

Doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2013.02.016

刘东艳, 邸宝平, 石雅君, 等. 不同藻类生态参数在反演沉积物环境中的应用比较[J]. 海洋学报, 2013, 35(2):154-160.

Liu Dongyan, Di Baoping, Shi Yajun, et al. Comparison of ecological parameters in the sediment using multi-proxy approaches to indicate environmental changes[J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 2013, 35(2):154-160.

## 不同藻类生态参数在反演沉积物环境中的应用比较

刘东艳<sup>1</sup>, 邸宝平<sup>1,2</sup>, 石雅君<sup>1</sup>, 申旭红<sup>1,2</sup>, 李欣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 海洋沉积物中残留的硅壳、甲藻孢囊、类脂类化合物及生物硅等生态参数被广泛应用于反演和指示海洋古环境特征。本研究通过测定烟台四十里湾表层沉积物中的硅藻化石、甲藻孢囊、莱籽甾醇、甲藻甾醇及生物硅 5 种生态参数, 比较不同生态参数的相关性及其在反演海洋环境中的功能差异, 建立了多参数综合应用的研究方法。研究发现, 沉积物中的硅壳丰度与莱籽甾醇含量及生物硅含量存在明显正相关关系( $P < 0.05$ ), 莱籽甾醇含量与生物硅含量可以较好的佐证与提高沉积物中硅壳对硅藻生物量指示的准确性; 甲藻孢囊与甲藻甾醇含量相关性不明显( $P > 0.05$ ), 相较而言, 甲藻甾醇可以更准确的反演甲藻的生物量。因此, 生物与化学参数的结合应用不仅可以提高生物量指示的精确性, 而且有助于从物种组成角度更好的了解藻类对环境变化的响应特征。

**关键词:** 硅藻化石; 甲藻孢囊; 甾醇; 生物硅; 沉积物; 四十里湾

中图分类号: Q178.53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2013)02-0154-07

### 1 引言

浮游植物是海洋初级生产者的重要组成部分, 同时对环境变化十分敏感, 故常被作为重要生态参数应用于指示海洋环境变化<sup>[1]</sup>。在缺乏历史观测资料的前提下, 研究人员往往利用储存在沉积物中的藻类生物与化学信息反演古环境的变化。海洋浮游植物群落中的硅藻、甲藻死亡或沉降后, 因具有坚硬的细胞壁和孢粉质的孢囊壁, 可以较好的保存在海洋沉积物中, 古海洋学研究利用其细胞壁的花纹、形态及数量来反演上层海水中藻类群落结构的变化<sup>[2-3]</sup>; 而且硅、甲藻细胞内的类脂类化合物结构稳定, 不易分解, 随细胞沉降于沉积物中, 故其在沉积物中的含量常被

用作藻类生物标志物来指示上层水体藻类的生物量<sup>[4-6]</sup>; 此外, 硅藻细胞壁中的生物硅沉积到海底后亦可通过测定无定形硅的含量来反演上层水体中硅藻的生物量<sup>[7]</sup>。鉴于这些特征优势, 一些缺失的生态与环境信息可以通过藻类生态参数的研究而得到认证。例如, 20 世纪 40 年代化肥的大量使用导致波罗的海氮营养盐含量急剧增加, 海域呈现富营养化现象, 该过程在沉积物硅藻的群落结构变动上得到了体现, 富营养化指示种 *Actinocyclus normanii* 与 *Fragilaria subsalsa* 与同期营养盐水平均呈现出相同的变化趋势<sup>[8]</sup>。再如, 我国东海内陆架泥质区内沉积物柱样中的生物硅含量及其堆积速率在近 2 ka 以来, 在相对高温期明显增加而在相对低温期降低, 其变化特

收稿日期: 2012-06-28; 修订日期: 2012-12-10。

基金项目: 国家自然科学基金(40976097); 国家自然科学基金(41106101); 广东省渔业生态环境重点实验室开放基金(0990151051)。

作者简介: 刘东艳(1973—)女, 山东省青岛市人, 研究员, 从事海洋藻类生态学研究。E-mail: dyliu@yic.ac.cn

征反映了表层生产力对气候变化的响应<sup>[9]</sup>。

然而,多数研究在应用藻类生态参数反演古环境时,往往仅取其化学或生物因子,单一的化学或生物因子在缺乏其它数据佐证的前提下,可能会低估藻类生物量或者不能提供准确的物种信息。例如,海洋中小细胞链状优势硅藻群体(如:中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*、角毛藻 *Chaetoceros* spp. 等)与微型硅藻在沉积过程中极易破碎<sup>[10]</sup>,其数量远小于大细胞的硅藻,故容易造成对水体中硅藻总生物量的低估;已知仅有 15% 的甲藻物种可以形成孢囊<sup>[11]</sup>,因此利用沉积物中甲藻孢囊来估算水体中的甲藻丰度,容易低估其生物量。比较而言,类脂化合物和生物硅在沉降过程中保存更完整,尤其是在短时间尺度的现代沉积物研究中,其降解率低,因此能够更准确的反映藻类的总生物量。但是,尽管已有部分研究利用不同甾醇来区分硅藻的种属特征,然而其识别能力仍然较差,多数停留在纲的水平。因此,建立多参数的综合判定模式对于准确反演海洋古环境具有重要意义。国内、外的研究者在同时结合硅藻化石和生物硅来反演古环境方面已经开展了大量的研究,如:在加拿大的萨尼奇湾,沉积物柱样中的生物硅很好地反演了硅藻生物量的变化历史,而硅藻化石群落中的藻类具槽帕拉藻 *Paralia sulcata* 则很好地指示了该湾水平面及底栖环境的改变<sup>[12]</sup>;相比较而言,将甾醇与硅、甲藻结合起来进行古环境的反演则较少<sup>[13]</sup>。

烟台近海曾经是我国烟威渔场的主要海区,近 20 年来,四十里湾已经被烟台市政府开发成为一个重要海港和沿海水产养殖基地,对于烟台地区的经济发展起到了重要的作用,是山东半岛蓝色经济区建设的重要组成部分。然而,持续快速增长的社会经济发展以及人口的增加已经严重的影响到了四十里湾的生态系统健康及可持续发展,并导致赤潮和水母暴发的不断发生<sup>[14-15]</sup>。由于该海域的环境质量调查资料较为匮乏,难以判断环境的长期变化规律,因此需要反演沉积物中存在的化学、生物因子作为补充信息。建立准确的反演方法是客观判断环境历史变化的关键。本文针对烟台四十里湾的典型人类活动区域(如:海水养殖、污水排放、航运及垃圾倾倒等),进行了表层沉积物收集,并综合分析沉积物中硅壳、甲藻孢囊、生物硅、甲藻甾醇及莱籽甾醇的含量,比较了不同参数在环境指示中的差异与互补作用。该研究不仅为该海区沉积物环境反演提供了方法学基础,同时对其他海域的沉积物环境的研究亦具有应用参考价值。

## 2 材料与方法

### 2.1 调查区域及样品采集

四十里湾为一耳状半封闭式结构,位于山东省烟台,毗邻北黄海,海岸线长 20 km,面积约为 130 km<sup>2</sup>,水深多为 8~15 m,水体交换能力较差。根据 2009 年对该海域的调查,夏季水温为 23.3~27.4 °C (6-8 月),冬季水温为 2.5~3.0 °C (12-2 月),盐度范围为 29.6~33.0。于 2008 年 11 月在四十里湾 21 个站点进行了表层沉积物样品的采集(图 1),站点的具体布设如下:A 区(站点 1~6),B 区(站点 7~11),C 区(站点 12~16),D 区(站点 17~19),E 区(站点 20~21)。A 区为生活污水排放区,B 区为航道区,C 区为海水养殖区,D 区为垃圾倾倒区,E 区为工业污水排放区。用箱式采泥器采集各站点表层 0~5 cm 样品,用自制透明塑料管从箱式采泥器中未受扰动的表层 2 cm 进行样品采集,于 -20 °C 冰箱中避光保存。

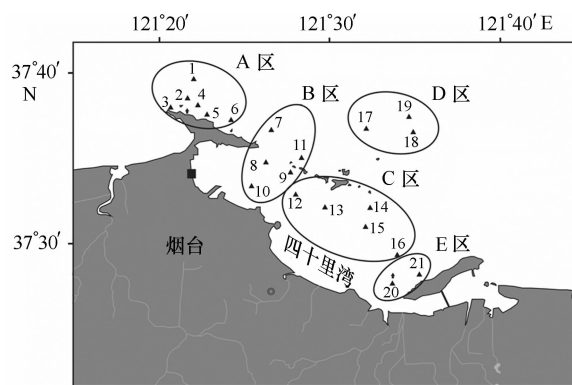


图 1 研究区域及采样站点

### 2.2 样品处理及分析

#### 2.2.1 硅藻化石的研究

沉积物硅藻的分析采用重液浮选法<sup>[16-17]</sup>,流程即:经过 HCl 溶液处理-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液处理-重液浮选等系列操作得到硅藻样品,用加拿大胶制片,在 Olympus CX-31 光学显微镜下进行硅藻鉴定及计数。本研究分析了全部 21 个站点的硅壳组成。

#### 2.2.2 甲藻孢囊的研究

甲藻孢囊的研究采用孢粉学方法<sup>[18]</sup>,流程即:经过 HCl 溶液处理-HF 溶液处理-超声波分离清洗-网筛过滤等系列操作,分离出孢囊溶液,然后在 Olympus IX81 倒置显微镜下进行种类鉴定、计数并拍照。本研究分析了全部 21 个站点的甲藻孢囊组成。

### 2.2.3 生物硅的测定

生物硅的测定采用化学提取法<sup>[19-20]</sup>,流程为:样品经 HCl(1:9)处理, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (10%)处理, 60 °C 干燥 12 h, 85 °C 恒温水浴, 2 mol/dm<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 进行 8 h 连续提取——用硅钼蓝法测定提取液中的硅含量,通过溶出曲线外推法计算样品中生物硅的含量。受沉积物样品量的限制,分析了除站点 2、16、19、20、21 之外的其余 16 个站点的生物硅含量。

### 2.2.4 生物标志物的提取

采用 Zhao 等给出的沉积物中可溶性有机物的提取和测定方法<sup>[21]</sup>,利用气相色谱-质谱仪定性分析,用气相色谱定量分析,可溶性有机物含量通过其色谱峰与内标峰对比计算得到。采用该方法对已知浓度的甾醇内标(C19-OH, 9.8 ng/dm<sup>3</sup>)进行 10 次重复分析,相对标准偏差小于 ±10%,并通过实验过程中加入空白样品方法对实验背景进行校正。受沉积物样品量的限制,分析了除站点 1、2、11、13、15、17、19 之外的其余 14 个站点的甲藻甾醇及菜籽甾醇含量。

### 2.2.5 数据分析

各参数的空间分布特征用 Coreldral 12 软件进行作图,采用 Origin 8.0 软件对相关参数之间进行相关性分析(Pearson 相关性检验)。

## 3 结果与讨论

### 3.1 应用沉积物中的硅藻化石、菜籽甾醇与生物硅综合判定硅藻群落变化

硅壳的数量与组成,以及代表硅藻生物量的生物标志物——菜籽甾醇与生物硅在多个站位的测定结果显示于图 2 中。

表层沉积物中硅藻的丰度范围为 366 ~ 20 335 个/g(干重,后同),各区平均丰度由高到低依次为 A 区(见图 1,后同)[(6 444 ± 7 246) 个/g]、D 区[(6 405 ± 6 810) 个/g]、B 区[(2 494 ± 1 857) 个/g]、E 区[(2 095 ± 2 444) 个/g]、C 区[(1 573 ± 552) 个/g](图 2 a);菜籽甾醇含量范围为 30.9~248.4 ng/g,平均含量由高到低的顺序为 D 区(157.2 ng/g)、A 区[(154.3 ± 68.9) ng/g]、E 区[(121.6 ± 35.8) ng/g]、B 区[(113.2 ± 74.8) ng/g]、C 区[(83.8 ± 42) ng/g](图 2 b);生物硅百分含量为 0.25%~1.01%,由高到低的顺序为 D 区(0.78% ± 0.12%)、A 区(0.69% ± 0.23%)、C 区(0.53% ± 0.081%)、B 区(0.37 ± 0.073%)(图 2 c)。总体结果显示,3 种指示参数在生活污水排放区(A 区)与垃圾倾倒区(D 区)含量较高,而在

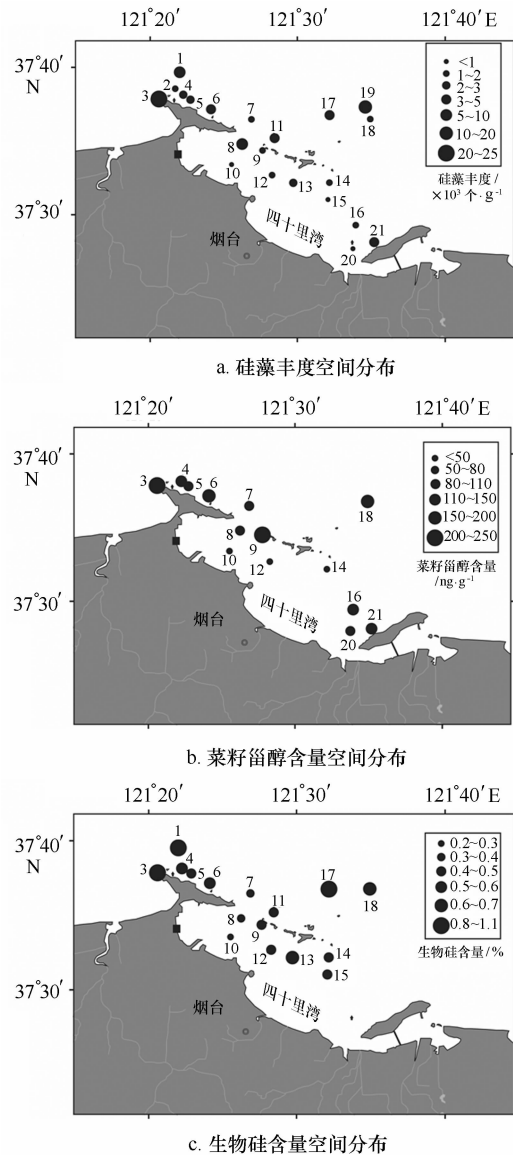


图 2 硅藻丰度、菜籽甾醇含量和生物硅含量空间分布

航道区(B区)、养殖区(C区)与工业污水排放区(E区)的值相对较低。

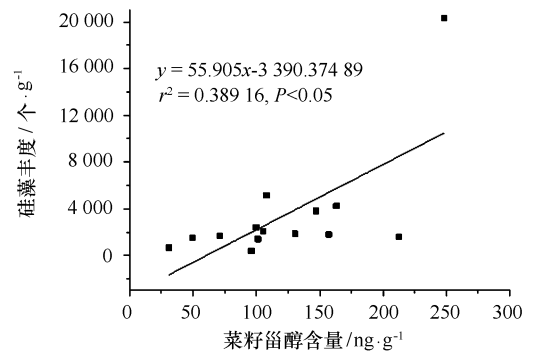
然而,3 种硅藻指示参数在不同区域的分布仍有细微差异:(1)A 区与 D 区的差异:与硅壳的结果不同,菜籽甾醇与生物硅的含量同时显示 D 区的生物量高于 A 区;(2)B 区与 C 区的差异:硅壳和菜籽甾醇的结果显示 B 区高于 C 区,而生物硅含量却显示不同的结果即 C 区高于 B 区。在这种情况下,我们应该如何综合判断对生物量指示的准确性呢?首先,对 3 种参数进行相关性分析。结果表明 3 个参数之间存在较好的相关性(图 3 a,b,c)。硅藻丰度与菜籽甾醇含量及生物硅含量都呈现明显正相关( $P < 0.05$ )(图 3a,b),菜籽甾醇与生物硅之间也呈现明显正相关( $P <$

0.05)(图3c)。这表明3个参数结果之间具有很相似的分布规律,可以互相参照。

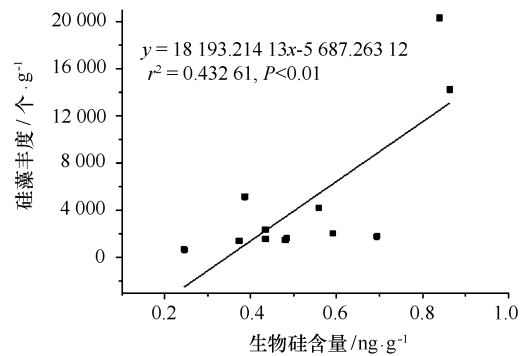
其次,对四十里湾沉积物与水体中硅藻的优势种(相对丰度大于2%)组成进行比较,发现二者存在一定的差异性(见表1)。从表1可以看出,硅藻具槽帕拉藻 *Paralia sulcata* 在沉积物与上层水体中都是最主要优势种,显示出该藻在两种介质中具有很好的对应关系;沉积物优势物种多以底栖种为主而水体优势种则以浮游种为主。水体中硅质壁较薄的优势种,如:旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus*、柔弱拟菱形藻 *Pseudo-nitzschia delicatissima* 等在沉积物中明显缺失。

相比较而言,菜籽甾醇与生物硅可以较好的弥补因硅藻化石缺失而导致的生物量的损失,因而能更好地指示上层水体硅藻的生物量。在表层沉积物中,来自水体中硅藻的菜籽甾醇与生物硅的含量保存较好,降解率低,尤其是生物硅,还可以避免由于摄食带来的变化。已有研究表明,经过滤食,大量浮游生物残渣和排泄物仍然会沉降到沉积物中,其中生物硅的化学形态不会发生变化,使沉积物中生物硅的含量保持相对正常的水平<sup>[23]</sup>。在本研究中,C区为养殖区,主要以滤食性的贝类养殖为主,大量的硅藻会被摄食,造成硅藻在沉积物中的低沉降率及硅壳的丰度偏低,故以生物硅的结果为主要参照。综合以上分析,判定硅藻的生物量在四十里湾按照由高到低的顺序依次为D区、A区、E区、C区、B区。证实垃圾倾倒与生活污水排放对硅藻生物量的影响最大,而航道运输的影响最小。

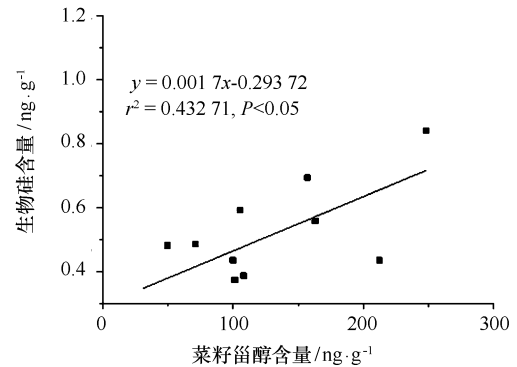
同时,四十里湾表层沉积物共鉴定出硅藻84种,包括中心纲26种,羽纹纲58种;其中,富营养化指示种具槽帕拉藻 *P. sulcata* 与水体中的营养盐因子DIN、DIP呈现出显著正相关性<sup>[24]</sup>。由此可见,硅藻指示物种的变化可进一步确认海区的环境特征。



a. 硅藻丰度与菜籽甾醇含量的相关性



b. 硅藻丰度与生物硅含量的相关性



c. 菜籽甾醇含量与生物硅含量的相关性

图3 硅藻丰度、菜籽甾醇含量和生物硅含量之间相关性

表1 四十里湾表层沉积物与上层水体优势种组成对比

表层沉积物优势种	表层沉积物优势种细胞丰度/%	上层水体优势种	上层水体优势种细胞丰度/%
硅藻化石		硅藻	
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	37.6	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	41.2
星形柄链藻 <i>Podosira stelliger</i>	11.8	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	11.2
柱状小环藻 <i>Cyclotella stolorum</i>	9.5	柔弱拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	9.4
羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.	6.6	海链藻 <i>Thalassiosira</i> sp.	6.4
爱氏辐环藻 <i>Actinocyclus ehrenbergii</i>	6.4	环纹娄氏藻 <i>Lauderia amulata</i>	5.0
粗纹角藻 <i>Trachymeis aspera</i>	3.3	劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	3.8
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus iridis</i>	2.1	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	3.7
甲藻孢囊		丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	2.2
膝沟藻 <i>Spini ferites bentori</i> var. <i>truncata</i>	17.6	甲藻	
具刺膝沟藻 <i>Spini ferites hyperacanthus</i>	8.8	锥状斯氏藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	19.5

续表 1

表层沉积物优势种	表层沉积物优势种细胞丰度/%	上层水体优势种	上层水体优势种细胞丰度/%
网状原角管藻 <i>Operculodinium centrocarpum</i>	8.4	微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>	16.1
膝沟藻 <i>Spini ferites</i> spp.	7.8	血红哈卡藻 <i>Akashiwo sanguinea</i>	14.0
原多甲藻 <i>Brigantedinium</i> sp. 1	5.9	塔玛亚历山大藻 <i>Alexandrium tamarense</i>	13.0
原多甲藻 <i>Protoperidinium</i> sp. 2	3.9	尖叶原甲藻 <i>Prorocentrum triestinum</i>	8.0
微小亚历山大藻 <i>Alexandrium minimum</i>	3.7	三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	5.7
膝沟藻 <i>Spini ferites</i> sp. cf. <i>delicates</i>	3.5	渐尖鳍藻 <i>Dinophysis acuminata</i>	5.0
原多甲藻 <i>Protoperidinium</i> spp.	2.7	裸甲藻 <i>Gymnodinium lohmanii</i>	3.8
具刺膝沟藻 <i>Spini ferites ramosus</i>	2.5	海洋原甲藻 <i>Prorocentrum micans</i>	2.5
未定种 1 Unknown cyst 1	5.7		
未定种 2 Unknown cyst 2	4.7		

注:上层水体硅藻、甲藻资料来源于蒋金杰等<sup>[22]</sup>。

### 3.2 应用沉积物中甲藻孢囊及甲藻甾醇综合判定甲藻群落变化

四十里湾沉积物中甲藻孢囊的数量与组成,以及代表甲藻生物量的生物标志物——甲藻甾醇在多个站位的测定结果显示于图 4a, b 中:四十里湾表层沉积物中甲藻孢囊的丰度范围为 123 ~ 1 322 个/g(干重,后同)(图 4a),由高到低的丰度分布趋势为 A 区 [(534 ± 393) 个/g]、D 区 [(389 ± 245) 个/g]、C 区

[(370 ± 105) 个/g]、B 区 [(340 ± 91) 个/g]、E 区 [(132 ± 13) 个/g]。共鉴定出甲藻孢囊 35 种和 3 种未定种,其中自养型孢囊 16 种,异养型孢囊 19 种<sup>[25]</sup>。甲藻甾醇的分布范围为 23.8 ~ 201.6 ng/g(图 4b),由高到低的分布趋势为 E 区 [(107.2 ± 118) ng/g]、A 区 [(96.7 ± 72.6) ng/g]、C 区 [(68.2 ± 8.6) ng/g]、D 区 (59.9 ng/g)、B 区 [(44.7 ± 8.9) ng/g]。

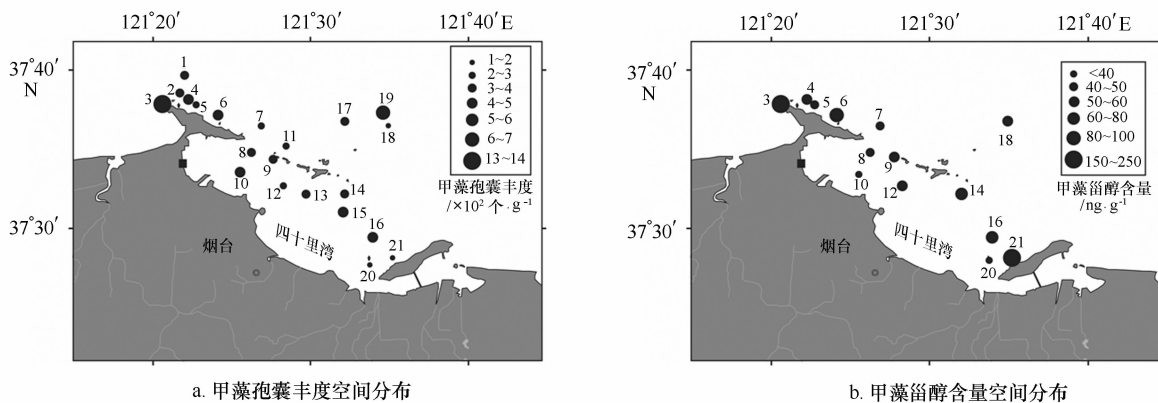


图 4 甲藻孢囊丰度和甲藻甾醇含量空间分布

由此可见,甲藻孢囊丰度与甲藻甾醇含量在空间分布上具有较大差异性:甲藻孢囊丰度的高值区在生活污水排放区(A区)与垃圾倾倒区(D区);而甲藻甾醇含量的高值区在工业污水排放区(E区)与生活污水排放区(A区)。进一步的相关性分析亦证实两者之间的相关性并不明显( $P > 0.05$ )(图 5)。

对沉积物中甲藻孢囊组成与水体中甲藻优势物种组成的比较发现(见表 1):四十里湾表层沉积物中甲藻孢囊优势种以自养型的膝沟藻孢囊 *Spini ferites bentori* var. *truncata*、具刺膝沟藻孢囊 *Spini ferites hyperacanthus* 和异养型的原多甲藻孢囊 *Brigante-*

*dinium* sp. 等为主;而四十里湾水体中浮游植物群落组成的年际变化研究显示,甲藻的优势物种则以自养型的塔玛亚历山大藻 *Alexandrium tamarense*、血红哈卡藻 *Akashiwo sanguinea*、锥状斯氏藻 *Scrippsiella trochoidea* 以及异养型的微小原甲藻 *Prorocentrum minimum* 等为主,其中微小原甲藻 *P. minimum* 与血红哈卡藻 *A. sanguinea* 并不形成孢囊,且塔玛亚历山大藻孢囊 *A. tamarense* 与锥状斯氏藻孢囊 *S. trochoidea* 也分别只占沉积物甲藻孢囊群落总丰度的 1.1% 和 1.3%。同时,追踪近 10 年来四十里湾赤潮发生事件发现,赤潮种多以甲藻血红哈卡藻 (*A. san-*

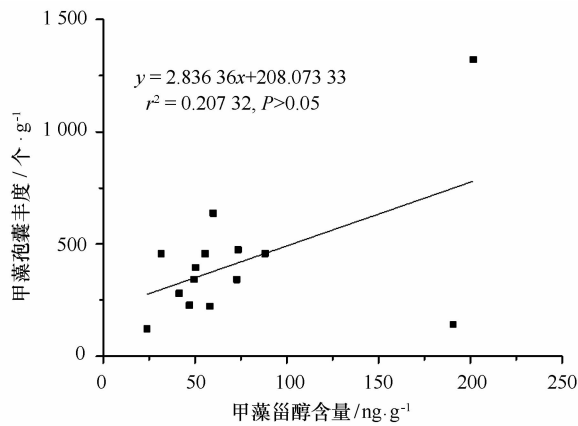


图5 甲藻孢囊丰度与甲藻甾醇含量的相关性

guinea)为主<sup>[25]</sup>。因此,上层水体的甲藻优势种并未完全在表层沉积物孢囊群落中得以体现。然而,这些未形成孢囊的甲藻仍然会产生甲藻生物标志物——甲藻甾醇,并部分沉降到沉积物中,比较而言,在定量反演四十里湾沉积物中甲藻生物量方面甲藻甾醇更具优势。根据以上分析,沉积物中甲藻生物量的分布可以判定由高到低的顺序为:E区、A区、C区、D区、B区。结果显示工业污水与生活污水排放对甲藻的生物量影响较大,航道区最小。

Liu等对四十里湾沉积物甲藻孢囊营养类型的分析进一步证实了以上结果<sup>[26]</sup>。研究发现:重金属

对异养型甲藻的影响跟自养型甲藻不同,受重金属污染自养型甲藻孢囊比异养型甲藻孢囊下降更快,因此E区较高的异养型甲藻孢囊与自养型甲藻孢囊之比较好的指示了工业污水排放区E区的重金属污染<sup>[25]</sup>。沉积物中TOC与长链正构烷烃的分布特征亦表明相对近海养殖与垃圾倾倒等人类活动,近岸污水排放对四十里湾沉积物有机质含量的影响最为显著<sup>[27]</sup>。此外,在四十里湾沉积物中还鉴定出两种有毒有害赤潮甲藻孢囊:亚历山大藻孢囊 *Alexandrium* spp. 和链状裸甲藻孢囊 *Gymnodinium catenatum*。甲藻孢囊是赤潮爆发的潜在物种,沉积物中甲藻孢囊的研究可以为赤潮暴发机理提供重要参考并为有害赤潮的爆发提供预警。

## 4 结论

通过对5种不同生态参数的比较分析,本研究发现应用藻类多参数组合判定环境变化可以很好的提高研究结果的准确性。生物标志物——甾醇及生物硅在反映沉积物中硅藻和甲藻生物量准确性方面优于硅壳与甲藻孢囊;然而,硅壳与甲藻孢囊物种组成信息可以帮助了解不同藻类对环境变化的响应机制,如海域的富营养化状况、重金属污染及赤潮暴发等环境现象。同时,研究表明甲藻与硅藻对海域不同污染来源的响应特征可能不同,甲藻对工业污染的响应更为敏感。

## 参考文献:

- [1] Finkelstein S A, Davis A M. Paleoenvironmental records of water level and climatic changes from the middle to late Holocene at a Lake Erie coastal wetland, Ontario, Canada[J]. Quaternary Research, 2006, 65: 33—43.
- [2] Liu D Y, 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: 279—290.
- [3] 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.
- [4] Ten Haven H, De Leeuw J, Schenck P. Organic geochemical studies of a Messinian evaporitic basin, northern Apennines (Italy) I: Hydrocarbon biological markers for a hypersaline environment[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49(10): 2181—2191.
- [5] Telnaes N, Cooper B S. Oil-source rock correlation using biological markers, Norwegian continental shelf[J]. Marine and Petroleum Geology, 1991, 8(3): 302—310.
- [6] 赵美训, 张荣平, 邢磊, 等. 末次冰盛期以来日本海浮游植物生产力和群落结构变化[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2009, 39(05): 1093—1099.
- [7] Dickens G R, Owen R M. The latest Miocene-early Pliocene biogenic bloom: a revised Indian Ocean perspective[J]. Marine Geology, 1999, 161(1): 75—91.
- [8] Andrén E. Changes in the Composition of the Diatom Flora During the Last Century Indicate Increased eutrophication of the Oder Estuary, South-western Baltic Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 48: 665—676.
- [9] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 近2 ka以来东海内陆架泥质区高分辨率的生物硅记录及其古生产力意义[J]. 沉积学报, 2011, 9(2): 321—327.
- [10] Puškaric S, Berger G W, Jorissen F J. Successive appearance of subfossil phytoplankton species in Holocene sediments of the Northern Adriatic and its relation to the increased eutrophication pressure[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1990, 31: 177—187.
- [11] Dale B. Eutrophication signals in the sedimentary record of dinoflagellate cysts in coastal waters[J]. Journal of Sea Research, 2009, 61: 103—113.

- [12] Mcquoid M R, Hobson L A. A Holocene record of diatom and silicoflagellate microfossils in sediments of Saanich Inlet, ODP leg 169S[J]. *Mar Geol*, 2011, 174: 111—123.
- [13] Xing L, Zhang R P, Liu Y G, et al. Biomarker records of phytoplankton productivity and community structure changes in the Japan Sea over the last 166 kyr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30: 2666—2675.
- [14] 徐宁, 吕颂辉, 段舜山, 等. 营养物质输入对赤潮发生的影响[J]. *海洋环境科学*, 2004, 23 (2): 20—24.
- [15] Dong Z, Liu D, Keesing J K. Jellyfish blooms in China: dominant species, causes and consequences[J]. *Mar Pollut Bull*, 2010, 60: 954—963.
- [16] Rengerg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1990, 4: 87—90.
- [17] Smol J P, Birks H J B, Last W M, et al. Tracking Environmental Change using lake sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, 155—203.
- [18] Matsuoka K, Fukuyo Y. Technical guide for modern dinoflagellate cyst study[EB/OL]. [Westpac-Hab/Westpac/Ioc, 2000]. [http://www.dinos.anesc.u-tokyo.ac.jp/technical\\_guide/main.pdf](http://www.dinos.anesc.u-tokyo.ac.jp/technical_guide/main.pdf).
- [19] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments[J]. *Deep-Sea Research*, 1989, 36 (9): 1415—1426.
- [20] 叶曦雯, 刘素美, 张经. 生物硅的测定及其生物地球化学意义[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 420—426.
- [21] Zhao M, Beveridge N A S, Shackleton N J, et al. Molecular stratigraphy of cores o Northwest Africa: sea surface temperature history over the last 80 ka[J]. *Paleoceanography*, 1995, 10: 661—675.
- [22] 蒋金杰, 刘东艳, 邸宝平, 等. 烟台四十里湾浮游植物群落的变化及其对环境的指示意义[J]. *海洋学报*, 2011, 33(6): 151—164.
- [23] Krause J W, Brzezinski M A, Landry M R, et al. The effects of biogenic silica detritus, zooplankton grazing, and diatom size structure on silicon cycling in the euphotic zone of the eastern equatorial Pacific[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(6): 2608—2622.
- [24] Di B P, Liu D Y, Wang Y J, et al. Diatom and silicoflagellate assemblages in modern surface sediments associated with human activity: a case study in Sishili Bay, China[J]. *Ecological indicator*, 2013, 24: 23—30.
- [25] 石雅君. 烟台四十里湾和北黄海附近海域沉积物中甲藻孢囊的研究[M]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [26] Liu D Y, Shi Y J, Di B P, 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.
- [27] 刘东艳, 申旭红, 王玉珏, 等. 烟台四十里湾表层沉积物有机质来源及其环境意义[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 205—212.

## Comparison of ecological parameters in the sediment using multi-proxy approaches to indicate environmental changes

LIU Dongyan<sup>1</sup>, DI Baoping<sup>1,2</sup>, SHI Yajun<sup>1</sup>, SHEN Xuhong<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Research, Chinese Academy of Sciences, Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China*; 2. *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Diatom frustules, dinoflagellate cysts, lipids and biogenic silica (BSi) have been widely used to reconstruct and indicate the marine paleo-environmental changes. In this study, five biological and chemical proxies including fossil diatoms, dinoflagellate cysts, brassicasterol, dinosterol and biogenic silica, were analyzed in the surface sediment of the Sishili Bay for the comparison of their ecological roles. Based on the results of correlation analysis and indicative capability of the five proxies, a multi-proxy approach was suggested. Diatom frustules showed obviously positive correlation with the brassicasterol and BSi values, respectively ( $P < 0.05$ ); the brassicasterol and BSi value performed well in the corrections and improvement for the accuracy of indication from fossil diatom. However, no significant correlations were found between dinoflagellate cysts and dinosterol values; and in a comparison, dinosterol displayed a better capability to indicate the biomass of dinoflagellate than cysts. A combination of using biological and chemical parameters can not only improve the accuracy of biomass indication but also provide the species composition for a better understanding of how algae response to changed environment.

**Key words:** fossil diatom; dinoflagellate cysts; sterol; biogenic silica; Sishili Bay