

北黄海中部及四十里湾海域甲藻孢囊种类多样性研究

邵红兵^{1,2}, 石雅君¹, 刘东艳¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 中国科学院和山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 从 2008 年至 2011 年, 采集了北黄海和烟台四十里湾海域共 49 个站点的表层沉积物的样品, 并对沉积物中的甲藻孢囊进行鉴定。研究发现 41 种孢囊, 隶属于 16 属: 其中, 原多甲藻 (*Protoperdinium* sp.) 孢囊 *Brigantedinium asymmetricum* Matsuoka 为中国海域新记录种。塔马/链状亚历山大藻 *Alexandrium tamarense* / *catenella*、微小/相似亚历山大藻 *Alexandrium minutum* / *affine*、网状原角管藻 *Protoceratium reticulatum* 和膝沟藻 *Gonyaulax* spp. 的孢囊是北黄海中部海域孢囊优势种; 膝沟藻 *Gonyaulax* sp. (*Spiniferites bentori* var. *truncata*)、具刺膝沟藻 *Gonyaulax spinifera* (*Spiniferites hyperacanthus*) 和网状原角管藻 *P. reticulatum* 的孢囊在烟台四十里湾占优势。另外, 研究中还发现 3 种产虾夷扇贝毒素 (YTX) 甲藻 (具刺膝沟藻 *G. spinifera*、多边舌甲藻 *Lingulodinium polyedra* 和网状原角管藻 *P. reticulatum*) 的孢囊, 在芝罘岛到北黄海中部海域都有较高丰度的分布, 另 3 种产麻痹性贝类毒素 (PSP) 甲藻 (塔马/链状亚历山大藻 *A. tamarense* / *catenella*、微小/相似亚历山大藻 *A. minutum* / *affine* 和链状裸甲藻 *Gymnodinium catenatum*) 的孢囊, 在北黄海中部丰度很高。因此, 应加强这些海域的甲藻孢囊监测和研究, 预防有毒甲藻赤潮的爆发。最后, 通过对比分析北黄海中部及烟台四十里湾这两个海域甲藻孢囊分布特征和环境特征的差异, 进一步证明了人类活动对近岸海洋生态环境的影响。

关键词: 甲藻孢囊; 四十里湾; 北黄海; 表层沉积物; 赤潮

中图分类号: Q914.82

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932 (2012) 05-0557-09

Study on species diversity of dinoflagellate cysts in the central of north Yellow Sea and Sishili Bay

SHAO Hong-bing^{1,2}, SHI Ya-jun¹, LIU Dong-yan¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Yantai 264003, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: During years of 2008 to 2011, 49 surface sediment samples were collected in the Sishili Bay of Yantai and in the central of north Yellow Sea. The identification of dinoflagellate cysts in the collected samples was undertaken. In this research, 41 dinoflagellate cyst taxa of 16 genera were identified, in which *Brigantedinium asymmetricum* Matsuoka (*Protoperdinium* sp.) was the newly recorded species in the sea area of China. *Spiniferites bentori* var. *truncata*, *Spiniferites hyperacanthus* and *Operculodinium centrocarpum* were the dominant cyst taxa in Sishili Bay, while cysts of *Alexandrium tamarense* / *catenella*, *Alexandrium minutum* / *affine*, *Protoceratium reticulatum* and *Gonyaulax* spp. were dominant in the central northern Yellow Sea. Moreover, three toxic dinoflagellate cysts were found highly abundant from Zhifu Island to the central of north Yellow Sea, namely, *Gonyaulax spinifera*, *Lingulodinium polyedrum* and *P. reticulatum*, which produced Yessotoxin (YTX). And also, in the central of north Yellow Sea, there were other three toxic cysts (*A. tamarense* / *catenella*, *A. minutum* / *affine* and *Gymnodinium catenatum*) with high cyst abundances, secreting paralytic shellfish poison (PSP). Therefore, it demanded more monitoring and research of dinoflagellate cysts in these areas, to prevent the bloom of toxic dinoflagellates. Besides, it was further proved that human activities had impacted

收稿日期: 2011-10-26; 修订日期: 2012-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(40976097) / 中科院知识创新工程(KZCX2-YW-Q07-04) / 中国科学院研究生科技创新项目。

作者简介: 邵红兵 (1987-), 男, 硕士, 主要从事海藻生态学研究。电子邮箱: hongbingshao@yic.ac.cn。

通讯作者: 刘东艳, 研究员。电子邮箱: dyliu@yic.ac.cn。

the coastal eco-system, by the analysis and comparison in terms of dinoflagellate cyst distribution and the environmental characteristics in two areas, including the Sishili Bay and the central of north Yellow Sea.

Keywords : dinoflagellate cyst; Sishili Bay; northern Yellow Sea; surface sediments; red tide

甲藻孢囊是指单细胞浮游甲藻形成的失去鞭毛和游泳能力的不动细胞(王朝晖, 2007)。目前, 已知约有 200 多种甲藻能够产生孢囊, 大多数孢囊具有含孢粉类似物的抗性细胞壁, 可以长期保存在底部沉积物中(Matsuoka and Fukuyo, 2000)。因此, 研究沉积物中甲藻孢囊种类可以有助于进一步研究甲藻的群落结构(Anderson et al, 2003; McMinn et al, 2010)。此外, 在环境条件不适合浮游细胞生长的情况下, 某些赤潮甲藻可以形成孢囊并沉降到海底; 一旦环境条件适宜, 孢囊即大量萌发形成浮游细胞, 从而诱发赤潮的形成。特别是有毒有害的甲藻赤潮种类, 例如塔玛亚历山大藻 *Alexandrium tamarense* (Fauchot et al, 2008)、巴哈马遁甲藻 *Pyrodinium bahamense* (Azanza et al, 2004) 和锥状斯氏藻 *Scrippsiella trochoidea* (Wang et al, 2007) 等。因此, 普遍认为孢囊是引发赤潮的“种源”。

北黄海是山东半岛、辽东半岛和朝鲜半岛之间的半封闭海域, 全部为大陆架所占的浅海(杜秀宁等, 2009), 代表了北温带海洋生态环境的一种重要类型(高爽等, 2009); 烟台四十里湾海域是我国北方一个重要的浅海养殖区域, 为一耳状半封闭式海湾, 是典型的温带性海湾(周毅等, 2002)。近年来, 北黄海区域甲藻赤潮爆发频繁(山东省海洋与渔业厅, 2006-2011; 宋秀凯等, 2009; 喻龙等, 2009), 而北黄海海域甲藻孢囊的研究很少(Wang et al, 2004a; Liu et al, 2012; 邵魁双等, 2011; 石雅君等, 2011; 魏洪祥等, 2011)。因此, 有必要对该海区的甲藻孢囊进行详尽的研究。本文在以往工作基础上, 系统全面的研究了北黄海海域及烟台四十里湾海域甲藻孢囊的种类和形态学特征及空间分布特征, 这对了解该海区的甲藻群落结构有一定的意义, 也为预防该海域甲藻赤潮的发生提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 采样海区及样品的采集

研究区域选在北黄海中部海域及其南部的烟台

四十里湾。北黄海中部海域调查区设在 37°42′-39°24′N, 120°57′-123°11′E 海域。2009 年至 2011 年在中科院海洋研究所的黄海开放航次和国家基金委黄渤海开放航次中, 采集了 27 个站点的表层沉积物样品(图 1a)。烟台四十里湾调查区在 37°27′-37°39′N, 121°20′~121°34′E 海域。根据调查目的和任务, 共设 22 个采样站位, 于 2008 年 9 月采集了 22 个站点的表层沉积物样品(图 1b)。

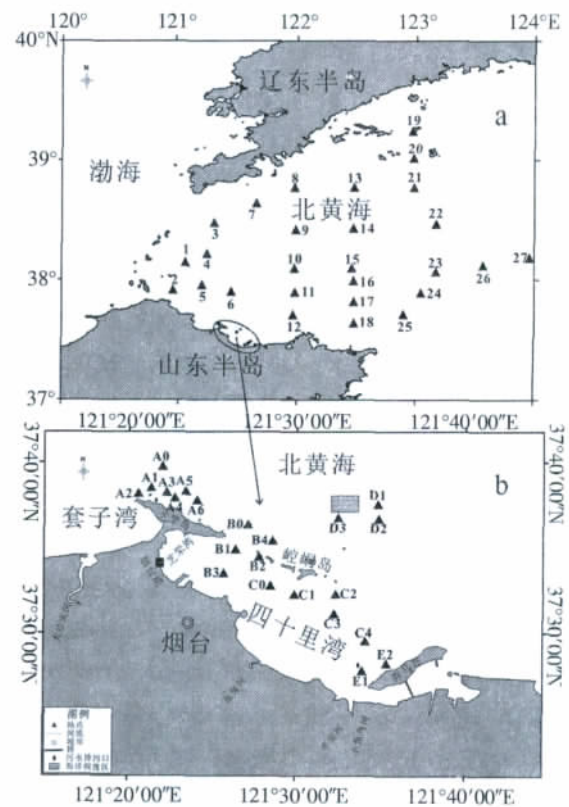


图 1 北黄海 (a) 和烟台四十里湾海域 (b) 表层沉积物的采样站位图

表层沉积物用箱式采泥器 (0.05 m²) 采集。在每个站点, 用直径为 5 cm 的透明塑料管从箱式采泥器中未受扰动的区域采集 0-5 cm 的沉积物样品。样品采集后保存在冰盒中带回实验室, 最终保存在 4 °C 冰箱中; 样品避光运输和保存, 以避免孢囊萌发。

1.2 样品的处理与分析

所有样品分成 2 份, 1 份进行网筛过滤法, 即通过 125 μm 和 15 μm 不锈钢网筛, 收集两者

之间的部分并转移至离心管中，定容至 3 mL (王朝晖, 2007)。另一份则进行孢粉学处理，也就是加入盐酸 (10%) 和氢氟酸 (40%)，除去钙质和硅质；脱酸后，用超声波处理 30 s，然后通过 125 μm 和 15 μm 不锈钢网筛，收集两者之间的部分并转移至离心管中，定容至 3 mL (Matsuoka et al., 2000)。

甲藻孢囊分析鉴定时，吸取 0.02~0.10 mL 已处理样品至浮游植物计数框 (HYDRO-BIOS, Germany) 中并加入适量的蒸馏水稀释，然后在 400 倍倒置显微镜 (Olympus IX81) 下进行种类鉴定、计数并拍照，同时使用软件 DP2-BSW (Olympus) 测量甲藻孢囊各种形态特征的大小。

本文主要依据 Matsuoka 等 (2000) 和王朝晖 (2007) 的分类标准来鉴定甲藻孢囊，当甲藻孢囊无法鉴定到种类时，以属来表示。用于孢囊分类的形态特征包括孢囊的形状和大小、孢囊壁结构和颜色、表面修饰物、孢囊内含物以及萌发孔类型。

甲藻孢囊物种优势度使用 Berger-Parker 指数表示 (Berger et al., 1970)。使用软件 SPSS11.5 进行统计分析，北黄海和烟台四十里湾数据使用 One-way ANOVA 进行比较。

2 结果

2.1 甲藻孢囊的种类组成

在北黄海和烟台四十里湾的沉积物样品中共鉴定出 41 种甲藻孢囊 (隶属 16 属)，含 3 种未定种，其中在烟台四十里湾 22 个站点共计发现 38 种甲藻孢囊，含 3 种未定种；在北黄海海域 27 个站点共发现 31 种甲藻孢囊，含 2 种未定种 (见表 1)。两海域共有 28 种相同的甲藻孢囊，而有 3 种仅在北黄海出现，有 10 种仅在烟台四十里湾出现 (见表 1)。38 种已确定种类的孢囊中自养型甲藻孢囊和异养型甲藻孢囊分别为 18 种和 20 种 (见表 1)。其中有 15 种膝沟藻类 (Gonyaulacoid group)、1 种 Tuberculodinioid 类 (Tuberculodinioid group)、1 种钙质类 (Calcoidinellid group)、2 种裸甲藻类 (Gymnodinioid group)、19 种原多甲藻类 (Protoperidinioid group) (表 1)。北黄海海域甲藻孢囊优势种主要是膝沟藻类的亚历山大藻孢囊 *Alexandrium* spp.、膝沟藻孢囊 *Spiniferites* spp. 和网状原角管藻孢囊 *Operculodinium centrocarpum*；烟台四十里湾海域甲藻孢囊优势种则主要有膝沟藻类的膝沟藻孢囊 *Spiniferites bentori* var. *truncata*、网状原角管

表 1 北黄海和烟台四十里湾孢囊丰度 (cysts/g DW) 和优势度

中文名	藻类学学名	孢粉学名称	北黄海			烟台四十里湾		
			丰度范围	丰度平均值	优势度	丰度范围	丰度平均值	优势度
自养型		Autotrophs						
膝沟藻类		Gonyaulacoid group						
塔马/链状亚历山大藻	<i>Alexandrium catenella / tamarensis</i>		29~5 605	785	0.325	0~14	4	0.008
微小/相似亚历山大藻	<i>Alexandrium minutum / affine</i>		5~1 397	308	0.108	2~39	16	0.050
长膝沟藻	<i>Gonyaulax elongata</i>	<i>Spiniferites elongatus</i>	0~26	3	0.000	0~22	2	0.000
膜状膝沟藻	<i>Gonyaulax membranacea</i>	<i>Spiniferites membranaceus</i>	0~6	0	0.000			
斯氏膝沟藻	<i>Gonyaulax scrippsae</i>	<i>Spiniferites bulloideus</i>	0~72	8	0.002	0~20	4	0.005
具刺膝沟藻	<i>Gonyaulax spinifera</i>	<i>Spiniferites hyperacanthus</i>	0~56	9	0.003	0~89	36	0.087
具刺膝沟藻	<i>Gonyaulax spinifera</i>	<i>Spiniferites mirabilis</i>				0~30	7	0.018
具刺膝沟藻	<i>Gonyaulax spinifera</i>	<i>Spiniferites ramosus</i>	0~26	3	0.000	2~49	10	0.000
膝沟藻	<i>Gonyaulax</i> sp.	<i>Spiniferites bentori</i> var. <i>truncata</i>	0~76	13	0.001	1~187	74	0.200
膝沟藻	<i>Gonyaulax</i> sp.	<i>Spiniferites</i> sp. cf. <i>bentori</i>	0~15	3	0.000	0~24	4	0.009
膝沟藻	<i>Gonyaulax</i> sp.	<i>Spiniferites delicatus</i>				0~21	5	0.006
膝沟藻	<i>Gonyaulax</i> sp.	<i>Spiniferites</i> sp. cf. <i>delicatus</i>	0~41	7	0.001	0~30	14	0.042
膝沟藻	<i>Gonyaulax</i> spp.	<i>Spiniferites</i> spp.	92~1 587	398	0.197	2~148	32	0.083
多边舌甲藻	<i>Lingulodinium polyedrum</i>	<i>Lingulodinium machaerophorum</i>	0~61	8	0.002	0~27	2	0.001

续表

中文名	藻类学学名	孢粉学名称	北黄海			烟台四十里湾		
			丰度范围	丰度平均值	优势度	丰度范围	丰度平均值	优势度
网状原角管藻	<i>Protoceratium reticulatum</i>	<i>Operculodinium centrocarpum</i>	44~1947	375	0.169	0~187	38	0.087
Tuberculodinioid 类		<i>Tuberculodinioid group</i>						
窄形扁甲藻	<i>Pyrophacus stenii</i>	<i>Tuberculodinium vancampoae</i>	0~41	6	0.001			
钙质类		<i>Calcoidinellid group</i>						
斯氏藻	<i>Scrippsilla sp.</i>		0~131	12	0.001	0~20	6	0.014
裸甲藻类		<i>Gymnodinioid group</i>						
链状裸甲藻	<i>Gymnodinium catenatum</i>		9~433	32	0.009	0~11	1	0.001
异养型孢囊		<i>Heterotrophs</i>						
裸甲藻类		<i>Gymnodinioid group</i>						
无纹多沟藻	<i>Polykrikos schwartzii</i>		0~36	4	0.001	0~11	1	0.001
原多甲藻类		<i>Protoperidinioid group</i>						
锥形原多甲藻	<i>Protoperidinium conicum</i>	<i>Selenopemphix quanta</i>	0~41	5	0.001	0~6	1	0.002
分支原多甲藻	<i>Protoperidinium divaricatum</i>	<i>Xandarodinium xanthum</i>				0~18	2	0.001
宽刺原多甲藻	<i>Protoperidinium latissimum</i>		0~41	7	0.001	0~6	1	0.000
里昂原多甲藻	<i>Protoperidinium leonis</i>	<i>Quinquecuspis concreta</i>				0~22	5	0.012
微小原多甲藻	<i>Protoperidinium minutum</i>		0~79	6	0.001	0~59	8	0.014
原多甲藻	<i>Protoperidinium nudum</i>	<i>Selenopemphix sp.1</i>	0~22	1	0.000			
长形原多甲藻	<i>Protoperidinium oblongum</i>	<i>Votadinium calvum</i>	0~72	8	0.001	0~20	2	0.015
五角原多甲藻	<i>Protoperidinium pentagonum</i>	<i>Trinovantedinium capitatum</i>	0~12	1	0.000	0~4	0	0.000
赛裸原多甲藻	<i>Protoperidinium subinermis</i>	<i>Selenopemphix nephroides</i>	0~31	2	0.000	0~4	0	0.000
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.</i>	<i>Brigantedinium asymmetricum</i>				0~3	0	0.000
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.</i>	<i>Brigantedinium sp.1</i>	0~288	61	0.032	0~148	25	0.064
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.</i>	<i>Brigantedinium sp.2</i>				0~39	8	0.019
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.</i>	<i>Lejeunecysta sp.1</i>	0~6	0	0.000	0~4	0	0.000
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.</i>	<i>Votadinium sp.1</i>				0~4	0	0.001
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.1</i>					0~18	4	0.025
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.2</i>		0~72	11	0.002	0~69	16	0.004
原多甲藻	<i>Protoperidinium sp.3</i>					0~6	1	0.001
原多甲藻	<i>Protoperidinium spp.</i>	<i>Brigantedinium spp.</i>	0~31	4	0.000	0~17	4	0.015
原多甲藻	<i>Protoperidinium spp.</i>		6~247	73	0.030	0~39	11	0.027
未定种		<i>Unknown cysts</i>						
未定种 1		<i>Unknown cyst 1</i>	0~535	100	0.008	0~48	19	0.000
未定种 2		<i>Unknown cyst 2</i>	0~591	97	0.022	3~79	23	0.010
未定种 3		<i>Unknown cyst 3</i>				0~18	3	0.009

藻孢囊 *O. centrocarpum*、具刺膝沟藻 *Spiniferites hyperacanthus* 和膝沟藻孢囊 *S. spp.* (表 1)。

此外, 本研究发现有一种中国海域新记录孢囊孢囊种类和 3 种未定种, 其形态特征如下:

原多甲藻 *Protoperidinium sp.* (图 2-c)

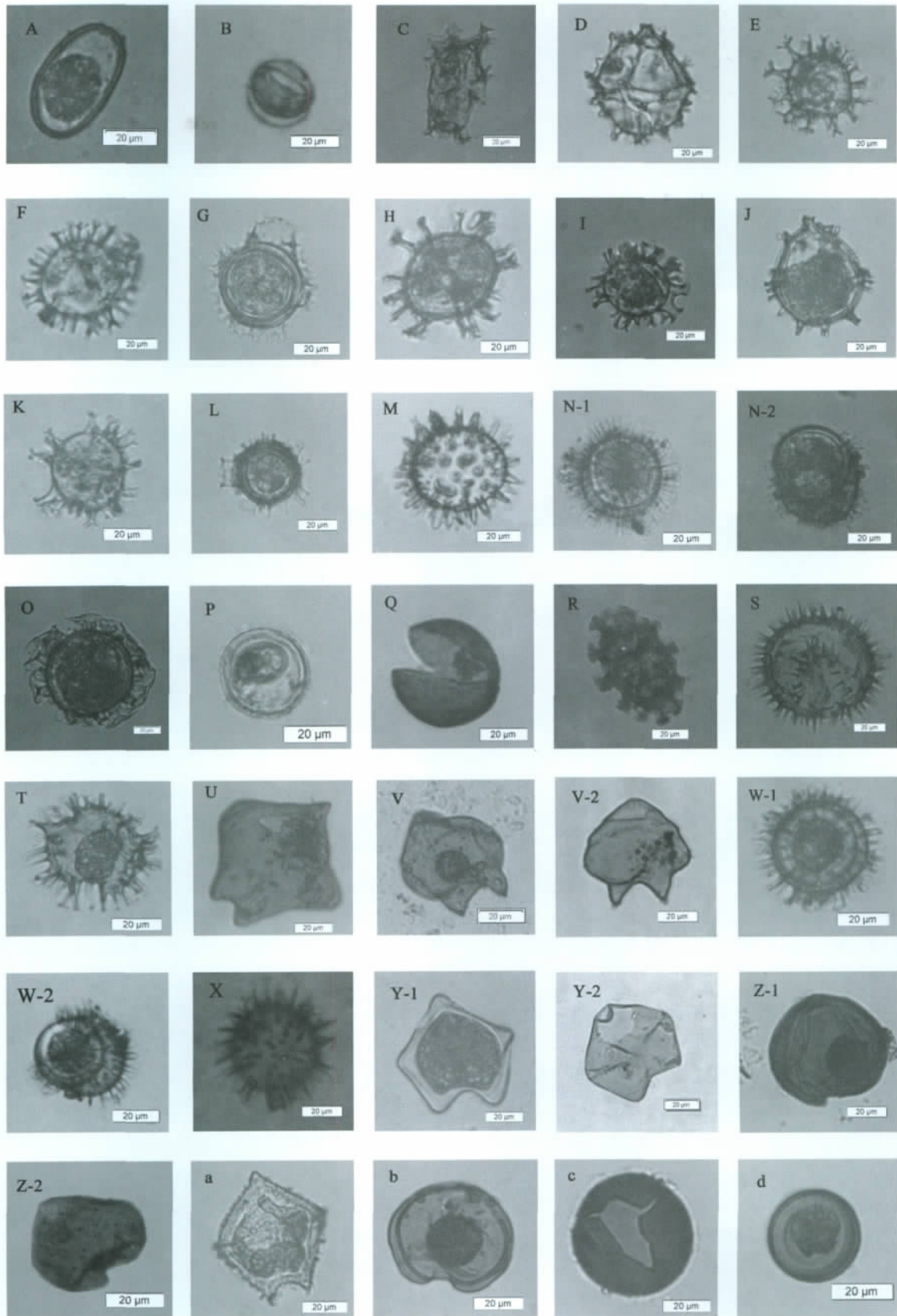
孢粉学名称: *Brigantedinium asymmetricum* Mat-suoka

鲜褐色圆球形孢囊, 孢囊直径为 52.0 μm 。具

有一个大的六角形萌发孔。该孢囊仅在烟台四十里湾海域发现一个。此种甲藻孢囊为中国海域新记录种, 该种甲藻孢囊曾在日本海岸 (Shin et al, 2010)、韩国的南海岸 (Shin et al, 2011)、Aegean 海 (位于东地中海) 的 Izmir 湾 (Aydin et al, 2011) 被报道过, 但数量均较少。

未定种 1 (图 2-k)

黄褐色球状孢囊, 直径 27.3~41.3 μm , 具有许



续图

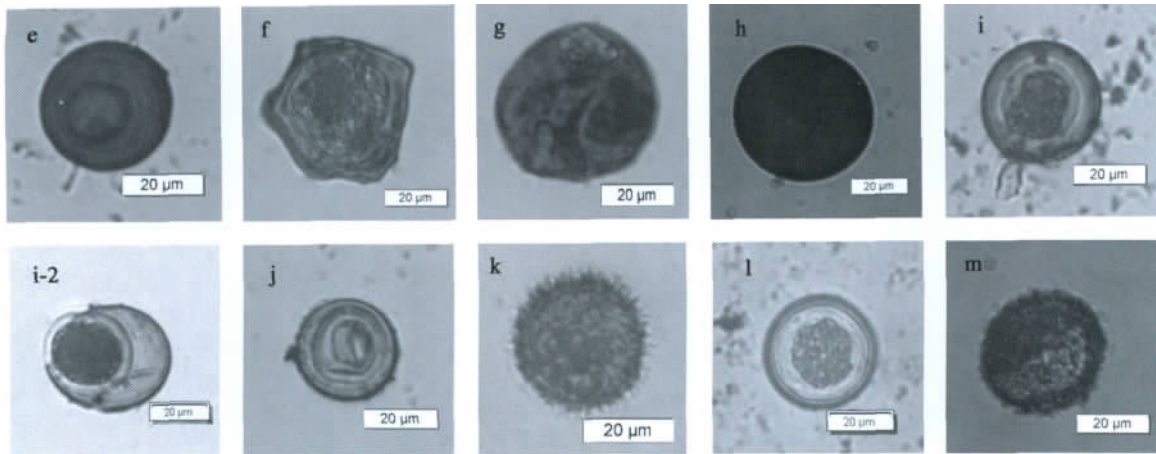


图2 北黄海和烟台四十里湾沉积物中甲藻孢囊的光学照片

(A:塔马亚历山大藻/链状亚历山大藻. B:微小亚历山大藻/相似亚历山大藻. C:长膝沟藻. D:膝沟藻. E:斯氏膝沟藻. F:具刺膝沟藻. G:具刺膝沟藻. H:具刺膝沟藻. I:膝沟藻. J:膝沟藻. K:膝沟藻. L:膜状膝沟藻. M:多边舌甲藻. N:网状原角管藻. O:窄形扁甲藻. P:斯氏藻. Q:链状裸甲藻. R:无纹多沟藻. S:锥形原多甲藻. T:分支原多甲藻. U:宽刺原多甲藻. V:里昂原多甲藻. W:微小原多甲藻. X:原多甲藻. Y和Z:长形原多甲藻. a:五角原多甲藻. b:赛裸原多甲藻. c:原多甲藻. d:原多甲藻. e:原多甲藻. f:原多甲藻. g:原多甲藻. h:原多甲藻. i:原多甲藻. j:原多甲藻. k:未定种 1. l:未定种 2. m:未定种 3)

多实心的尖刺状凸起, 凸起长 $3.5\sim 6.5\ \mu\text{m}$ 。未见明显的萌发孔。Fujii 和 Matsuoka (2006) 在日本 Omura 湾用沉积物捕捉器采集到相似的孢囊。该种孢囊在北黄海和烟台四十里湾海域均有广泛分布。

未定种 2 (图 2-l)

卵圆形至球形无色孢囊, 直径 $20.1\sim 62.5\ \mu\text{m}$, 一层或两层孢囊壁, 孢囊壁光滑。似刚刚萌发出来的孢囊。Fujii 和 Matsuoka (2006) 在日本 Omura 湾用沉积物捕捉器采集到相似的孢囊。该种孢囊在北黄海和烟台四十里湾海域均有广泛分布。

未定种 3 (图 2-m)

卵圆形无色孢囊, 直径为 $30.0\sim 41.2\ \mu\text{m}$, 孢囊壁上有颗粒物质, 可能是斯氏藻 (*Scrippsiella*) 经过孢粉学处理后的孢囊。Fujii 和 Matsuoka (2006) 在日本 Omura 湾用沉积物捕捉器采集到相似的孢囊。该种孢囊在烟台四十里湾部分站点有分布。

2.2 烟台四十里湾海域与北黄海甲藻孢囊空间分布特征比较

烟台四十里湾海域表层沉积物中孢囊丰度介于 $122\ \text{cysts/g DW}$ 和 $1\ 322\ \text{cysts/g DW}$ 之间, 平均值为 $396\ \text{cysts/g DW}$ (Liu et al, 2012)。北黄海表层沉积物中的孢囊总丰度在不同站点之间差异较大, 介于 $489\sim 9\ 158\ \text{cysts/g DW}$ 之间, 平均值为 $2\ 306\ \text{cysts/g DW}$ 。

北黄海和烟台四十里湾海域各种孢囊的丰度和

优势度见表 1。将烟台四十里湾与北黄海海域的表层沉积物中甲藻孢囊作比较, 结果发现烟台四十里湾海域孢囊总丰度明显小于北黄海海域, 其中主要原因是自养型甲藻孢囊丰度存在明显差别 (平均丰度: 北黄海 $1\ 970\ \text{cysts/g DW}$, 烟台四十里湾海域 $257\ \text{cysts/g DW}$) ($P<0.05$), 而异养型甲藻孢囊丰度并没有差异 (平均丰度: 北黄海 $381\ \text{cysts/g DW}$, 烟台四十里湾海域 $114\ \text{cysts/g DW}$) ($P>0.05$)。这样使烟台四十里湾海域的异养型甲藻孢囊与自养型甲藻孢囊之比 (H:A) 值明显高于北黄海海域 ($P>0.05$)。然而, 烟台四十里湾海域甲藻孢囊的物种丰富度 (平均值: 北黄海 14, 烟台四十里湾海域 25) 和香浓威弗指数 (平均值: 北黄海 2.62, 烟台四十里湾海域 3.85) 显著高于北黄海的 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 甲藻孢囊的生态学分布

Wang 等 (2004a) 于 2000 年 7 月采集烟台四十里湾 2 个站点表层沉积物, 共分析鉴定出甲藻孢囊类型 29 种。本研究在 22 个站点共计发现 38 种甲藻孢囊, 其中 22 种与 Wang 等 (2004a) 的研究相同, 另外还发现 14 种新记录 (表 1)。这一结果说明在过去十年中, 四十里湾甲藻孢囊的种类和数

量有可能已经发生变化。

在北黄海中部海域共发现 31 种甲藻孢囊。已有黄海海域甲藻孢囊的研究主要集中在南黄海 (Cho et al, 2001; 潘俊等, 2010; Hwang et al, 2011)。本研究中的 21 种甲藻孢囊在南黄海海域也有广泛分布, 而有 10 种孢囊仅在北黄海海域发现, 在南黄海海域未发现。

将烟台四十里湾沉积物中的总孢囊种类数、每个站点的孢囊种类数和优势种与我国其它主要海湾进行比较 (王朝晖等, 2003, 2004; Wang et al, 2004a, b, c; 魏洪祥等, 2011), 同样将北黄海中部海域也与我国其它近海的进行比较 (Cho et al, 2001; Gu et al, 2003; Kawamura, 2004; 潘俊等, 2010; Hwang et al, 2011), 可以看出我国主要海湾的孢囊优势种主要有膝沟藻类孢囊 (Gonyaulacoid group) (Matsuoka et al, 2000; 王朝晖, 2007)、锥状斯氏藻 (*S. trochoidea*) 以及原多甲藻 (*Protoperdinium* spp.), 我国近海的孢囊优势种主要有膝沟藻类孢囊 (Gonyaulacoid group) 和亚历山大藻 (*Alexandrium* spp.), 而且总孢囊种类数均呈现从南到北减少的趋势, 此结果与大西洋和太平洋东岸海域中甲藻孢囊的多样性的变化相似, 即甲藻孢囊多样性从低纬度向高纬度有降低的趋势, 由此可证明甲藻孢囊分布可能与温度呈正相关性 (Chen et al, 2011)。

3.2 人类活动对甲藻孢囊在烟台四十里湾海域和北黄海表层沉积物中空间分布的影响

烟台四十里湾海域由于受到人类活动的影响, 这样本海域海水中营养盐和重金属含量都比北黄海海域高。例如: 北黄海水体中 DIN 含量为 $6.71 \mu\text{mol/L}$ (温婷婷等, 2009; 臧璐等, 2010), 小于烟台四十里湾海域 DIN 含量。北黄海海域水体中溶解态 Pb 的浓度范围为未检出~ $2.81 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $0.38 \mu\text{g/L}$ (田琳等, 2009)。烟台四十里湾海域海水中 Pb 含量 $1.65\sim 9.85 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $3.90 \mu\text{g/L}$, 是北黄海含量的 10 倍 (单志欣等, 2001; 白艳艳等, 2010)。Matsuoka et al (2003) 调查东京湾表层沉积物中甲藻孢囊的分布, 研究结果证明异养型甲藻孢囊占 50% 以上以及高丰度的科夫多沟藻/无纹多沟藻 *Polykrikos schwartzii* / *kofoidii* 孢囊指示东京湾已经超富营养化 (hypertrophic)。并且 Pospelova 等 (2005) 研究发现有毒物质污染和超富营养化在空

间上可以减小甲藻孢囊的物种丰富度和丰度。因此, 相对于北黄海, 烟台四十里湾海域海水中较高的营养盐和重金属含量导致烟台四十里湾海域 H:A 较高而孢囊丰度较低。本研究进一步证明甲藻孢囊的群落变化可以指示人类活动对近岸海域生态环境的影响。

3.3 有毒有害甲藻孢囊的潜在危害

虾夷扇贝毒素 (yessotoxins, YTXs) 是从腹泻性贝毒中分出来成为专门的一类毒素 (Toyofuku, 2006)。最早是从日本虾夷扇贝中被分离出来, 因此被命名为虾夷扇贝毒素 (Murata et al, 1987)。PSP 毒素则是常见的主要影响人体神经系统的毒素, 许多种甲藻可产生该毒素 (郭皓, 2004)。本次调查发现 3 种产 YTX (Yessotoxin) 毒素甲藻 (具刺膝沟藻 *Gonyaulax spinifera*、多边舌甲藻 *Lin-gulodinium polyedrum* 和网状原角管藻 *Protoceratium reticulatum*) (高春蕾等, 2010) 的孢囊和 3 种产麻痹性贝类毒素 (PSP) 的孢囊 (塔马亚历山大藻/链状亚历山大藻 *Alexandrium catenella* / *tamarense*, 微小亚历山大藻/相似亚历山大藻 *Alexandrium minutum* / *affine* 和链状裸甲藻 *Gymnodinium catenatum*)。在北黄海和烟台四十里湾表层沉积物中网状原角管藻 (*P. reticulatum*), 多边舌甲藻 (*L. polyedrum*) 和具刺膝沟藻 (*G. spinifera*) 的孢囊分布广泛, 而且数量较高, 其中北黄海的网状原角藻 (*P. reticulatum*) 的孢囊丰度为 $44\sim 370 \text{ cysts/g DW}$ (石雅君等, 2011), 在中部海域的 14、15、16 和 17 站点丰度较高; 烟台四十里湾的具刺膝沟藻 (*G. spinifera*) 的孢囊丰度为 $5\sim 168 \text{ cysts/g DW}$, 其中在芝罘岛附近的 A2、A3、A4、A5 站点和与北黄海接壤的 D1、D2、D3 站点丰度较高, 网状原角管藻 (*P. reticulatum*) 的丰度为 $8\sim 112 \text{ cysts/g DW}$, 在每个区域都有高值点, 像芝罘岛附近的 A2、A6 站点, 和北黄海接壤的 D2 站点。综上, 产虾夷扇贝毒素孢囊在北黄海中部海域和烟台四十里湾海域的芝罘岛附近及其与北黄海接壤的海域有较高丰度的分布。高春蕾等 (2010) 推测虾夷扇贝毒素与沉积物中甲藻孢囊有关。因此, 应该加强对上述海域的监测。

塔马亚历山大藻/链状亚历山大藻 (*A. catenella* / *tamarense*), 微小亚历山大藻/相似亚历山大藻 (*A. minutum* / *affine*) 和链状裸甲藻 (*Gymnodinium*

catenatum) 的孢囊在烟台四十里湾海域和北黄海均有分布,但在四十里湾丰度较低,在北黄海丰度却很高。其中北黄海海域亚历山大藻的孢囊平均丰度高达 1 094 cysts/g DW,在中部海域的 9、14、16、22 站点孢囊丰度更是高达 3 000~6 000 cysts/g DW。已有研究发现渤海海峡的南隍城岛附近海域还发生过塔马亚历山大藻 (*A. tamarensis*) 的赤潮(宋秀凯等,2009)。Catalina et al (1998) 研究发现在加拿大的 St. Lawrence 河口,当表层沉积物中塔马亚历山大藻 (*A. tamarensis*) 的孢囊丰度达到 100 cysts/cm 时,便可在适宜条件下萌发从而引发赤潮,而北黄海中部海域亚历山大藻的孢囊丰度明显高于此丰度。因此,为了防止北黄海和烟台四十里湾表层沉积物中甲藻孢囊萌发后可能会对周围海水养殖环境造成危害,应该加强对这些海域甲藻孢囊的检测。

致谢:感谢日本长崎大学的松本教授 (Kazumi MATSUOKA) 在甲藻孢囊鉴定上的帮助。

参 考 文 献

- Anderson D M, Fukuyo Y, Matsuoka K, 2003. Cyst methodologies. In: Hallegraeff G M, Anderson D M, Cembella A D, (Eds.) Manual on Harmful Marine Microalgae. Monographs on Oceanographic Methodology, 11. UNESCO, 165-190.
- Aydin H, Matsuoka K, Minareci E, 2011. Distribution of dinoflagellate cysts in recent sediments from Izmir Bay (Aegean Sea, Eastern Mediterranean). Marine Micropaleontology, 80(1-2): 44-82.
- Azanza R V, Siringan F P, Diego-Mcglone M L S, et al, 2004. Horizontal dinoflagellate cyst distribution, sediment characteristics and benthic flux in Manila Bay, Philippines. Phycological Research, 52(4): 376-386.
- Berger W H, Parker F L, 1970. Diversity of planktonic foraminifera in deep-sea sediments. Science, 168: 1345-1347.
- Catalina C P, Suzanne R, Maurice L, et al, 1998. Control of germination of *Alexandrium tamarensis* (dinophyceae) cysts from the Lower St. Lawrence estuary (Canada). Journal of Phycology, 34: 242-249.
- Chen B, Irwin A J, Finkel Z V, 2011. Biogeographic distribution of diversity and size-structure of organic-walled dinoflagellate cysts. Marine Ecology Progress Series, 425: 35-45.
- Cho H J, Matsuoka K, 2001. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments from the Yellow Sea and East China Sea. Marine Micropaleontology, 42(3-4): 103-123.
- Fauchot J, Saucier F J, Levasseur M, et al. 2008. Wind-driven river plume dynamics and toxic *Alexandrium tamarensis* blooms in the St. Lawrence estuary (Canada): A modeling study. Harmful Algae, 7(2): 214-227.
- Fujii R, Matsuoka K, 2006. Seasonal change of dinoflagellates cyst flux collected in a sediment trap in Omura Bay, West Japan. Journal of Plankton Research, 28(2): 131-147.
- Gu H F, Fang Q, Sun J, et al, 2003. Dinoflagellate cysts in recent marine sediment from Guangxi, China. Acta Oceanologica Sinica, 22(3): 407-419.
- Hwang C H, Kim K Y, Lee Y, et al, 2011. Spatial distribution of dinoflagellate resting cysts in Yellow Sea surface sediments. Algae, 26(1): 41-50.
- Kawamura H, 2004. Dinoflagellate cyst distribution along a shelf to slope transect of an oligotrophic tropical sea (Sunda Shelf, South China Sea). Phycological Research, 52(4): 355-375.
- Liu D Y, Shi Y J, Di B P, et al, 2012. The impact of different pollution sources on modern dinoflagellate cysts in Sishili Bay, Yellow Sea, China. Marine Micropaleontology, 84-85: 1-13.
- Matsuoka K, Fukuyo Y, 2000. Technical guide for modern dinoflagellate cyst study. ESTPAC-HAB/WEST-PAC/IOC, Tokyo: Japan Society of the Promotion Science.
- Matsuoka K, Joyce L B, Kotani Y, et al, 2003. Modern dinoflagellate cysts in hypertrophic coastal waters of Tokyo Bay, Japan. Journal of Plankton Research, 25(12): 1461-1470.
- McMinn A, Bolch C J S, Salas M F de, et al, 2010. Recent Dinoflagellate Cysts. In: Hallegraeff G M, Bolch C J S., Hill D R A., et al. (eds.) Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters. Melbourne: CSIRO Publishing, 260-292.
- Murata M, Kumagai M, Lee J S, et al, 1987. Isolation and structure of yessotoxin, a novel polyether compound implicated in diarrhetic shellfish poisoning. Tetrahedron Letters, 28(47): 5869-5872.
- Pospelova V, Chmura G L, Boothman W S, et al, 2005. Spatial distribution of modern dinoflagellate cysts in polluted estuarine sediments from Buzzards Bay (Massachusetts, USA) embayments. Marine Ecology Progress Series, 292: 23-40.
- Shin H H, Matsuoka K, 2010. Reconstruction of historical nutrient levels in Korean and Japanese coastal areas based on dinoflagellate cyst assemblages. Marine Pollution Bulletin, 60(8): 1243-1258.
- Shin H H, Matsuoka K, 2011. Dinoflagellate cysts in surface sediments from southern coast of Korea. Estuaries and Coast, 34(4): 712-725.
- Toyofuku H, 2006. Joint FAO/WHO/IOC activities to provide scientific advice on marine biotoxins (research report). Marine Pollution Bulletin, 52(12): 1735-1745.
- Wang Z, Matsuoka K, Qi Y, et al, 2004a. Dinoflagellate cysts in recent sediments from Chinese coastal waters. Marine Ecology, 25(4): 289-311.
- Wang Z H, Matsuoka K, Qi Y, et al, 2004b. Dinoflagellate cyst records in recent sediments from Daya Bay, South China Sea. Phycological Research, 52(4): 396-407.
- Wang Z, Qu Y, Lu S, et al, 2004c. Seasonal distribution of dinoflagellate resting cysts in surface sediments from Changjiang River Es-

- tuary. *Phycological Research*, 52(4):387-395.
- Wang Z H, Qi Y Z, Yang Y F, 2007. Cyst formation: an important mechanism for the termination of *Scrippsiella trochoidea* (Dinophyceae) bloom. *Journal of Plankton Research*, 29(2):209-218.
- 白艳艳, 刘义豪, 靳洋, 等, 2010. 应用内梅罗污染指数法综合评价烟台市辛安河排污口邻近海域环境质量. *齐鲁渔业*, 27(4):17-19.
- 杜秀宁, 刘光兴, 2009. 2006 年冬季北黄海网采浮游植物群落结构. *海洋学报*, 31(5):132-147.
- 高爽, 李正炎, 2009. 北黄海夏、冬季叶绿素和初级生产力的空间分布和季节变化特征. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 39(4):604-610.
- 高春蕾, 刘仁沿, 梁玉波, 等, 2010. 虾夷扇贝毒素 yessotoxins (YTXs), 中国沿海贝类中首次发现的一组贝类生物毒素. *海洋学报*, 31(3):129-137.
- 郭皓, 2004. 中国近海赤潮生物图谱. 北京: 海洋出版社.
- 潘俊, 李瑞香, 李艳, 等, 2010. 秋季南黄海表层沉积物中甲藻孢囊分布. *海洋科学进展*, 28(1):41-49.
- 单志欣, 郑振虎, 邢红艳, 等, 2001. 四十里湾养殖水域环境监测及分析. *齐鲁渔业*, 18(4):37-39.
- 山东省海洋与渔业厅, 2006-2011. 山东省海洋环境质量公报.
- 邵魁双, 巩宁, 杨青, 等, 2011. 甲藻孢囊在长山群岛海域表层沉积物中的分布. *生态学报*, 31(10):2854-2862
- 石雅君, 邵红兵, 刘东艳, 等, 2011. 北黄海表层沉积物中甲藻孢囊的分布特征. *海洋通报*, 30(3):320-327.
- 宋秀凯, 马建新, 刘义豪, 等, 2009. 隍城岛海域塔玛亚历山大藻赤潮发展过程及其成因. *海洋湖沼通报*, 4:93-98.
- 田琳, 陈洪涛, 杜俊涛, 等, 2009. 北黄海表层海水溶解态重金属的分布特征及其影响因素. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 39(4):617-621.
- 王朝晖, Matsuoka K, 齐雨藻, 等, 2003. 深圳湾表层沉积物中甲藻孢囊的垂直分布. *生态学报*, 23(10):2073-2081.
- 王朝晖, Matsuoka K, 齐雨藻, 等, 2004. 柘林湾近代沉积物中甲藻孢囊的垂直分布. *海洋通报*, 23(3):46-53.
- 王朝晖, 2007. 中国沿海甲藻孢囊与赤潮研究. 北京: 海洋出版社.
- 魏洪祥, 赵文, 梁玉波, 2011. 大窑湾养殖区赤潮甲藻孢囊种类组成及分布的研究. *水生生物学报*, 35(3):489-497.
- 温婷婷, 张传松, 王丽莎, 等, 2009. 春、秋季北黄海生源要素的平面分布特征. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 39(4):789-798.
- 喻龙, 郝彦菊, 2009. 烟台四十里湾一次血红哈卡藻赤潮过程的分析. *海洋科学进展*, 27(4):519-522.
- 臧璐, 石晓勇, 张传松, 等, 2010. 冬、夏季北黄海生源要素的平面分布特征. *海洋环境科学*, 29(3):346-350.
- 周毅, 杨红生, 刘石林, 等, 2002. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着物的化学组成、有机净生产量及其生态效应. *水产学报*, 26(1):21-27.

(本文编辑 郭箬)