

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190314002

http://www.yykxjz.cn/

赵永松, 杨庶, 单秀娟, 金显仕, 孙耀. 山东半岛沿岸颗石藻化石的长期记录及其对东亚冬季风的响应. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 62-70

Zhao YS, Yang S, Shan XJ, Jin XS, Sun Y. Sedimentary record of coccolithophore assemblages in the coastal of Shandong Peninsula and their response to the East Asian winter monsoon. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 62-70

# 山东半岛沿岸颗石藻化石的长期记录 及其对东亚冬季风的响应

赵永松<sup>1,3</sup> 杨庶<sup>3</sup> 单秀娟<sup>2,3</sup> 金显仕<sup>2,3</sup> 孙耀<sup>2,3</sup>①

(1. 大连海洋大学水产与生命学院 大连 116023; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室  
海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071;  
3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室  
山东省渔业资源与生态环境重点实验室 青岛 266071)

**摘要** 本研究对南黄海西北部山东半岛沿岸的沉积柱 140 年的颗石藻(*Coccolithophores*)样品进行了种类组成和丰度分析。结果显示,共发现颗石藻 8 种,平均丰度为  $9.76 \times 10^6$  个/g,丰度范围为  $(5.07 \sim 14.21) \times 10^6$  个/g。其中,大洋桥石藻(*Gephyrocapsa oceanica*)和赫氏艾密里藻(*Emiliania huxleyi*)是丰度较高的主要物种,平均丰度分别为  $4.96 \times 10^6$ 、 $4.55 \times 10^6$  个/g。通过比较沉积记录与气候参数发现,颗石藻丰度的长期变化与东亚冬季风的替代指标海平面气压(SLP)有一定相关性,黄海沿岸流受季风影响,随着东亚冬季风的增强而加强,沿岸流带来了物质输入,为研究区域的颗石藻提供了丰富的营养盐,从而支撑了较高的颗石藻丰度。

**关键词** 颗石藻; 黄海沿岸流; 沉积物; 东亚冬季风

中图分类号 S932.7 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2019)05-0062-09

颗石藻(*Coccolithophores*)具有上亿年的进化史,是一种古老的海洋浮游植物(靳少非,2014)。如今生活在海洋中的颗石藻通常称为今生颗石藻(Living coccolithophore)(孙军,2007)。今生颗石藻具有独特的形态学特征,内部是细胞及有机质,外部包围着碳酸钙外壳(颗石粒)。今生颗石藻在海洋生态系统中进行光合作用的同时,又可进行钙化作用。在当今气候变暖 and 海洋酸化的背景下,研究今生颗石藻对 CO<sub>2</sub> 的

重效应具有重要意义(靳少非,2014)。关于今生颗石藻方面的研究,人们对化石颗石藻(Fossil coccolithophore)的古海洋学研究更为深入。当颗石藻死亡后,其体内的细胞部分腐烂分解,钙质外壳会随着水体或生物粪便杂质等自然下沉到海底并在泥层中保存下来,形成钙质超微化石,成为了上层水体环境和气候的记录者(曹奇原等,2002)。由于颗石藻对环境变化比较敏感(Boeckel *et al.*, 2006; 栾青杉等, 2013),

\* 国家重点基础研究发展计划(2015CB453303)、国家自然科学基金项目(31872692; 41606130)、山东省泰山学者专项基金项目和青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山人才培养计划(2017ASTCP-ES07)共同资助 [This work was supported by the National Basic Research Program of China (2015CB453303), National Natural Science Fund (31872692; 41606130), and the Special Funds for Taishan Scholars Project of Shandong Province and Aoshan Talents Cultivation Program Supported by Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2017ASTCP-ES07)]. 赵永松, E-mail: zhaoyongsong777@126.com

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

收稿日期: 2019-03-14, 收修改稿日期: 2019-04-17

不同物种喜好的海洋环境也不尽相同,可依据颗石藻化石的种群结构(如物种组成、丰度长期变化和时空分布等特征)反推古海洋环境、古气候变化。近年来,在东北太平洋和大西洋等海域的研究表明,气候变化可能是影响颗石藻化石长期变化的因素之一,二者具有一定的相关性。因此,在研究古海洋和古气候时,可以利用沉积物中的颗石藻化石作为相关的研究指标(Girardeau *et al.*, 2010; Saavedra-Pellitero *et al.*, 2011a,b; Schwab *et al.*, 2012)。

目前,有关颗石藻化石长期记录的研究表明,颗石藻化石的大尺度长期变化与气候变化紧密相关,如太平洋年代际涛动(PDO)、厄尔尼若现象(ENSO)和大西洋涛动(AO)等。目前,相关研究大部分集中在东北太平洋和大西洋海域,在西北太平洋近海陆架区的研究鲜有报道,尤其是对我国近海颗石藻化石大尺度的长期记录研究更为匮乏。近海陆架区受陆源物质、沿岸流、季风等因素影响,水文环境比较复杂,较深海区研究难度也更大。

季风的强度和季节性变化是影响陆架区海洋环境的重要因素,造成季风的主要原因是由于海洋和陆地的温度变化差异(陈隆勋等, 2007),区域性的季风同样也会对全球气候变化产生重要影响(徐建军等, 1997)。东亚地区在冬季出现的较强季风即为东亚冬季风,而我国黄海海域正好处在东亚冬季风区域。

除了季风,沿岸流同样是陆架区海域特有的现象。黄海沿岸流起源于渤海湾(冯士筌等, 1999; 苏纪兰, 2001),其路径走势大体与岸线相似且基本保持不变,但流量和速度会因风力作用或地区差异影响而不同。冬季时,影响黄海沿岸流强度的主要是冬季风和盐度差(苏纪兰等, 1995)。

本研究选取了南黄海靠近山东半岛沿岸的站位(N02),该站位位于黄海沿岸流流经区域,冬季时该区域东亚冬季风盛行。本研究对泥质沉积物中的颗石藻化石进行了种类鉴别和丰度统计,以弥补颗石藻化石在西北太平洋陆架区长期记录的不足,并可与环境气候变化进行对比,探讨其对应关系,期望对相关研究提供基础资料和理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 采样位置及方法

本研究位于南黄海西北部靠近山东半岛沿岸海域(122.65°E, 36.05°N),命名为 N02 (图 1),水深为 62 m。2011 年 4 月使用箱式采样器采集了泥质区的沉积柱

样品。沉积柱长度为 28 cm。

样品采集后,将沉积柱储存在约 4℃的环境中并带回实验室中切割。将沉积柱按 1 cm 的间隔切片来进行颗石藻化石的鉴定。

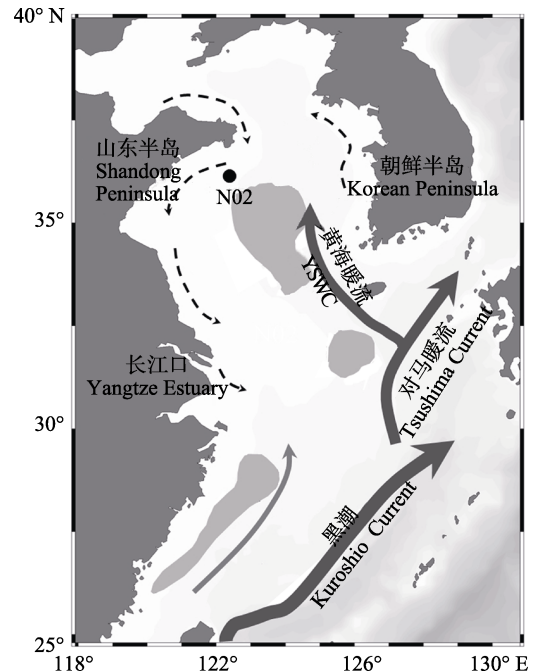


图 1 研究海域柱状沉积物样品采集站位

Fig.1 Sampling locations for sediment cores in the surveyed areas

### 1.2 样品预处理和颗石粒种类鉴别

样品的预处理过程即实验室制片的过程,制得的片子可以获得颗石藻化石的物种组成、绝对丰度和相对丰度数据。本研究按照 Andruleit (1996)、曹奇原 (2003)和 Saavedra-Pellitero 等(2011a,b)的方法制备沉积物样品。首先,称取 60~100 mg 干沉积物样品,将其悬浮在 pH 约为 9.0 的缓冲液中,并进行约 20 s 的超声处理以完全分解沉淀物。之后把悬浮液倒入 500 ml 容量瓶中,定容并摇晃均匀。从容量瓶中提取 20 ml 悬浮液,并在低压下通过 Millipore 过滤器(直径=47 mm,孔径=0.4 μm; Merck Millipore, 美国)过滤。将膜在约 40℃的烘箱中干燥 24 h。最后,从烘干的滤膜中央剪下一小块(约 1 cm<sup>2</sup>),放到载玻片上,用中性树胶封片,放置于通风处晾干,制成永久玻片。

制成的颗石藻化石装片是在光学偏光显微镜(Olympus CX31, 日本)下放大 1000 倍对随机选择的滤光片视域进行计数,每个颗石藻样品计数约 400 个以确保误差最小。分类鉴定依据 Frada 等(2010)的方法。绝对丰度的计算公式:

$$A = F \times a / (N \times S \times f \times W) \quad (1)$$

式中,  $A$  为颗石粒绝对丰度(个/g);  $F$  为过滤的有效面积( $\text{mm}^2$ );  $a$  为统计的颗石粒个数;  $N$  为统计的视域数;  $S$  为每个视域的面积( $\text{mm}^2$ ),  $f$  为分离系数(1/25);  $W$  为称取样品的干重(g)。

相对丰度计算公式:

$$P = (A_i/A) \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $A_i$  为样品中第  $i$  类颗石藻的绝对丰度;  $A$  为样品中颗石藻的总绝对丰度。

### 1.3 颗石粒溶解指数

为了估算沉积物中颗石粒的保存程度, 使用 Dittert 等 (1999) 提出的溶解指数 [细孔钙盘藻 (*Calcidiscus leptoporus*)–赫氏艾密里藻 (*Emiliania huxleyi*), CEX] 来衡量。

溶解指数计算公式:

$$\text{CEX} = \% E. huxleyi / (\% E. huxleyi + \% C. leptoporus) \quad (3)$$

### 1.4 测年方法

$^{210}\text{Pb}$  是研究海洋沉积速率的重要方法 (Koide *et al.*, 1972)。测定出沉积物样品不同深度的  $^{210}\text{Pb}$  的放射性活度, 可通过放射性活度计算出沉积速率。具体计算公式为:

$$D_R = \frac{H\lambda}{\ln \frac{I_0}{I_h}} \quad (4)$$

式中,  $D_R$  为沉积物的沉积速率,  $H$  为样品深度,  $\lambda$  为  $^{210}\text{Pb}$  的衰变常数,  $I_0$  为沉积物表层的  $^{210}\text{Pb}$  放射性活度,  $I_h$  为样品深度  $H$  处的  $^{210}\text{Pb}$  放射性活度。

### 1.5 数据分析方法和使用软件

采用 Analy Series 2.0 互相关分析软件对数据进行方析。互相关函数是用来表示 2 个时间序列在任意时刻的相关程度, 是信号分析里的一个概念。本研究采用互相关分析来简要说明气候参数和颗石藻化石丰度 2 个时间序列变化的相关程度。

### 1.6 气候参数

本研究探讨的东亚冬季风强度由海平面气压 (Sea Level Pressure, SLP) 来代表。SLP 的变化可以表明低层大气环流的变化, 是一项重要的海洋参数 (周鑫, 2016), 也是本研究东亚冬季风的替代指标。其中, SLP 数据下载网址为 [http://climexp.knmi.nl/select.cgi?id=someone@somewhere&field=hads\\_slp2r](http://climexp.knmi.nl/select.cgi?id=someone@somewhere&field=hads_slp2r)。

## 2 结果

### 2.1 测年结果与颗石粒保存程度

N02 站位通过  $^{210}\text{Pb}$  测年分析得到沉积速率为 0.19 cm/a, 1 cm 代表 5 年, 沉积柱长度为 28 cm, 计算得到岩心年龄为 140 年。

本研究中, 山东半岛沿岸 N02 站位的颗石粒保存程度即 CEX 最小值为 0.957, 平均值为 0.995, 结果见图 2。

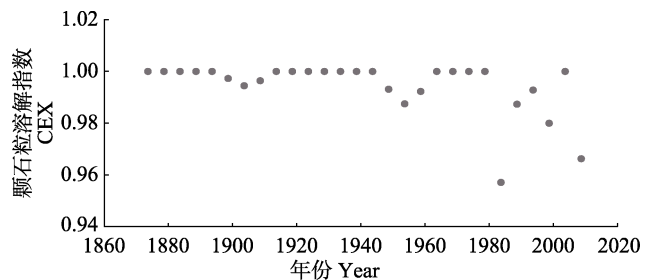


图 2 N02 站位沉积物中颗石粒保存程度

Fig.2 Preservation of coccolith in sediment at Station N02

### 2.2 颗石藻物种组成及丰度变化

**2.2.1 物种组成** 物种组成是群落结构的基本特征, 通过对 N02 站颗石粒样品的分析, 共发现 8 个物种, 分别为大洋桥石藻 (*Gephyrocapsa oceanica*)、赫氏艾密里藻、贝氏布拉藻 (*Braarudosphaera bigelowii*)、希布格脐球藻 (*Umbilicosphaera sibogae*)、细孔钙盘藻、美丽条结藻 (*Syracosphaera pulchra*)、地中海花冠球藻 (*Coronosphaera mediterranea*) 和卡特螺旋球藻 (*Helicosphaera carteri*), 各个物种丰度见表 1。从表 1 可以看出, 丰度最高的 2 个藻种为大洋桥石藻和赫氏艾密里藻, 占有藻含量的 95% 以上 (图 3), 该结果与黄海上层水体中的今生颗石藻群落特征基本一致 (孙军等, 2011)。

**2.2.2 绝对丰度年代际变化** N02 站的总颗石藻绝对丰度和 8 个物种的绝对丰度变化见图 4。从图 4 可以看出, 每一层总颗石粒的绝对丰度变化范围为  $(5.07 \sim 14.21) \times 10^6$  个/g, 平均丰度为  $9.76 \times 10^6$  个/g。8 个物种中平均丰度最高的是大洋桥石藻, 达到了  $4.96 \times 10^6$  个/g, 丰度范围为  $(2.38 \sim 7.20) \times 10^6$  个/g; 排名第 2 的赫氏艾密里藻的平均丰度为  $4.55 \times 10^6$  个/g, 丰度范围为  $(1.98 \sim 6.87) \times 10^6$  个/g。其余物种平均丰度均较低, 且有多层并未发现该物种。其中, 贝氏布拉藻平均丰度仅有  $0.16 \times 10^6$  个/g, 最大丰度为  $0.33 \times 10^6$  个/g; 希布格脐球藻平均丰度仅为  $0.04 \times 10^6$  个/g, 最大

表 1 N02 站位颗石藻绝对丰度  
Tab.1 Absolute abundance of the coccoliths in the sediment at Station N02

深度 Depth (cm)	颗石藻丰度( $\times 10^6$ 个/g) Absolute abundance of the coccoliths( $\times 10^6$ ind./g)							
	大洋桥石藻 <i>G. oceanica</i>	赫氏艾密里藻 <i>E. huxleyi</i>	贝氏布拉藻 <i>B. bigelowii</i>	希布格脐球藻 <i>U. sibogae</i>	细孔钙盘藻 <i>C. leptoporus</i>	美丽条结藻 <i>S. pulchra</i>	地中海花冠球藻 <i>C. mediterranea</i>	卡特螺旋球藻 <i>H. carteri</i>
0.5	4.71	3.26	ND	0.11	0.11	ND	0.11	ND
1.5	3.47	2.14	0.04	ND	ND	ND	ND	ND
2.5	3.15	1.98	ND	ND	0.04	ND	ND	ND
3.5	6.19	5.31	0.19	0.15	0.04	0.12	0.08	0.04
4.5	3.32	3.20	0.29	ND	0.04	ND	ND	ND
5.5	2.38	2.58	ND	0.08	0.12	ND	ND	ND
6.5	2.72	2.35	0.04	0.04	ND	ND	ND	ND
7.5	2.46	2.32	0.18	0.07	ND	0.04	ND	ND
8.5	5.88	5.11	0.17	0.15	ND	ND	ND	0.04
9.5	3.91	3.80	0.33	ND	ND	ND	ND	ND
10.5	4.99	4.94	0.24	0.08	0.04	ND	ND	ND
11.5	6.07	6.08	0.25	0.15	0.08	ND	ND	ND
12.5	5.52	5.56	0.19	0.08	0.04	ND	ND	ND
13.5	4.96	5.04	0.23	ND	ND	ND	ND	ND
14.5	5.31	5.12	0.27	ND	ND	ND	ND	ND
15.5	5.66	5.20	0.31	ND	ND	ND	ND	ND
16.5	5.77	5.59	0.23	0.02	ND	ND	ND	0.04
17.5	5.87	5.38	0.15	0.04	ND	ND	ND	0.08
18.5	5.15	4.82	0.13	0.02	ND	ND	0.02	0.04
19.5	4.42	3.65	0.12	ND	ND	ND	0.04	ND
20.5	5.61	5.19	0.13	ND	0.02	ND	0.02	ND
21.5	6.79	6.72	0.15	ND	0.04	ND	ND	ND
22.5	7.20	6.87	0.09	ND	0.02	0.02	ND	ND
23.5	7.04	6.76	0.04	ND	ND	0.04	ND	ND
24.5	4.62	4.49	0.11	ND	ND	0.04	ND	ND
25.5	5.46	5.03	0.19	ND	ND	0.04	ND	ND
26.5	5.59	5.17	0.33	ND	ND	0.04	ND	ND
27.5	4.72	3.85	0.08	ND	ND	0.04	ND	ND

ND: 未检出

ND: Not detected

丰度为  $0.15 \times 10^6$  个/g。细孔钙盘藻平均丰度仅为  $0.02 \times 10^6$  个/g, 最大丰度为  $0.12 \times 10^6$  个/g; 美丽条结藻的平均丰度仅为  $0.01 \times 10^6$  个/g, 最大丰度为  $0.12 \times 10^6$  个/g。剩余 2 个物种中, 海花冠球藻和卡特螺旋球藻的平均丰度均不超过  $0.01 \times 10^6$  个/g。大洋桥石藻和赫氏艾密里藻分布趋势都与总丰度的分布趋势相似(图 4), 从 1871 年开始, 颗石藻丰度逐渐有起伏的升高, 到 1898 年到达峰值时开始下降, 到 1913 年下降到 1871 年的水平, 之后保持稳定波动, 到 1968 年开始下降, 1973 年又逐渐上升, 1993 年达到峰值。贝氏布拉藻在 1920 年前的分布趋势与总丰度趋势相反, 1920 年后保持相似。

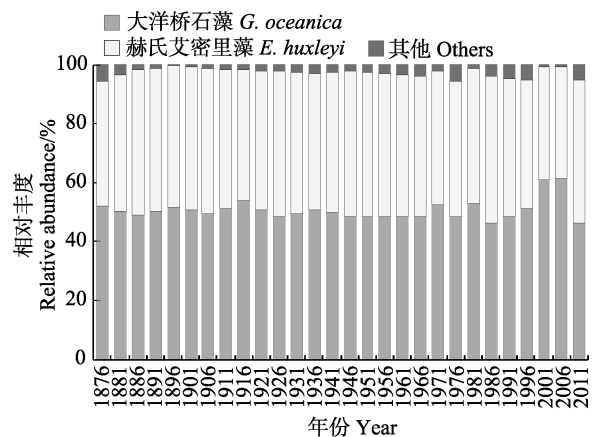


图 3 N02 站位颗石藻物种的变化

Fig.3 Variation in the coccolith assemblages at Station N02

**2.2.3 相对丰度年代际变化** N02 站位中,大洋桥石藻和赫氏艾密里藻相对丰度的平均值分别为 51.18%和 46.23%,二者十分接近,分布趋势呈相反趋势(图5),即一方增加而另一方减少,相对丰度范围

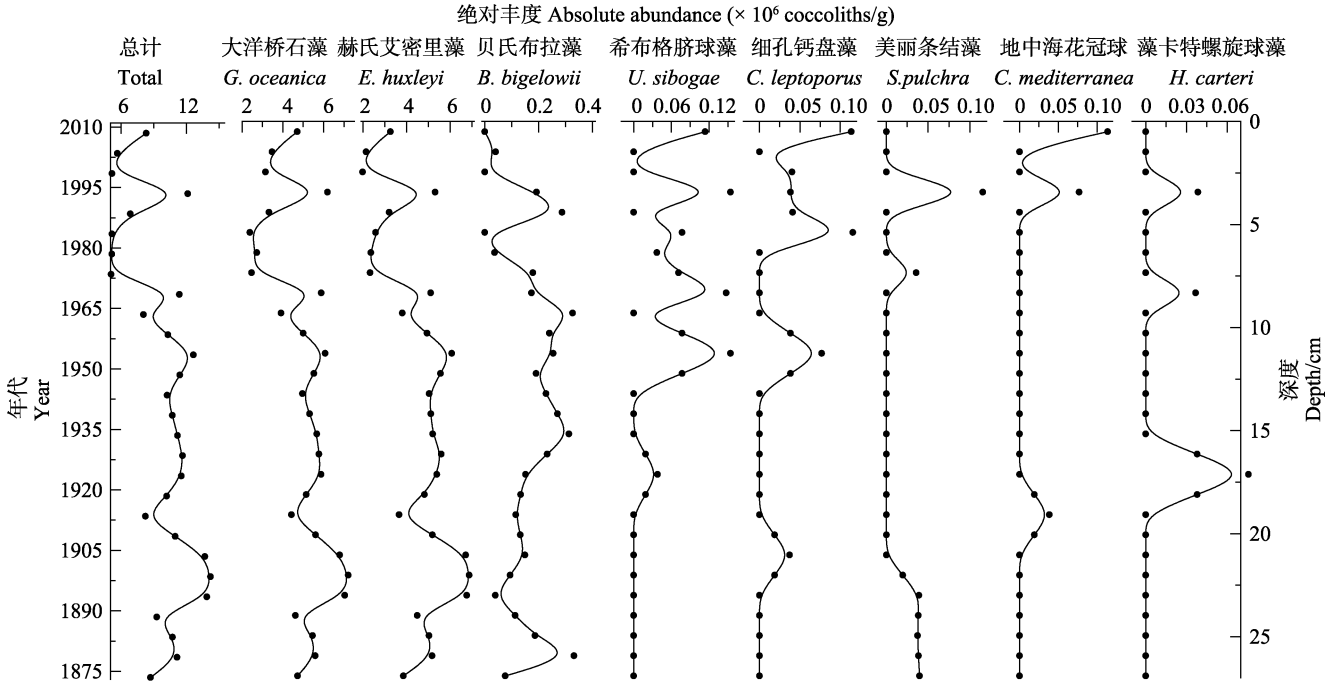


图4 N02 站位总颗石藻和物种排名前八的颗石藻的绝对丰度( $\times 10^6$  个/g)年代际变化

Fig.4 Interdecadal variations of absolute abundance ( $\times 10^6$  coccoliths/g) of total and the eight dominant coccolith species throughout Core N02

黑点表示原始数据, 曲线拟合用的数值分析法是 B-spline, 下同

Dots are the raw data of relative abundance and B-spline is used for curve-fitting, the same as below

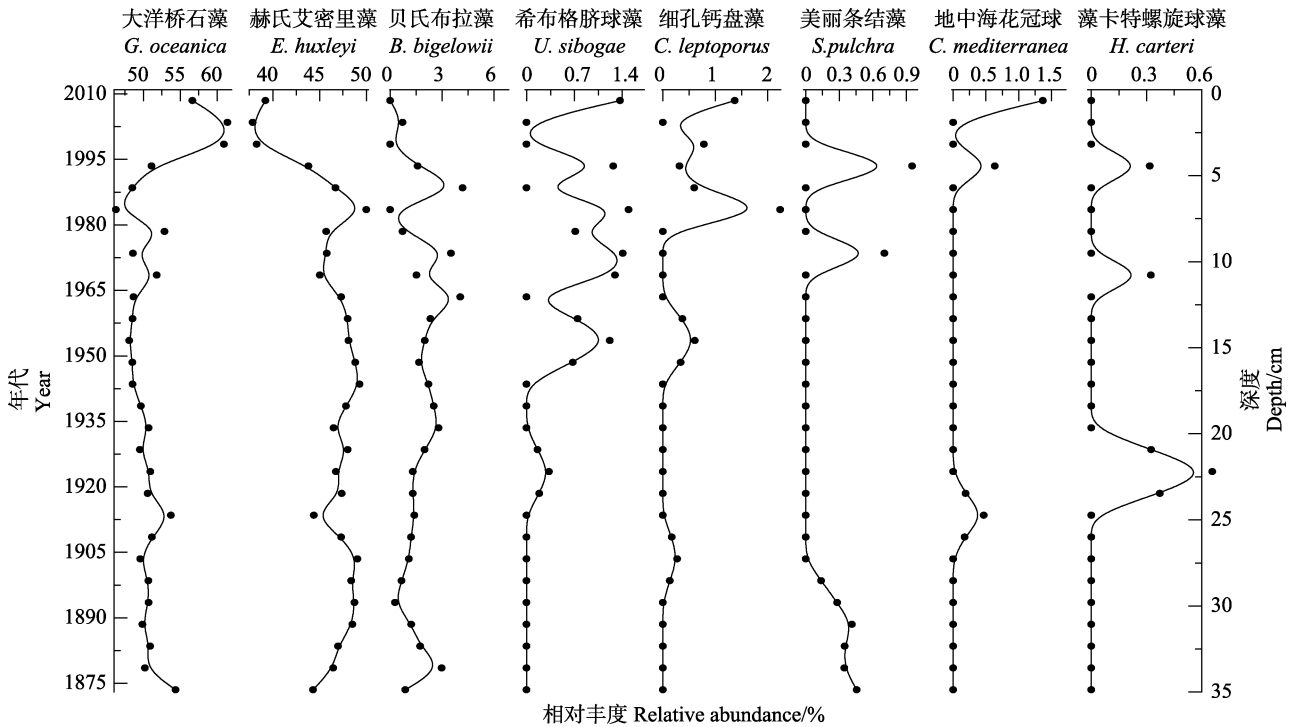


图5 N02 站物种排名前8的颗石藻相对丰度(%)年代际变化

Fig.5 Interdecadal variations of relative abundance (%) of the eight dominant coccolith species throughout Core N02

分别是 46.26%~61.43%和 37.86%~50.00% ;其次是贝氏布拉藻,最大相对丰度为 4.19%,平均值为 1.64%。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 颗石粒保存程度

颗石藻虽然可以长时间保存在沉积物中,并以此来研究古海洋、古气候,但其碳酸钙外壳受水体环境影响还是会有一定的溶解产生。颗石藻外壳(颗石粒)的溶解率对颗石藻群落有着重要影响,其保存程度也对解释颗石藻化石的长期变化有着重要意义。所以,颗石粒能否较好的保存下来是研究颗石藻化石时首先应该考虑的问题。首先,黄海泥质区百年来的沉积环境和物质输入都处于比较稳定的状态(李凤业等, 2002),这有利于颗石藻化石的沉积和保存。其次,可以通过计算 CEX 值来得到颗石藻化石的保存程度,颗石藻化石的 CEX 是用细孔钙盘藻和赫氏艾密里藻的比值来表示的,二者的比率会随着颗石粒溶解度的变化而发生变化。虽然,这样的 CEX 可能会受不同环境因素的影响,但 CEX 已被证实是相对可靠的(Boeckel *et al.*, 2006)。当  $CEX < 0.6$  时,说明颗石粒有较严重的溶解现象(Boeckel *et al.*, 2004)。N02 站位的 CEX 平均值为 0.995,最小值为 0.957。总体来说,N02 站位的颗石藻化石保存程度较为完好,可以用来实验。

#### 3.2 颗石藻物种组成及丰度变化

颗石藻的研究主要包含今生颗石藻和化石颗石藻。国外有关今生颗石藻的研究始于 20 世纪 60 年代对西北马尾海域颗石藻的研究(Marshall, 1966),从此陆陆续续展开了对其他大洋与海域的研究。我国近年来为化石颗石藻的研究提供了参考依据(孙军等, 2011)。N02 站位共发现 8 个物种,其物种组成与黄、东海今生颗石藻及表层沉积物的历史调查数据较为一致(程振波等, 1999; 孙军等, 2011; 栾青杉等, 2013)。其中,大洋桥石藻和赫氏艾密里藻和今生颗石藻类似,同为优势物种,占总丰度的 95%以上,二者的绝对丰度分布趋势与总丰度分布趋势一致并呈线性关系(图6)。大洋桥石藻喜欢营养丰富且受季风影响的边缘海(Houghton, 1993),N02 站位所处的位置正符合这一点。而赫氏艾密里藻是一种较为典型的广温广盐物种(Paasche, 2001),在大洋中均有分布,可能是由于黄海暖流对这一海域的影响。

颗石藻的绝对丰度能够表现出颗石藻的整体数

量及不同藻类的数量,而相对丰度则能反应不同种类藻体占整个群落的比重,二者结合更能全面地体现颗石藻的群落特征。总体来说,N02 站位绝对丰度排在前 2 位的依然是大洋桥石藻和赫氏艾密里藻,二者绝对丰度相似,但分布趋势呈相反趋势。这主要是二者均为颗石藻群落中的优势种,占群落数量 95%以上,二者在同一生存环境下可能存在竞争关系。

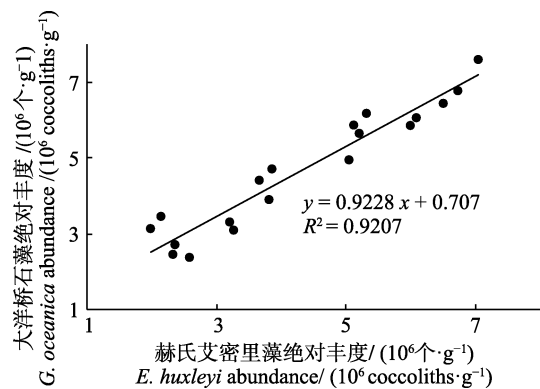


图 6 赫氏艾密里藻与大洋桥石藻丰度的相关分析

Fig.6 Correlation analysis of the abundance between *E. huxleyi* and *G. oceanica*

#### 3.3 颗石藻丰度与东亚冬季风关系

黄海是我国一个典型的半封闭陆架海,北邻辽东半岛,北黄海与渤海相连,南黄海与东海相连,西部是朝鲜半岛,地势相对平坦。由于其特殊的地理特征,黄海受陆源物质的影响较大,并且黄海具有黄海暖流、黄海沿岸流和黄海冷水团构成的复杂环流系统,所以,其沉积环境较为复杂(石学法等, 2001)。同样复杂的环流系统也为颗石藻提供了独特的生长栖息环境。而黄海的环流尤其是沿岸流会受到季风等气候条件的影响,东亚冬季风驱动的黄海暖流和沿岸流是产生黄海环流的重要原因(Yuan *et al.*, 2008),已有研究表明,气候条件同样是影响颗石藻的关键因素。N02 站位恰好处在南黄海西北部黄海沿岸流流经区域,受东亚冬季风影响。

D'Arrigo 等(2005)、Wu 等(2002)研究表明,东亚冬季风的强度与海平面气压的强度有很好的相关性,因此,可以用 SLP 的强度来作为东亚冬季风强弱的指标。SLP 指的是 1 cm<sup>2</sup> 面积上从海平面到大气上界空气柱的重量(宋超辉, 1984),气压变化存在明显的季节变化和周期性变化,是重要的海洋环境参数(薄文波等, 2012)。从图 7a 可以看出,阴影表示颗石藻绝对丰度较高值;从图 7b 可以看出,阴影表示海平面气压处

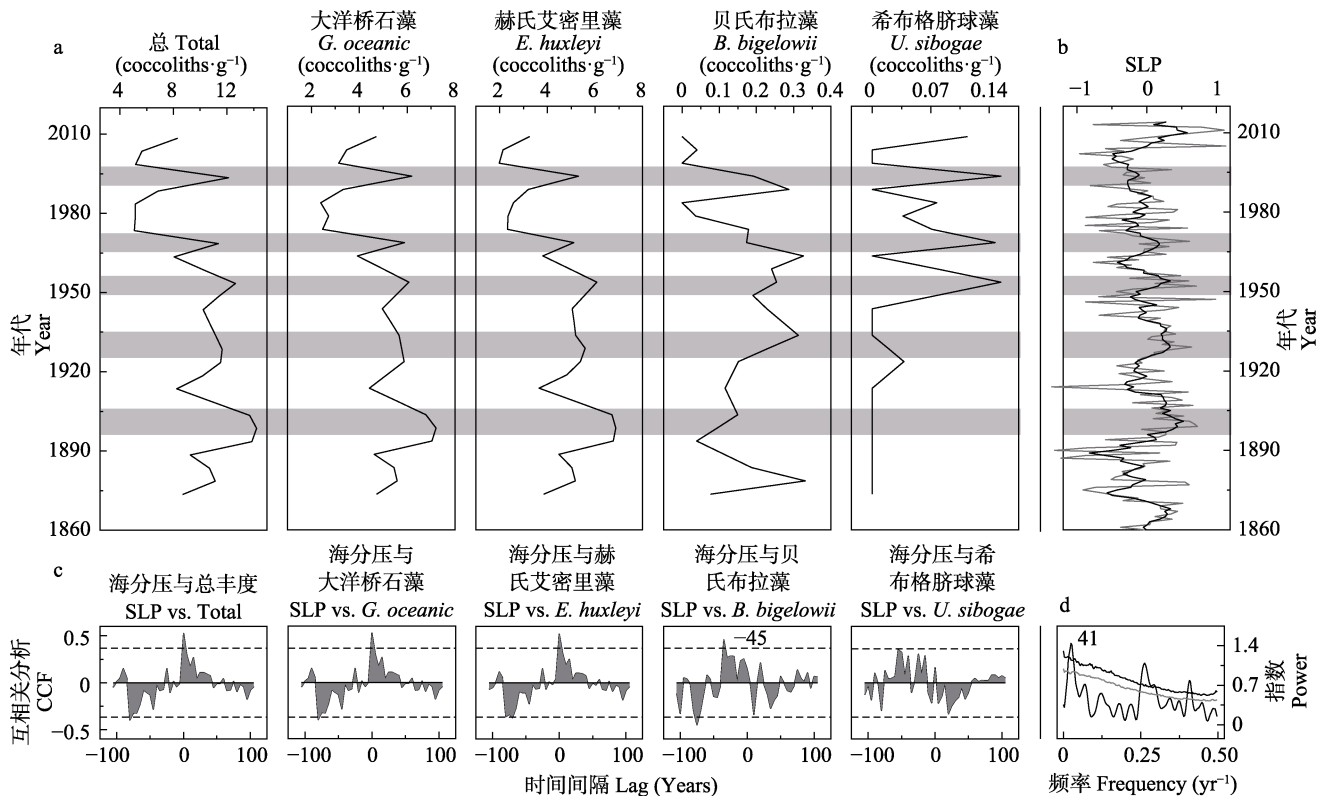


图7 N02 站位颗石藻化石丰度( $\times 10^6$  个/g)与海平面气压(SLP)之间变化的比较

Fig.7 Comparison of coccolith abundance ( $\times 10^6$  coccoliths/g) and sea level pressure (SLP) at N02 Station

a: 颗石藻化石总丰度及主要藻种丰度的长期变化 (阴影表示丰度高值期); b: 海平面气压(SLP)变化趋势(阴影表示海平面气压指数高值期); c: 海平面气压与颗石粒藻化石丰度的互相关分析(虚线表示 95%显著水平); d: 海平面气压指数谱分析(深灰色实线表示 90%置信区间, 浅灰色实线 80%置信区间)

a: The total abundance of the coccolith and the long-term trend of the abundance of the four dominant species (Shadow indicates a high abundance period); b: The trend of sea level pressure (SLP) (Shadow indicates the high value period of sea level pressure index); c: Cross-correlation analysis of sea level pressure and coccolith abundance (Dashed line indicates 95% significant level); d: Sea level pressure index spectrum analysis (Dark gray solid line indicates 90% confidence interval, light gray solid line 80% confidence interval)

在正相及东亚冬季风较强, N02 站位颗石藻绝对丰度的长期变化与 SLP 及东亚冬季风强度有一定的相关性, 东亚冬季风较强时, 颗石藻丰度也较高。互相关性分析也显示, 海平面气压和颗石藻的绝对丰度在 41~45 年的周期性信号是最为明显的, 这说明沉积物中颗石粒的绝对丰度与海平面气压具有较好的正相关性, 也是东亚冬季风的强弱影响着颗石藻丰度的长期变化, 二者息息相关。

本研究表明, 由于 N02 站位于黄海沿岸流流经区域, 而东亚冬季风直接影响着黄海沿岸流的强弱, 黄海沿岸流会伴随着东亚冬季风而增强(Yuan *et al.*, 2008)。当冬季到来时, 南黄海西部受强烈季风的影响, 黄海沿岸流的流速和流幅加强, 所带来的物质输入及交换造成了南黄海西部近岸海域主要营养盐升高(韦钦胜等, 2011), 为颗石藻的生长繁殖提供了良好的营养盐环境, 从而导致了较高的颗石藻丰度。

## 4 结论

本研究对山东半岛沿岸黄海沿岸流流经区域内沉积柱中的颗石藻化石进行了种类鉴别和丰度分析, 共鉴定出 8 个物种, 物种组成类似于该海域以往调查的今生颗石藻物种, 沉积记录与 1870~2011 年间气候变化的对比发现, 颗石藻丰度的年代际变化与东亚冬季风的替代指标 SLP 有关, 而东亚冬季风可以影响黄海沿岸流的强弱, 所以, 东亚冬季风和黄海沿岸流可能是影响颗石藻种群的关键环境因素。

## 参 考 文 献

- Andruleit H. A filtration technique for quantitative studies of coccoliths. *Micropaleontology*, 1996, 42(4): 403-406
- Bo WB, Wu BQ. Change characteristics of sea-level pressure in our offshore area. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2012, 29(3): 9-13 [薄文波, 吴宝勤. 我国近

- 邻海域海平面气压变化特征分析. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(3): 9-13]
- Boeckel B, Baumann KH, Henrich R, *et al.* Coccolith distribution patterns in South Atlantic and Southern ocean surface sediments in relation to environmental gradients. Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers, 2006, 53(6): 1073-1099
- Boeckel B, Baumann KH. Distribution of coccoliths in surface sediments of the south-eastern South Atlantic Ocean: Ecology, preservation and carbonate contribution. Marine Micropaleontology, 2004, 51(3): 301-320
- Cao QY, Cang SX, Li TG, *et al.* Distribution of calcareous nanofossils in surface sediment of the northern okinawa trough and their environmental characteristics. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(6): 600-607 [曹奇原, 苍树溪, 李铁刚, 等. 冲绳海槽北部表层沉积物中的钙质超微化石及其环境特征. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 600-607]
- Cao QY. Techniques for quantitative nanofossil studies. Marine Science, 2003, 27(3): 1-3 [曹奇原. 钙质超微化石定量研究方法. 海洋科学, 2003, 27(3): 1-3]
- Chen LX, Zhang B, Zhang Y. Progress in research on the East Asian monsoon. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 711-724 [陈隆勋, 张博, 张瑛. 东亚季风研究的进展. 应用气象学报, 2006, 17(6): 711-724]
- Cheng ZB, Shi XF. The analysis of the sedimentary character of the microfossils and the material resource in the surface sediments from the South Yellow Sea. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(S1): 775-781 [程振波, 石学法. 南黄海表层沉积物中微体化石的沉积特点及物源分析. 沉积学报, 1999, 17(S1): 775-781]
- D'Arrigo R, Jacoby G, Wilson R, *et al.* A reconstructed Siberian High index since AD 1599 from Eurasian and North American tree rings. Geophysical Research Letters, 2005, 32(5): L05705
- Dittert N, Baumann KH, Bickert T, *et al.* Carbonate dissolution in the deep-sea: Methods, quantification and paleoceanographic application. Use of Proxies in Paleoceanography, 1999, 255-284
- Feng SZ, Li FQ, Li SJ. Introduction to marine science. Beijing: Higher Education Press, 1999 [冯士筌, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1999]
- Frada M, Young J, Cachão M, *et al.* A guide to extant coccolithophores (Calcihaptophycidae, Haptophyta) using light microscopy. Journal of Nannoplankton Research, 2010, 31(2): 58-112
- Giraudeau J, Grelaud M, Solignac S, *et al.* Millennial-scale variability in Atlantic water advection to the Nordic Seas derived from Holocene coccolith concentration records. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(9-10): 1276-1287
- Houghton SD. Recent coccolith sedimentation patterns and transport in the North sea: Implications for palaeoceanographic studies of marginal and continental shelf seas. Applied Micropalaeontology, 1993, 1-39
- Jin SF. The elves in the ocean—Coccolith. Fossil, 2014(01): 29-31 [靳少非. 海洋中的精灵海灵—颗石藻. 化石, 2014(01): 29-31]
- Koide M, Soutar A, Goldberg ED. Marine geochronology with Pb-210. Earth and Planetary Science Letters, 1972, 14(3): 442-446
- Li FY, Gao S, Jia JJ, *et al.* Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bohai and Yellow Seas. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(4): 364-369 [李凤业, 高抒, 贾建军, 等. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 364-369]
- Luan QS, Sun JQ, Zuo T, *et al.* Coccolithophores in the shelf waters of East China Sea. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(3): 1-11 [栾青杉, 孙坚强, 左涛, 等. 东海陆架区的颗石藻. 渔业科学进展, 2013, 34(3): 1-11]
- Marshall HG. Observations on the vertical distribution of Coccolithophores in the Northwestern Sargasso Sea. Limnology and Oceanography, 1966, 11(3): 432-435
- Paasche E. A review of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae), with particular reference to growth, coccolith formation, and calcification-photosynthesis interactions. Phycologia, 2001, 40(6): 503-529
- Saavedra-Pellitero M, Flores J, Baumann K, *et al.* Comparison of different preparation and analysis techniques for quantitative coccolith studies focusing on biogeographic patterns of species. Micropaleontology, 2011a, 57(2): 139-161
- Saavedra-Pellitero M, Flores J, Lamy F, *et al.* Coccolithophore estimates of paleotemperature and paleoproductivity changes in the southeast Pacific over the past ~27 kyr. Paleoceanography, 2011b, 26(1): 1201-1216
- Schwab C, Kinkel H, Weinelt M, *et al.* Coccolithophore paleoproductivity and ecology response to deglacial and Holocene changes in the Azores Current System. Paleoceanography, 2012, 27(3): 3210-3227
- Shi XF, Shen SX, Chen ZH, *et al.* Modern sedimentary environment and dynamic sedimentary system in the South Yellow Sea. Chinese Science Bulletin, 2001(S1): 1-6 [石学法, 申顺喜, 陈志华, 等. 南黄海现代沉积环境及动力沉积体系. 科学通报, 2001(S1): 1-6]
- Song CH. A convenient way to calculate the mean sea level pressure. Meteorological Monthly, 1984(11): 29-30 [宋超辉. 计算平均海平面气压的简便方法. 气象, 1984(11): 29-30]
- Su JL, Huang DJ. On the current field associated with the Yellow Sea Water Mass. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(5): 1-7 [苏纪兰, 黄大吉. 黄海冷水团的环流结构. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 1-7]
- Su JL. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(4): 1-16 [苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究. 海洋学报, 2001, 23(4): 1-16]
- Sun J, Jin SF. Species diversity of living coccolithophores in Chinese sea waters. Biodiversity Science, 2011, 19(6): 787-797 [孙军, 靳少非. 中国近海今生颗石藻物种多样性初步研究. 生物多样性, 2011, 19(6): 787-797]
- Sun J. Organic carbon pump and carbonate counter pump of living coccolithophorid. Advances in Earth Science, 2007, 22(12): 1231-1239 [孙军. 今生颗石藻的有机碳泵和碳酸盐反向泵. 地球科学进展, 2007, 22(12): 1231-1239]
- Wei QS, Zang JY, Wei XH *et al.* The distribution of nutrients and the relationship of them with the circulation condition in the western southern Huanghai Sea in autumn. Acta Oceanologica



- Sinica, 2011, 33(1): 74–82 [韦钦胜, 臧家业, 魏修华, 等. 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, 2011, 33(1): 74–82]
- Wu BY, Wang J. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 1–4
- Xu JJ, Zhu QG, Shi N. The singular spectral analysis of periodic oscillation in long-term variation of East–Asian Monsoon in recent century. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(5): 620–627 [徐建军, 朱乾根, 施能. 近百年东亚季风长期变化中主周期振荡的奇异谱分析. 气象学报, 1997, 55(5): 620–627]
- Yuan DL, Zhu JR, Li CY, *et al.* Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1–2): 134–149
- Zhang J, Li JR, Tao YJ, *et al.* Coccolithophores and their characteristic. *Ecologic Science*, 2017, 36(4): 217–225, 243 [张健, 李佳芮, 陶以军, 等. 颗石藻类群及其生态功能介绍. 生态科学, 2017, 36(4): 217–225, 243]
- Zhou X. Quasi-two-year oscillation of sea level pressure in East Asia. *Technology Wind*, 2016(11): 194–195 [周鑫. 东亚地区海平面气压准两年振荡研究. 科技风, 2016(11): 194–195]

(编辑 陈 严)

## Sedimentary Record of *Coccolithophore* Assemblages in the Coastal of Shandong Peninsula and Their Response to the East Asian Winter Monsoon

ZHAO Yongsong<sup>1,3</sup>, YANG Shu<sup>3</sup>, SHAN Xiujuan<sup>2,3</sup>, JIN Xianshi<sup>2,3</sup>, SUN Yao<sup>2,3①</sup>

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Dalian Ocean University, Dalian 116023; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-Environment, Qingdao 266071)

**Abstract** Coccolithophores, as important primary producers in the marine ecosystem, respond sensitively to changes in environmental conditions. When coccolithophores die, the calcified plates (Coccoliths) that they secrete can reflect environmental changes. Hence, coccoliths are important indicators for studying paleoenvironmental and paleoclimatic changes. However, most studies on coccolithophore sediments have been conducted in the Atlantic and the Northeast Pacific Oceans; studies on the continental shelf in the Northwest Pacific are rarely reported. This study aims to address this shortage of long-term records for coccolithophores in the Yellow Sea. The results from these experiments can be compared with climatic changes to explore the corresponding relationship. The results will also provide fundamental data and a theoretical basis for related research. In this study, the coccolith fossils from one box core taken from a sampling position (Station N02) on the coast of the Shandong Peninsula, China, in the northwestern part of the South Yellow Sea, were used for the research. Species identification and abundance statistics were carried out and obtained for the coccolith fossils in the sediment, which scaled 140 years. Eight species of coccolithophore were found. The absolute abundance of coccoliths from the N02 Station core ranged from  $5.07 \times 10^6$  to  $14.21 \times 10^6$  coccoliths/g, with an average value of  $9.76 \times 10^6$  coccoliths/g. *Gephyrocapsa oceanica* and *Emiliania huxleyi* were the two species with the highest abundance. By comparing the sediment record with the climatic data from the station, a correlation with the sea level pressure was observed. Sea level pressure can be used as an indicator for the East Asian winter monsoon. The analysis showed that when the East Asian winter monsoon was strong, the coastal currents of the Yellow Sea provided a good nutrient-salt environment for the coccolithophores at the N02 Station, resulting in a high abundance of coccoliths.

**Key words** Coccolith; Yellow Sea; Sediment; East Asian winter monsoon

① Corresponding author: SUN Yao, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn