定该比值等原因,对海源有机碳的定量计算并不十分准确,这也是本研究的一个重要缺憾,希望在以后的研究中能够得到进一步的发展。

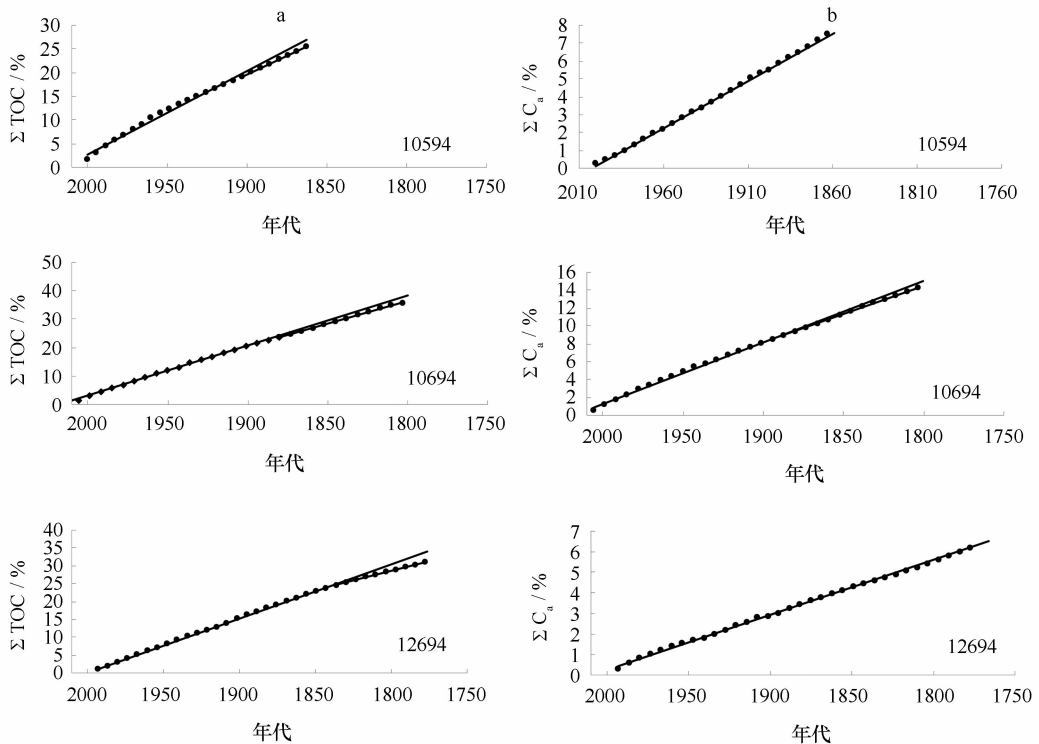


图4 古生产力指标总量与年代的线性回归曲线
a. ΣTOC 与年代的回归曲线;b. ΣC_a 与年代的回归曲线

参考文献:

- [1] 汪品先,赵泉鸿,成鑫荣,等. 十五万年来的南海[M]. 上海:同济大学出版社,1995.
- [2] THUNELL R C, MIAO Qingmin. Glacial-Holocene biogenic sedimentation patterns in the South China Sea: Productivity variations and surface water $p\text{CO}_2$ [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(2): 143-162.
- [3] MULLER P J, SUESS E. Productivity, sedimentation rate, and sedimentary organic matter in the oceans: 1. Organic carbon preserva-

- tion[J]. *Deep-Sea Research*, 1979, 26: 1347–1362.
- [4] STEIN R. Surface-water paleo-productivity as inferred from sediments deposited in oxic and anoxic deepwater[C]// DEGENS E T, MEYERS P A, BRASSELLI S C. *Bio-geochemistry of Black Shales*. Selbstverlag: Universitat Hamburg, Hamburg, 1986: 55–70.
- [5] SARNTHEIN M, WINN K, DUPLESSY J C, et al. Global variations of surface ocean productivity in low and mid latitudes: influence on CO₂ reservoirs of the deep ocean and atmosphere during the last 21000 years[J]. *Paleoceanography*, 1988, 3(3): 361–399.
- [6] 吴时国, 涂霞, 罗又郎, 等. 南沙群岛海区有机碳沉积作用与古生产力估算[J]. *热带海洋*, 1995, 14(4): 58–66.
- [7] 房殿勇, 翦知谔, 汪品先. 南海海区南部近 30 ka 来的古生产力记录[J]. *科学通报*, 1998, 43(18): 2005–2008.
- [8] 向容. 240 ka 以来西赤道太平洋碳酸钙沉积特征及其古海洋学意义[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(5): 535–542.
- [9] 张海龙, 邢磊, 赵美训. 东海和黄海表层沉积物生物标志物的分布特征及古生态重建潜力[J]. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(6): 992–996.
- [10] 邢磊, 赵美训, 张海龙, 等. 二百年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*, 2009, 39(02): 317–322.
- [11] 杨茜, 孙耀, 王迪迪. 东海、黄海近代沉积物中生物硅含量的分布及其反演潜力[J]. *海洋学报*, 2010, 32(3): 51–59.
- [12] LOUBERE P. A multiproxy reconstruction of biological productivity and oceanography in the eastern equatorial Pacific for the past 30, 000 years[J]. *Marine Micropaleontology*, 1999, 37(2): 173–198.
- [13] 赵一阳, 李凤业. 南黄海沉积速率和沉积通量的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(1): 38–43.
- [14] 贾国东, 彭平安, 傅家谟. 珠江口近百年来富营养化加剧的沉积记录[J]. *第四纪研究*, 2002, 3(22): 158–165.
- [15] EMERSON S, ARCHER D. Glacial carbonate dissolution cycles and atmospheric pCO₂: a view from the ocean bottom[J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(3): 319–331.
- [16] EMERSON S K, HEDGES J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments[J]. *Paleoceanography*, 1988, 3: 621–634.
- [17] MIAO Q, THUNELL R C. Recent deep-sea benthic foraminiferal distributions in the South China and Sulu Seas[J]. *Marine Micropaleontology*, 1993, 22: 1–32.
- [18] 涂霞, 罗又郎, 吴时国. 南沙群岛海区晚第四纪古海洋学研究(一)[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [19] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000.
- [20] 沈志良. 三峡工程对长江口海区营养盐分布变化影响的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(6): 540–546.
- [21] 沈志良. 长江口海区理化环境对初级生产力的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 1993, 1: 42–51.
- [22] 鲁北伟, 王荣. 春季东海表层叶绿素 a 含量分布特征[J]. *海洋与湖沼*, 1996, 27(5): 487–491.
- [23] 刘子琳, 宁修仁, 蔡昱明. 杭州湾一舟山渔场秋季浮游植物现存量 and 初级生产力 [J]. *海洋学报*, 2001, 23(2): 93–98.
- [24] 黄海水产研究所资源调查室. 黄渤海浮游生物概况及其与渔业的关系[J]. *海洋水产研究丛刊*, 1961, 6: 34–48.
- [25] STEELE J H, YENTSH C S. The vertical distribution of chlorophyll[J]. *Mar Biol Ass U K*, 1960, 39(1): 217–226.
- [26] ANDERSON G C. Subsurface chlorophyll maximum in the northeast Pacific Ocean[J]. *Limnol Oceanogr*, 1969, 14(2): 386–391.
- [27] 贾海波. 应用鱼鳞沉积信息追溯近 150 年黄海重要鱼类的种群动态[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.

The source of total organic carbon in recent sediments of the East China Sea and the Huanghai Sea and implications for phytoplankton population reconstructions

YANG Qian¹, SONG Xianli^{1,2}, SUN Yao²

(1. *Yellow Sea Fisheries Research Institute, Qingdao 26607, China*; 2. *Mariculture Institute of Shandong Province, Qiangdao 266002, China*)

Key words: the East China Sea and the Huanghai Sea; sediments; the source of total organic carbon; phytoplankton population reconstructions