

戴鑫烽, 曾宇兰, 李冬融, 等. 长江口甲藻孢囊与水体富营养化和厄尔尼诺指数关系研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(2): 78–87. doi:10.12284/hyxb2021004

Dai Xinfeng, Zeng Yulan, Li Dongrong, et al. Relationship between dinoflagellate cysts and water eutrophication and ENSO index in the Changjiang River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(2): 78–87. doi:10.12284/hyxb2021004

长江口甲藻孢囊与水体富营养化和厄尔尼诺指数关系研究

戴鑫烽¹, 曾宇兰¹, 李冬融², 王鹏斌¹, 郭若玉¹, 王瑞芳¹, 陆斗定¹

(1. 自然资源部第二海洋研究所 自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 杭州市卖鱼桥小学 (拱墅校区), 浙江 杭州 310012)

摘要: 甲藻孢囊是一种可用于追溯环境变化历史的生物微化石, 如指示水体富营养化和气候变化, 但是如何指示水体富营养化存在争议, 并且如何区分甲藻孢囊中的水体富营养化信号和气候变化信号也是一个科学难题。为了研究这两个科学问题, 我们利用长江口海域受到水体富营养化和厄尔尼诺事件双重影响的特点, 在该海域不同位置采集了 4 根沉积柱, 分析了其中的甲藻孢囊。结果显示, 长江口海域水体富营养化会引起总甲藻孢囊以及产麻痹性贝毒甲藻孢囊丰度上升, 并且导致异养型和自养型甲藻孢囊的比率下降, 这说明引起长江口海域富营养化主要原因还是以氮、磷、钾为主导的农业和生活污水。受长江冲淡水影响, 这种富营养化信号在近处相对较弱; 中间处信号明显; 远处信号几乎未见。同时入海口近处高沉积速率沉积柱样的分析结果显示, 甲藻孢囊丰度存在季节性的变化规律, 其中以冬季甲藻孢囊丰度最低, 推测低温起了主导作用。而厄尔尼诺气候事件可以通过影响陆地径流从而改变陆源营养盐的输入来改变甲藻孢囊丰度, 反映在沉积柱中的信息即为甲藻孢囊丰度峰谷值的出现。该信号也随距离入海口的远近不同而不同: 近处受水流突然增大或减弱导致甲藻孢囊丰度谷值和峰值出现; 中间处水流与甲藻孢囊丰度峰谷值重叠且信号较强; 远处丰度峰值信号明显但主导因素多样化。这些结果对该海域环境演变历史重建, 赤潮发生历史和厄尔尼诺现象研究都具有十分重要的科学意义。

关键词: 甲藻孢囊; 富营养化; 厄尔尼诺; 气候变化

中图分类号: P714⁺.5; Q949.24

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)02-0078-10

1 引言

目前, 长江口海域是我国营养盐超标十分严重的海区, 水体中的营养盐较早期发生了深刻的变化^[1]。伴随着营养盐总量和结构上的改变, 近二三十年在长江口及其邻近海域, 面积超过 1 000 km² 甚至 10 000 km² 的大面积赤潮几乎每年发生。同时该海域的赤潮暴

发呈现持续时间增长、范围规模增大、有毒有害种类增多的特点^[2-5]。这些赤潮既是生态失衡的表现, 也是进一步破坏海洋环境的一种生物因子, 而且部分生物毒素还可以通过食物链传递威胁人类健康。然而由于早期的实测数据十分有限, 对于甲藻赤潮历史的定量研究较难展开。

甲藻孢囊是甲藻生活史中有性繁殖阶段的一种

收稿日期: 2020-02-26; 修订日期: 2020-06-03。

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFC1404300); 浙江省自然科学基金(LY19D060007, LY20D060004); 自然资源部第二海洋研究所英才计划项目(QNYC201502); 国家自然科学基金(41406173, 41876139, 41676111); 海洋公益性行业专项(9201505001)。

作者简介: 戴鑫烽(1982—), 男, 浙江省磐安县人, 副研究员, 主要研究方向为海洋生态学和海洋微藻。E-mail: xinfengdai@sio.org.cn

细胞形态,它对甲藻赤潮的发生、延续和消亡过程有着重要作用^[6]。大多数甲藻孢囊具有抗性细胞壁,可以长期保存在底部的沉积物中,所以它作为一类重要的微化石,近几十年来被广泛地应用在沉积物生物地层学和古生态学的研究中,成为古海洋环境重建非常有效的生物指标^[7-10]。

通过对底部沉积物中甲藻孢囊的垂直分布研究,可分析出特定海域甲藻孢囊数量及其组成的历史演变趋势,从而进一步分析气候变化或人为活动对水体环境的影响状况^[8,11],如在早第三纪时期的气候变化信息^[12],在挪威 Oslofjord 地区和日本 Yokohama 港口地区的富营养化信息^[13-14]。我国科学家也在南海和东海开展了甲藻孢囊的垂直分布研究^[15-18]。

甲藻孢囊记录中同时包含了气候变化和人类活动(包括富营养和工业化污染)信息,但是如何从中提取和分辨这两类信息是一个科学难题。一些文献报道两者在时间序列上是可以区别的,以工业革命为分节点,之前主要受气候变化调控,之后同时受气候变化和人类活动影响但以后者为主^[8,19]。在长江口海域甲藻孢囊记录中,水体富营养化和厄尔尼诺指数信息既同时存在又有一些区别^[20]。水体富营养化引起的主要是总甲藻孢囊丰度和产麻痹性贝毒(Paralytic Shellfish Poisoning, PSP)甲藻孢囊丰度的上升,而厄尔尼诺指数主要是通过影响长江径流量引起孢囊丰度峰值的变化^[20]。

另外,对于甲藻孢囊中的富营养化信号存在两种不同的观点。一种观点认为水体富营养化可以导致总甲藻孢囊丰度上升,且多边舌甲藻(*Lingulodinium polyedrum*)的比例也有明显上升^[19];另一种观点认为富营养化导致了异养型甲藻孢囊的比例明显上升^[11,21],且认为这是由于硅藻密度的上升为异养型甲藻提供丰富的食物^[14]所导致的。随后 Dale^[19]的研究表明,工业化的水体污染容易导致孢囊结构从自养型甲藻孢囊主导转变为异养型甲藻孢囊主导。所以关于甲藻孢囊如何指示水体富营养化还有待进一步的研究。

本研究以长江口海域提供的天然实验场开展长时间高分辨率的甲藻孢囊调查分析为基础,研究甲藻孢囊对该海域水体富营养化和厄尔尼诺指数的指示作用,对该海域环境演变历史重建、赤潮发生历史和厄尔尼诺现象研究都具有十分重要的科学意义。

2 实验方法

2.1 样品采集及处理

我们在长江口海域不同位置采集了4根沉积柱(图1,表1)。柱状样用多管采集器和重力柱采集器采集,将样品保存于4℃冰箱带回实验室处理。在实验室按照每层2cm从上到下分层取样,取一份约10g,烘干研磨后用于²¹⁰Pb定年分析。取另一份8g左右沉积物,置于50mL烧杯中混合均匀后再分成2份。一份置于称量瓶中称重,并置于70℃烘箱中24h后再次称重,计算沉积物的干湿质量比(r)。另一份用于甲藻孢囊分析鉴定。

首先,在含有沉积物的烧杯中加入适量灭菌过滤海水稀释,用超声波振荡2min后,依次通过孔径为

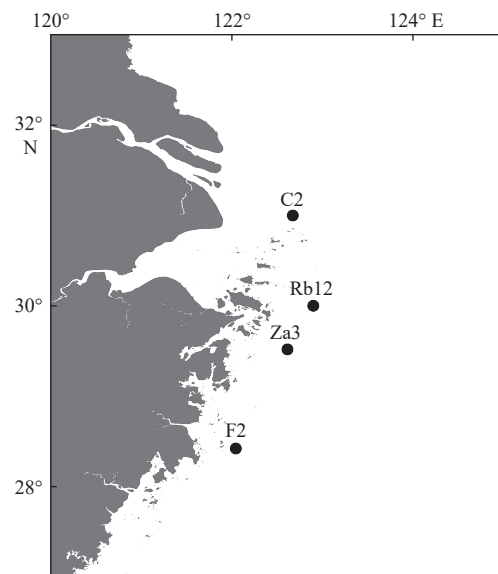


图1 长江口沉积柱采样站位图

Fig. 1 Location of sediment cores in the Changjiang River Estuary

表1 沉积柱站位信息

Table 1 Station information of sediment cores

站位	经纬度	水深/m	采样日期	柱子长度/cm
C2	30.998°N, 122.672°E	21	2009年6月5日	200
Rb12	30.000°N, 122.898°E	52	2010年5月10日	30
Za3	29.520°N, 122.614°E	43	2010年5月11日	36
F2	28.428°N, 122.044°E	26	2009年8月	200

125 μm 和 20 μm 的网筛,此步骤需重复多次,直至得到较为清澈的过滤液。收集 20 μm 网筛上部分沉积物转移至表面皿中,将表面皿涡旋,使较重的沉积物颗粒集中并沉降于表面皿中心,用吸管吸取上层浮液于 10 mL 带盖塑料管中,重复多次吸取,最终定容至 10 mL。然后,取 15 mL 离心管,底部加入 2 mL 多聚钨酸钠(SPT)重液,上面轻轻加入样品。用 3 000 g 离心 10 min,去除部分上清液,并吸取交界面的悬浮的甲藻孢囊于 2 mL 离心管中,定容至 2 mL 并于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存待进一步分析。

2.2 样品分析

取样前先将样品混合均匀,根据不同甲藻孢囊浓度吸取 0.1~0.5 mL 样品于 SEDGEWICK-RAFTER CELL S50(MICROLITRE)型细胞计数框中,滴加蒸馏水至总体积为 1 mL。在倒置光学显微镜(Olympus CX53)下观察计数,重复数次,使每个样品最少能观察到 100 个甲藻孢囊。

2.3 数据处理

甲藻孢囊丰度(A)以每克沉积物(干质量)中含有的孢囊数量(单位:个/g)表示,计算公式如下^[18]:

$$A = N(V/Q)/(Wr), \quad (1)$$

式中, N 为显微镜下观察到的孢囊数量(个); V 为样品处理后的定容体积,即 2 mL; Q 为显微观察所取样品体积(mL); W 为处理分析样品的湿质量(g); r 为样品的干湿质量比。采用香农-威纳指数(Shannon-Weiner index, H'),对甲藻孢囊种群的多样性进行分析。根据孢囊的形态特征(孢粉学分类)和营养细胞的形态特征(生物学分类)对甲藻孢囊进行分类^[21]。

甲藻孢囊营养类别的区分主要依据已知游动细胞的营养方式进行分类^[23],而产 PSP 甲藻孢囊主要为亚历山大藻属(*Alexandrium*)的 4 个种和链状裸甲藻(*Gymnodinium catenatum*)和巴哈马盾甲藻(*Pyrodinium bahamense*)^[23]。对于 C2 柱季节划分方式为:3-5 月为春季,6-8 月为夏季,9-11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季。

2.4 数据收集

本文收集了以下历史数据:1949-2017 年全国人口(据《中国统计年鉴》)、1978-2017 年全国农用化肥年使用折存量(据《中国统计年鉴》)、1953-2010 年大通站长江年均径流量^[24](<http://yu-zhu.vicp.net/>)、1950-2019 年厄尔尼诺指数,数据来自美国国家海洋与大气管理局的气候预测中心(http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)。

3 结果

3.1 C2 柱

C2 柱位于长江入海口近处,测年结果显示,C2 柱的沉积速率较高,达 7.51 cm/a,按 2 cm 分层的甲藻孢囊在一定程度上反映了甲藻孢囊的季节变化。分析结果显示,在冬季甲藻孢囊的丰度很低,其他季节都有峰值出现(图 2)。同时,虽然该区域沉积速率大,柱子代表的年份较短,但是总甲藻孢囊丰度和产 PSP 甲藻孢囊丰度总体上呈缓慢上升趋势(图 2),说明富营养化信号存在但比较微弱。结果还显示,在 1998 年和 2002 年出现甲藻孢囊丰度低谷,而在 2001 年和 2006 年出现了孢囊丰度峰值(图 2)。C2 柱中的异养型和自养型甲藻孢囊的比率呈现微弱下降趋势(图 3)。对应地,长江径流量在 1998 年和 2002 年出现了峰值,而在 2001 年和 2006 年出现了谷值(图 4)。

3.2 Rb12 柱和 Za3 柱

Rb12 柱和 Za3 柱位于离长江入海口中等距离处,沉积速率分别为 0.64 cm/a 和 1.23 cm/a。之前研究显示,Rb12 和 Za3 沉积柱总甲藻孢囊丰度和产 PSP 甲藻孢囊丰度总体上呈上升趋势,异养型和自养型甲藻孢囊的比率随着富营养化水平的上升而下降^[20]。而甲藻孢囊的物种数以及多样性指数(H')只显示了微弱的上升(图 5)。在厄尔尼诺指数处于峰值的 1973 年、1983 年、1989 年(负值)和 1998 年时,长江径流量在 1973 年、1983 年、1989 年和 1998 年也处于峰值(图 4),Rb12 沉积柱的总甲藻孢囊丰度在 1974 年、1984 年、1990 年、1999 年和 Za3 沉积柱的总甲藻孢囊丰度在 1984 年、1990 年、1999 年也处于峰值^[20]。

3.3 F2 柱

F2 柱位于离长江口较远位置,其沉积速率为 1.00 cm/a,总甲藻孢囊和产 PSP 甲藻孢囊丰度总体上变化不明显,但是有一些年份出现了总甲藻孢囊丰度的峰谷值(图 6)。其中,在 1901-1902 年、1921-1922 年、1961-1962 年、1979-1980 年、1989-1990 年前后有 5 次明显的甲藻孢囊丰度峰值,而在 1929-1930 年、1981-1982 年和 1995-1996 年则有明显的丰度低值。对应地,长江径流量在 1962 年和 1980 年出现了峰值(图 4)。F2 站位的异养型和自养型甲藻孢囊的比率近百年呈先上升后下降趋势(图 7)。

3.4 长江口海域水体富营养化指标

收集的资料数据显示,从 20 世纪 60 年代开始,

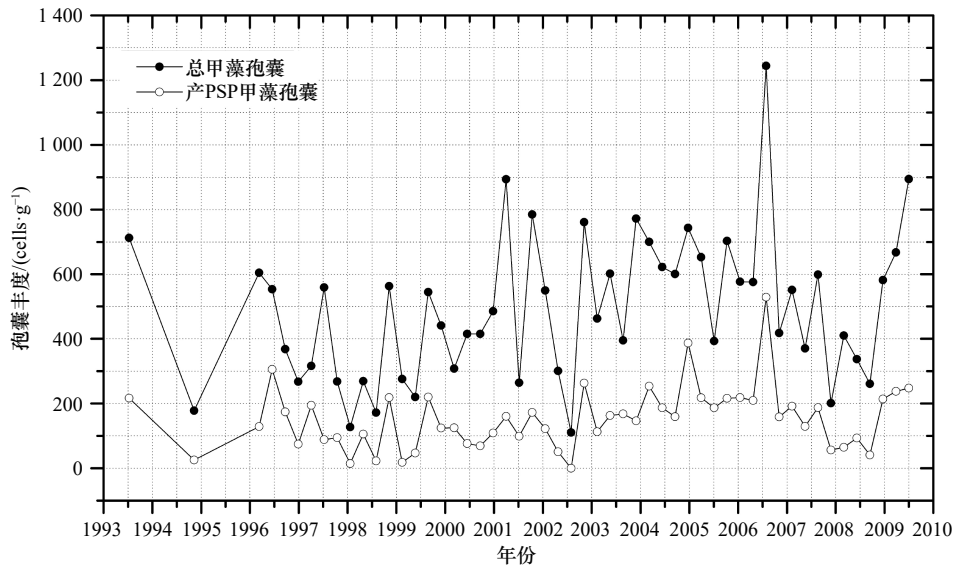


图 2 C2 沉积柱总甲藻孢囊和产 PSP 甲藻孢囊丰度随时间变化趋势

Fig. 2 Variation of total and PSP productive dinoflagellate cysts abundance of Core C2

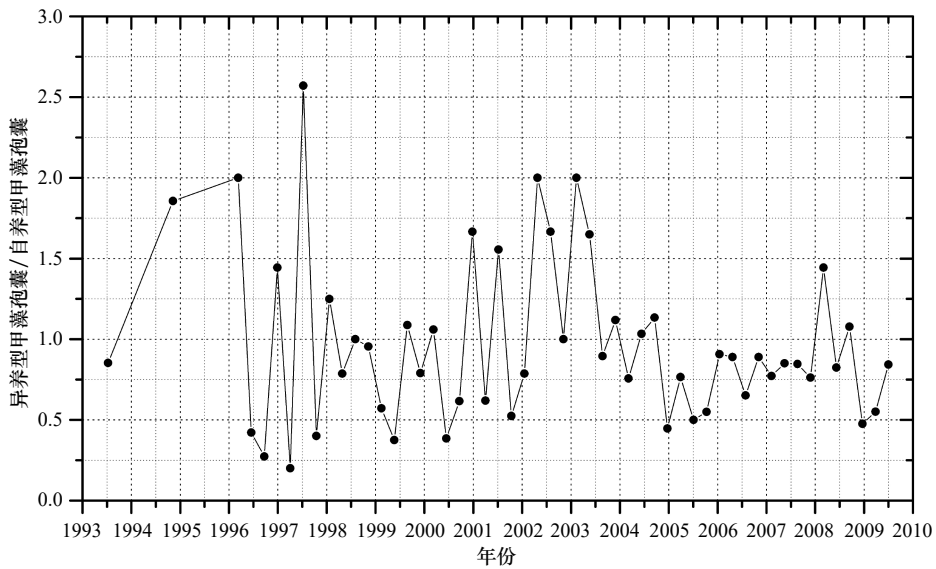


图 3 C2 沉积柱异养型和自养型甲藻孢囊的比率随时间变化趋势

Fig. 3 Variation of ratio of hetero and autotrophic dinoflagellate cysts in Core C2

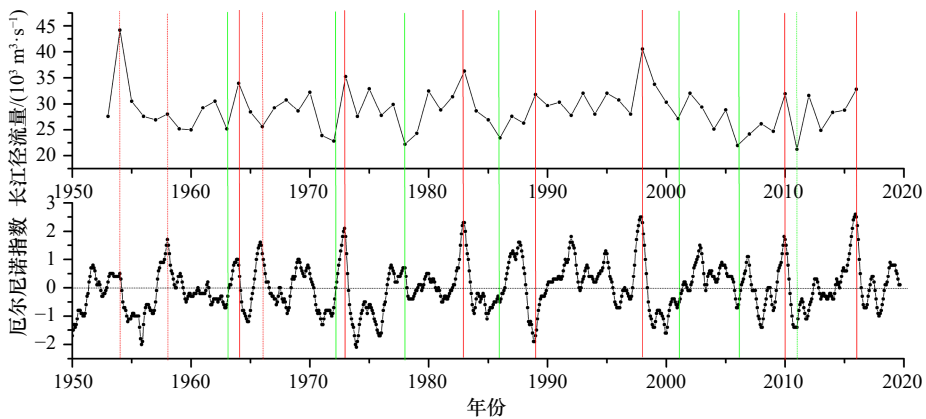


图 4 1953–2016 年大通站长江径流量数据和 1950–2019 年厄尔尼诺指数

Fig. 4 Runoff of the Changjiang River from Datong Station during 1953–2010 and ENSO index during 1950–2019

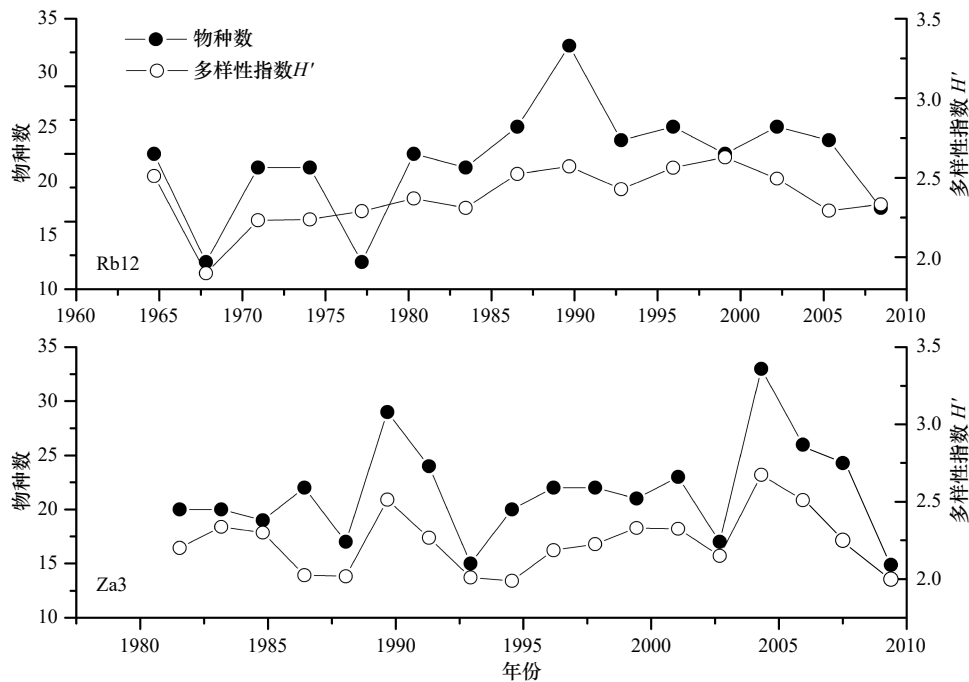


图 5 Rb12 和 Za3 沉积柱甲藻孢囊物种数和多样性指数 (H') 随时间变化趋势

Fig. 5 Variation of species number and diversity index (H') in Rb12 and Za3 cores

特别是从 80 年代起, 长江口海域 ($30.5^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $122^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$) 水体中的无机氮升高了 4 倍以上, 无机磷升高了 2 倍左右, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度上升缓慢^[25]。1949 年以来的全国人口数据持续增长 (图 8)。1978 年以来的全国农用化肥使用量也是持续增加, 直到 2015 达到峰值拐点 (图 8)。

3.5 长江口径流量和厄尔尼诺指数关系

近 60 年的历史数据显示, 厄尔尼诺指数和长江径流量存在着一定的联系。当厄尔尼诺指数达到峰值时, 同年或者稍微滞后就会出现长江径流量峰值, 比如 1964 年、1973 年、1983 年、1989 年 (负值)、1998 年、2010 年和 2016 年两者的峰值都比较吻合 (图 4)。而当厄尔尼诺指数处于正负值之间转换时容易出现长江径流量的谷值, 比如 1963 年、1972 年、1978 年、1986 年、2001 年和 2006 年。当然结果也显示, 不是所有的峰值都吻合, 比如 1954 年的长江径流量峰值, 1958 年和 1966 年的厄尔尼诺峰值, 也不是所有的厄尔尼诺指数的正负转换对应了长江径流量谷值, 比如 2011 年长江径流量谷值 (图 4)。

4 讨论

4.1 甲藻孢囊与水体富营养化关系

大量的研究表明, 沉积物中的甲藻孢囊由于其保存的相对稳定性, 可以作为追溯环境变化的一个指示

物^[7-8, 14]。长江口海域经历了人口和经济快速增长, 受到人类活动和气候变化双重影响^[26], 该海域甲藻孢囊包含了水体富营养化和厄尔尼诺事件信息。分析柱状样发现, 甲藻孢囊呈现出明显的垂直年代上的变化, 而且随着距离的不同其变化趋势也不同。

我们之前的研究显示, 在长江口海域, 水体富营养化会导致总甲藻孢囊和产 PSP 甲藻孢囊丰度的上升^[20], 而这次不同距离柱状样的甲藻孢囊分析结果显示, 该信号是随着距离河口远近不同发生变化的 (其距离实际上反映的是受长江冲淡水的影响程度, 主要表现为水流大小和营养物质的输送程度)。在近河口处的 C2 柱, 总甲藻孢囊和产 PSP 甲藻孢囊丰度只显示了微弱的上升。推测由于在近河口处, 水流速度较快, 对甲藻孢囊的沉降不利 (甲藻孢囊的物理特性类似细微泥沙颗粒)^[27], 所以富营养化信息不明显。以往长江口甲藻孢囊水平分布研究也显示, 近河口处的孢囊丰度低而稍远处高^[28-29]。同时, 该处高沉积速率展示了高时间分辨率的甲藻孢囊信息, 主要反映在甲藻孢囊季节上的变化, 总体而言, 冬季甲藻孢囊丰度最低, 这与冬季低温限制藻类生长直接相关^[30]。Pospelova 等^[9]利用沉积物捕获器研究了加拿大格鲁吉亚海峡 1996-1998 年的甲藻孢囊沉降情况, 结果显示, 沉降高峰发生在春夏, 冬季沉降最少。

在距离长江口中等距离处, 水体富营养化信息十

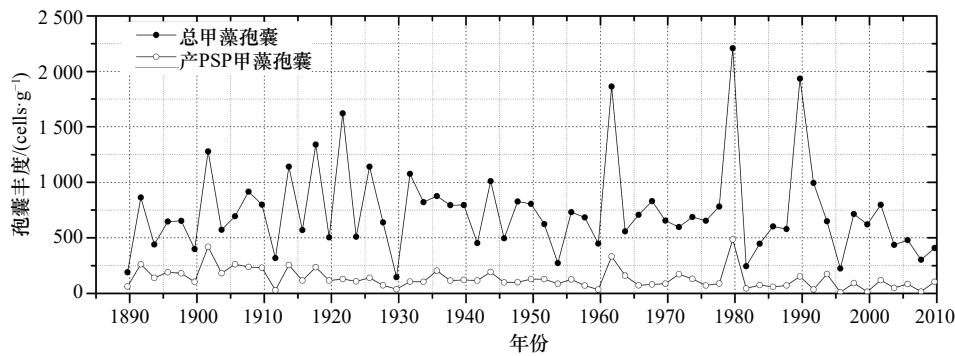


图6 F2沉积柱总甲藻孢囊和产PSP甲藻孢囊丰度随时间变化趋势

Fig. 6 Variation of total and PSP productive dinoflagellate cysts abundance of Core F2

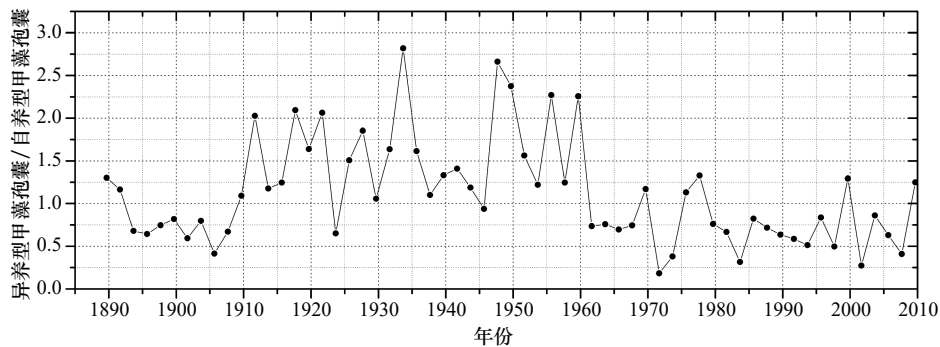


图7 F2沉积柱异养型和自养型甲藻孢囊的比率随时间变化趋势

Fig. 7 Variation of ratio of hetero/autotrophic dinoflagellate cysts in Core F2

分显著。在Za3和Rb12站位,水体浮游植物群落受长江水流带来营养盐的影响较为明显,该海域也是东海藻华频发的区域之一^[31],而且该处水体环境(主要是较低的水流速度和扰动)有利于甲藻孢囊沉降。这2根柱状样中的异养型和自养型甲藻孢囊的比率随着富营养化水平的上升而下降^[20],该结果与C2柱的异养型和自养型甲藻孢囊的比率呈现微弱下降趋势一致。这个比率下降的主要原因是异养型甲藻孢囊丰度波动极小,而自养型甲藻孢囊丰度上升明显。先前有研究表明,以重金属污染为主导的工业化水体污染容易导致孢囊结构从自养型甲藻孢囊主导转变为异养型甲藻孢囊主导^[19]。而Liu等^[32]在黄海的调查显示,工业污染区域的甲藻孢囊丰度较低,人类活动污水污染区域甲藻孢囊丰度较高。这些说明,长江口海域污染不是以重金属污染为主,而是以氮、磷、钾为主导的农业和生活污水的营养盐污染为主。在长江口海域,导致水体富营养化持续加剧的原因,主要还是人类活动不断加剧,工农业污水和生活污水的排放也持续增多,反映在人口数量和农业化肥使用量的持续增多(图8),以及近海养殖业的发展迅速(特别是过度无序不科学的养殖)^[33]。而且这种以氮、磷、

钾为主导的富营养化也导致了甲藻孢囊物种多样性的上升,这与水体富营养化会引起甲藻赤潮比例增多(而且有毒有害种类增多)的结果是一致的。

在距离长江口较远处的F2站位,总甲藻孢囊丰度和产PSP甲藻孢囊丰度都没有呈现明显上升趋势(图6)。东海营养盐分布显示,以长江入海口成扇形梯度状从高到低分布^[34]。推测该处受长江流淡水影响相对较弱,导致水体富营养化程度也不如长江口入海口近处的程度高^[34-35]。

4.2 甲藻孢囊与厄尔尼诺指数关系

厄尔尼诺指数能够指示厄尔尼诺事件和拉尼娜事件,而厄尔尼诺事件会影响东南亚降雨等气候^[36]。降雨量的改变可直接引起陆地径流量的改变,从而改变海洋中陆源营养盐的输送,进而影响海洋浮游植物产量以及进一步的甲藻孢囊产量。但是这和水体富营养化导致甲藻孢囊产量增加常常重叠在一块,如何区分是一个科学难点。我们的研究显示,厄尔尼诺指数、长江径流量和甲藻孢囊3者的峰谷值通过以上逻辑关系建立联系,并且以此来区别水体富营养化信号,但是这种联系随着离长江口位置不同而不同。

位于长江口入海口近处C2柱,水流速度对甲藻

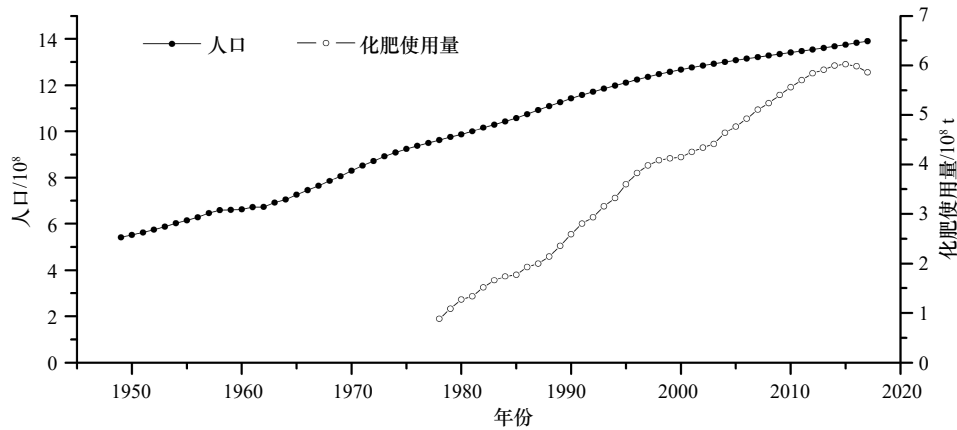


图 8 1949–2017 年全国人口数据和 1978–2017 年全国农用化肥年使用折存量

Fig. 8 National population during 1949–2017 and transferred stock of national fertilizer used during 1978–2017

孢囊的沉降不利,当径流量突然增大时,反而导致了总甲藻孢囊丰度的突然下降。1998年,厄尔尼诺指数处于峰值,中国发生洪灾,长江径流量也出现峰值,同步C2沉积柱四季的总甲藻孢囊丰度都处于低值。相反地,在2001年和2006年,厄尔尼诺指数处于正负转化点(图4),而长江年均径流量出现低谷,水体运动也突然减弱,有利于甲藻孢囊的沉降,故出现了孢囊丰度峰值(图2)。在此站位,水体流速对甲藻孢囊丰度的影响要大于营养盐浓度的影响,这也是为何此站位水体富营养化信号微弱的原因。

Rb12和Za3沉积柱位于距离长江入海口中等位置,且受钱塘江影响。之前的结果显示,在厄尔尼诺指数峰值时常常也出现甲藻孢囊丰度峰值,原因是长江径流量的突然增加会引起陆源营养盐输送的突然增加^[20]。而在长江年均径流量处于低谷的1978年和1986年,2根沉积柱总甲藻孢囊丰度也处于低谷,说明厄尔尼诺指数转换期造成的长江径流量降低,减少了陆源营养盐的输送,从而甲藻孢囊产量下降。在此两个站位的厄尔尼诺信号和富营养化信号一样也十分明显和清晰。此处的水流速度对甲藻孢囊沉降影响较小,而长江径流量脉冲增加带来的水体营养盐浓度增加对甲藻孢囊增加明显。

F2沉积柱位于距离长江入海口较远位置,在出现的几次甲藻孢囊丰度峰谷值中,只有1989年的峰值和1995年的谷值与长江年均径流量有较好的吻合。此站位由于距离长江入海口较远,在平时受长江径流影响较小,但是在长江径流突然增加年亦可受到

影响。然而其他年份峰谷值为何没有较好的吻合原因还未知,推测原因之一是柱状样按2cm切层分析,孢囊数据是近2年的平均值,第二可能受其他因素如台湾暖流等影响^[37]。但是F2柱反映的长时间序列中的甲藻孢囊峰谷值说明近百年中是存在着一些特殊的气候事件,需要采用更多的证据来验证。

5 结论

长江口海域可以通过总甲藻孢囊以及产PSP甲藻孢囊丰度上升反映水体富营养化,通过甲藻孢囊丰度峰谷值反映厄尔尼诺这类短时间气候事件,也依此可以区别人类活动和气候变化两者在甲藻孢囊中的信号,但是这两种信号都是随着距离长江口的远近发生变化。其中富营养化信号在近处相对较弱;中间处信号明显;远处信号几乎未见。厄尔尼诺信号显示,近处受水流突然增大或减弱导致甲藻孢囊丰度谷值和峰值出现;中间处水流与甲藻孢囊丰度峰谷值重叠且信号较强;远处丰度峰值信号明显但主导因素多样化。另外结果还显示,冬季甲藻孢囊丰度最低,长江口污染主要以氮、磷、钾为主导的农业和生活污水的营养盐污染为主。这为该研究的柱状样选址提供了科学依据,同时该研究对该海域环境演变历史重建、赤潮发生历史和厄尔尼诺现象研究都具有十分重要的意义。

致谢: 感谢叶黎明副研究员在样品采集中提供的帮助,感谢叶立果和陈睿琪同学在样品处理中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 周名江, 颜天, 邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1031–1038.
Zhou Mingjiang, Yan Tian, Zou Jingzhong. Preliminary analysis of the characteristics of red tide areas in Changjiang River Estuary and

- its adjacent sea[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1031–1038.
- [2] 苏纪兰. 中国的赤潮研究[J]. *中国科学院院刊*, 2001, 16(5): 339–342.
Su Jilan. Harmful algal bloom and its research in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2001, 16(5): 339–342.
- [3] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. *生命科学*, 2001, 13(2): 54–59, 53.
Zhou Mingjiang, Zhu Mingyuan, Zhang Jing. Status of harmful algal blooms and related research activities in China[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2001, 13(2): 54–59, 53.
- [4] Lu Douding, Goebel J, Qi Yuzao, et al. Morphological and genetic study of *Prorocentrum donghaiense* Lu from the East China Sea, and comparison with some related *Prorocentrum* species[J]. *Harmful Algae*, 2005, 4(3): 493–505.
- [5] Wang Hongxia, Lu Douding, Huang Haiyan, et al. First observation of *Karlodinium veneficum* from the East China Sea and the coastal waters of Germany[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 30(6): 112–121.
- [6] 黄海燕, 陆斗定. 甲藻孢囊研究进展[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(3): 85–92.
Huang Haiyan, Lu Douding. Recent progress in the study of dinoflagellate cyst[J]. *Journal of Marine Science*, 2009, 27(3): 85–92.
- [7] Dale B. The sedimentary record of dinoflagellate cysts: looking back into the future of phytoplankton blooms[J]. *Scientia Marina*, 2001, 65(S2): 257–272.
- [8] Dale B. Eutrophication signals in the sedimentary record of dinoflagellate cysts in coastal waters[J]. *Journal of Sea Research*, 2009, 61(1/2): 103–113.
- [9] Pospelova V, Esenkulova S, Johannessen S C, et al. Organic-walled dinoflagellate cyst production, composition and flux from 1996 to 1998 in the central Strait of Georgia (BC, Canada): a sediment trap study[J]. *Marine Micropaleontology*, 2010, 75(1/4): 17–37.
- [10] Rouis-Zargouni I, Turon J L, Londeix L, et al. Environmental and climatic changes in the central Mediterranean Sea (Siculo–Tunisian Strait) during the last 30 ka based on dinoflagellate cyst and planktonic foraminifera assemblages[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 285(1/2): 17–29.
- [11] Matsuoka K, Joyce L B, Kotani Y, et al. Modern dinoflagellate cysts in hypertrophic coastal waters of Tokyo Bay, Japan[J]. *Journal of Plankton Research*, 2003, 25(12): 1461–1470.
- [12] Sluijs A, Pross J, Brinkhuis H. From greenhouse to icehouse; organic-walled dinoflagellate cysts as paleoenvironmental indicators in the Paleogene[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68(3/4): 281–315.
- [13] Dale B, Fjellså A. Dinoflagellate cysts as paleoproductivity indicators: state of the art, potential and limits[M]//Zahn R, Pedersen T F, Kaminski M A, et al. *Carbon Cycling in the Glacial Ocean: Constraints on the Ocean's Role in Global Change*. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [14] Matsuoka K. Eutrophication process recorded in dinoflagellate cyst assemblages—a case of Yokohama Port, Tokyo Bay, Japan[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, 231(1): 17–35.
- [15] 王朝晖, Matsuoka K, 齐雨藻, 等. 柘林湾近代沉积物中甲藻孢囊的垂直分布[J]. *海洋通报*, 2004, 23(3): 46–53.
Wang Zhaohui, Matsuoka K, Qi Yuzao, et al. Vertical distribution of dinoflagellate resting cysts in recent sediments from Zhelin Bay, the South China Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(3): 46–53.
- [16] 王朝晖, Matsuoka K, 齐雨藻, 等. 深圳湾表层沉积物中甲藻孢囊的垂直分布[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2073–2081.
Wang Zhaohui, Matsuoka K, Qi Yuzao, et al. Vertical distribution of dinoflagellate resting cysts in surface sediments from Shenzhen Bay of the South China Sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2073–2081.
- [17] Wang Zhaohui, Qi Yuzao, Jiang Tianjiu, et al. Vertical distribution of dinoflagellate resting cysts in recent sediments from Daya Bay, the South China Sea[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(5): 504–510.
- [18] 付永虎, 王朝晖, 康伟, 等. 长江口及其邻近海域近代沉积物中甲藻孢囊的垂直分布[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2009, 30(1): 106–110.
Fu Yonghu, Wang Zhaohui, Kang Wei, et al. Vertical distribution of dinoflagellate resting cysts in recent sediments from the Changjiang River Estuary and adjacent waters[J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2009, 30(1): 106–110.
- [19] Dale B. Marine dinoflagellate cysts as indicators of eutrophication and industrial pollution: a discussion[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 264(3): 235–240.
- [20] Dai Xinfeng, Lu Douding, Xia Ping, et al. A 50-year temporal record of dinoflagellate cysts in sediments from the Changjiang estuary, East China Sea, in relation to climate and catchment changes[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 112: 192–197.
- [21] Thorsen T A, Dale B. Dinoflagellate cysts as indicators of pollution and past climate in a Norwegian fjord[J]. *The Holocene*, 1997, 7(4): 433–446.
- [22] Matsuoka K, Fukuyo Y. *Technical Guide for Modern Dinoflagellate Cyst Study*[M]. Tokyo: Japan Society for the Promotion of Science, 2000: 6–7.
- [23] 王朝晖. 中国沿海甲藻孢囊与赤潮研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.
Wang Zhaohui. *Study of Dinoflagellate Resting Cysts and Red Tides in Chinese Coastal Water*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007.
- [24] 邹振华, 李琼芳, 夏自强, 等. 人类活动对长江径流量特性的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(6): 622–626.
Zou Zhenhua, Li Qiongfang, Xia Ziqiang, et al. Human-induced alterations in runoff of the Yangtze River[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2007, 35(6): 622–626.

- [25] 张璇. 长江口及邻近海域营养盐的历史演变及其在赤潮中的作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Zhang Xuan. Historical comparison on evolution of nutrient and its function on the harmful algae blooms in Yangtze Estuary and its adjacent sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [26] Wang Bin, Chen Jianfang, Jin Haiyan, et al. Diatom bloom-derived bottom water hypoxia off the Changjiang estuary, with and without typhoon influence[J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(4): 1552–1569.
- [27] Dale B. Cyst formation, sedimentation, and preservation: factors affecting dinoflagellate assemblages in recent sediments from Trondheimsfjord, Norway[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1976, 22(1): 39–60.
- [28] Wang Zhaohui, Qi Yuzao, Lu Songhui, et al. Seasonal distribution of dinoflagellate resting cysts in surface sediments from Changjiang River Estuary[J]. *Phycological Research*, 2004, 52(4): 387–395.
- [29] 黄海燕, 陆斗定, 夏平, 等. 2006–2007年冬季长江口海域甲藻孢囊的分布及其与环境的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5569–5576.
Huang Haiyan, Lu Douding, Xia Ping, et al. Distribution of dinoflagellate cysts in Changjiang Estuary during the winter of 2006–2007 and their relationship with the environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5569–5576.
- [30] Shin H H, Park J S, Kim Y O, et al. Dinoflagellate cyst production and flux in Gamak Bay, Korea: a sediment trap study[J]. *Marine Micropaleontology*, 2012, 94–95: 72–79.
- [31] 刘录三, 李子成, 周娟, 等. 长江口及其邻近海域赤潮时空分布研究[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2497–2504.
Liu Lusan, Li Zicheng, Zhou Juan, et al. Temporal and spatial distribution of red tide in Yangtze River Estuary and adjacent waters[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(9): 2497–2504.
- [32] Liu Dongyan, Shi Yajun, Di Baoping, et al. The impact of different pollution sources on modern dinoflagellate cysts in Sishili Bay, Yellow Sea, China[J]. *Marine Micropaleontology*, 2012, 84–85: 1–13.
- [33] 金媛娟. 莆田南日岛鲍鱼养殖区环境变化评价[J]. 化学工程与装备, 2012(8): 213–215, 191.
Jin Yuanjuan. Environment change evaluation in abalone cultivation area at Nanri Island of Putian[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2012(8): 213–215, 191.
- [34] 董书航. 东海营养盐分布特征及跨陆架交换研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Dong Shuhang. Distribution and variations and cross shelf exchange of nutrients in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [35] 黄江婵. 近50年东海海水中营养盐时空分布特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
Huang Jiangchan. Distribution and changes of nutrient concentration in the East China Sea in late 50 years[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [36] 许武成, 王文, 马劲松, 等. 1951–2007年的ENSO事件及其特征值[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 18–24.
Xu Wucheng, Wang Wen, Ma Jinsong, et al. ENSO events during 1951–2007 and their characteristic indices[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(4): 18–24.
- [37] 腾琳. 中国沿海甲藻孢囊的水平和垂直分布研究[D]. 广州: 暨南大学, 2006.
Teng Lin. Horizontal and vertical distribution of dinoflagellate cysts from China Sea[D]. Guangzhou: Jinan University, 2006.

Relationship between dinoflagellate cysts and water eutrophication and ENSO index in the Changjiang River Estuary

Dai Xinfeng¹, Zeng Yulan¹, Li Dongrong², Wang Pengbin¹, Guo Ruoyu¹, Wang Ruifang¹, Lu Douding¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2. Hangzhou Maiyuqiao Elementary Education School (GongShu Campus), Hangzhou 310012, China)

Abstract: Dinoflagellate cysts, as micro-fossil, could be used to trace environmental change history, such as water eutrophication and climate change. But there is controversy on how to indicate water eutrophication, and also it is a problem how to differ the signals between water eutrophication and climate change in dinoflagellate cysts. In order to address these problems, we collected four sediment cores in the Changjiang River Estuary and analyzed their dinoflagellate cysts. Results showed that eutrophication could lead to the increase of total dinoflagellate cysts and Paralytic Shellfish Poisoning (PSP) productive dinoflagellate cysts abundance. And the ratio of hetero/autotrophic dinoflagellate cysts decreased, which implied that the eutrophication mainly resulted from agriculture and domestic sewage in the Changjiang River Estuary. Because of water plume, the eutrophication signal was relatively weak

near estuary, strong in middle distance and almost none in far distance. Seasonal change of dinoflagellate cysts was observed in the high sediment sinking area in the estuary, with the lowest production in winter as a result of low temperature. ENSO events will lead to the peak and valley value of dinoflagellate cysts abundance by affecting nutrient input which is transferred by river downloading. Moreover, the signal also varied with the distance: valley and peak value of dinoflagellate cysts present because of strong and weak river runoff pulse near estuary, peak and valley value of dinoflagellate cysts and runoff overlapped and were clear in middle distance, and peak value of dinoflagellate cysts was obvious in far distance but the domain reason was complex. These findings are of great significance to environment history reconstruction, study of red tide history and ENSO events.

Key words: dinoflagellate cyst; eutrophication; ENSO; climate change