

# 19-3 油田溢油对辽东湾浮游植物群落的影响\*

宋广军<sup>①</sup> 李 爱 吴金浩 王召会

(辽宁省海洋水产科学研究院 辽宁省海洋生物资源与生态学重点实验室 辽宁 大连 116023)

**摘要** 根据 2012–2014 年对辽东湾浮游植物群落的调查, 分析了 19-3 油田溢油事故发生后辽东湾浮游植物种类、细胞丰度、生物多样性和优势种的变化以及影响因素。调查发现, 辽东湾浮游植物种类数在 2012 年有明显的降低, 而在 2013 年和 2014 年浮游植物种类数明显上升。辽东湾浮游植物细胞丰度在夏季异常升高, 中肋骨条藻(*Skeletomema costatum*)出现爆发性繁殖, 这可能与海水中油类含量的升高有一定关系。

**关键词** 石油污染; 辽东湾; 浮游植物; 群落结构; 多样性指数

**中图分类号** Q948.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)04-0060-07

近年来, 由于石油工业、海上运输业的迅速发展, 海上油田泄露、船舶溢油事故不断发生, 对海域生态环境造成了严重影响。在海洋生态环境中, 海洋浮游植物作为最主要的初级生产力, 海洋食物链的起点, 研究石油污染后期浮游植物群落结构的变化至关重要。国内外学者已就石油污染对浮游植物的短期影响做了大量相关研究(Djomo *et al.*, 2004; Parab *et al.*, 2008; 王君丽等, 2011; 黄逸君等, 2011), 但是对石油污染后海洋中浮游植物群落结构的长期影响报道较少。2011 年 6 月蓬莱 19-3 油田发生溢油事故, 造成渤海约 620 km<sup>2</sup> 的海域污染, 使渤海中部蓬莱 19-3 油田周边海域和西北部海域, 以及辽东湾绥中沿岸水域环境和生物群落受到影响。作者通过对 2012–2014 年辽东湾海域连续 3 年的浮游植物以及相关环境因子监测数据分析, 研究了石油污染发生后 3 年时间辽东湾海域浮游植物群落结构的变化, 以及石油污染对浮游植物群落结构是否产生后续影响, 也为今后相关的研究工作提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查海区和监测方法

调查范围在渤海(辽东半岛南端)老铁山角至(绥

中)止锚湾连线以北辽东湾全部海域, 调查站位 38 个(图 1)。自 2012–2014 年, 连续 3 年对该海域浮游植物和相关影响环境因子(石油类、DIN、DIP、温度、DO 和 COD)进行监测。监测时间为每年 5 月、8 月和 10 月。

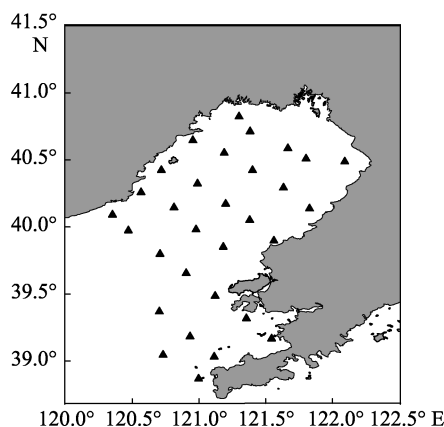


图 1 监测站位

Fig.1 Sampling stations in the Liaodong Bay

浮游植物采集使用国际标准 20 号(孔径 0.076 mm)筛绢制成的浅水Ⅲ型浮游生物网(网口直径为 37 cm, 网长 1.4 m), 由底至表垂直拖网, 采集到的样品装到采样瓶中, 加入 5% 浓度为 40% 的甲醛进行固定, 带回实验室进行分类和计数。

\* 辽宁省海洋与渔业厅科研项目(201418)、辽宁省海洋与渔业厅科研项目(201303)和辽宁省海洋与渔业厅科研项目(201416)共同资助。

① 通讯作者: 宋广军, 副研究员, E-mail: sgi666@qq.com

收稿日期: 2015-08-17, 收修改稿日期: 2015-11-09

石油类、DIN、DIP、温度、DO 和 COD 等环境影响因子的样品采集、保存及分析方法均按《海洋监测规范》(GB17378-2007)和《海洋调查规范》(GB/T12763-2007)进行。

### 1.2 数据处理

浮游植物群落指数采用香农-威纳指数  $H'$  (Shannon-Wiener index), 计算公式为:

$$H' = -\sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

物种优势度  $Y$  的计算: 根据各物种出现的频率及丰度来计算, 计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中,  $N$  为采集样品中所有物种的总体个数;  $S$  为样品中的物种个数;  $P_i$  为第  $i$  种的个体数与样品中的总个数的比值;  $n_i$  为第  $i$  种的总体个数;  $f_i$  为第  $i$  种在各样品中出现的频率。以优势度  $Y > 0.02$  的标准来确定优势种(徐兆礼等, 1989)。

采用 SPSS19 统计软件对浮游植物种类、细胞丰度以及生物多样性与环境影响因子做 Pearson 相关性分析。

## 2 结果

### 2.1 浮游植物群落结构的变化

**2.1.1 浮游植物种类与细胞丰度的变化** 2012-2014 年调查海域 3 个季节浮游植物种类与细胞丰度的变化见表 1。调查结果显示, 辽东湾浮游植物种类最低值出现在 2012 年 5 月, 最高值出现在 2013 年 10 月, 2012 年 3 个季节浮游植物种类分别为 26 种、32 种和 38 种, 均低于 2013 年和 2014 年同期水平。浮游植物细胞丰度最高值出现在 2012 年 8 月, 最低值出现在 2012 年 5 月。从 3 年总体结果来看, 2012 年辽东湾海域浮游植物

表 1 2012-2014 年辽东湾海域 3 个季节的浮游植物平均丰度和种类数

Tab.1 Number of species and average abundance of phytoplankton in three seasons in the Liaodong Bay from 2012 to 2014

调查时间(年-月) Sampling time (Y-M)	种类数 Amount of species	细胞丰度 Average abundance ( $\times 10^4$ ind/ $m^3$ )
2012-05	26	27
2012-08	32	3072
2012-10	38	242
2013-05	43	168
2013-08	35	142
2013-10	59	75
2014-05	39	63
2014-08	55	465
2014-10	56	34

种类数处于低水平, 细胞丰度波动最大(图 2)。

**2.1.2 浮游植物优势种的变化** 2012-2014 年调查海域 3 个季节浮游植物优势种变化情况见表 2。表 2 中列出各季节优势度前三位的优势物种。从调查结果来看, 辽东湾 5 月浮游植物优势种主要为具槽帕拉藻 (*Melosira sulcata*), 角毛藻属 (*Chaetoceros* spp.) 和夜光藻 (*Noctiluca scintillans*), 8 月中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 优势度明显, 10 月主要优势种为圆筛藻属 (*Coscinodiscus* spp.), 具槽帕拉藻和角毛藻属, 连续 3 年的调查结果基本一致。所不同的是, 2012 年 5 月和 8 月两种易引发赤潮的藻类夜光藻和中肋骨条藻优势度非常高。

**2.1.3 浮游植物多样性的变化** 2012 年 5 月辽东湾海域浮游植物多样性指数的范围在 0.66-3.77 之间, 多样性指数平均值为 2.58, 辽东湾近岸海域多样性指数较高, 辽东湾中部多样性指数低(图 3-a); 8 月多样性指数的范围在 0.13-3.41 之间, 多样性指数平均值为 1.34, 多样性指数由湾外向湾内递减, 湾顶部多样性最低(图 3-b); 10 月多样性指数的范围在 1.35-3.79

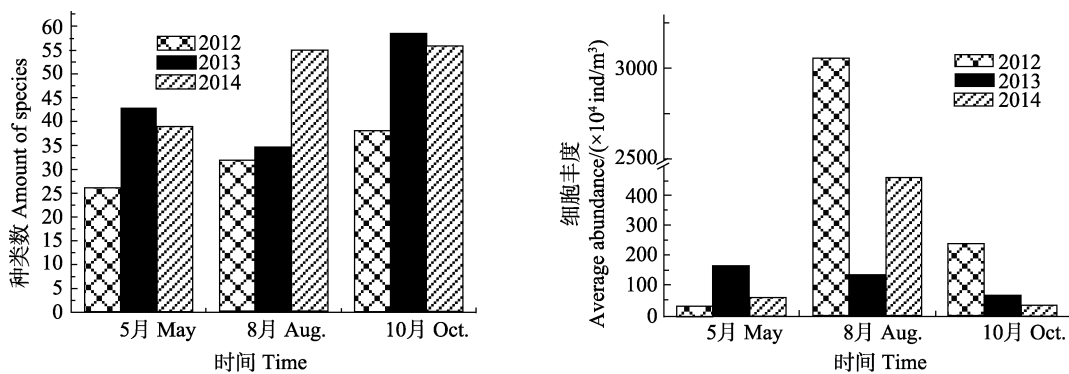


图 2 2012-2014 年辽东湾海域 3 个季节的浮游植物的平均丰度和种类数

Fig.2 Number of species and average abundance of phytoplankton in three seasons in the Liaodong Bay from 2012 to 2014

之间,多样性指数平均值为 2.99,整个湾内多样性指数较高,在湾外呈递减趋势(图 3-c)。

2013 年 5 月辽东湾海域浮游植物多样性指数变化范围在 1.14–3.66 之间,均值为 2.52(图 3-d); 8 月多样性指数变化范围在 1.81–3.61 之间,均值为 2.76(图 3-e); 10 月多样性指数变化范围在 1.70–3.72 之间,均值为 2.94(图 3-f)。2013 年各季节浮游植物多样性指数平面分布状况与 2012 年基本一致,2013 年 8 月多样性指数要明显好于 2012 年同期。

2014 年 5 月辽东湾海域浮游植物多样性指数变化范围在 0.56–3.22 之间,均值为 1.76(图 3-g); 8 月多样性指数变化范围在 0.76–3.48 之间,均值为 2.47(图 3-h); 10 月多样性指数变化范围在 0.91–4.05 之间,均值为 2.50(图 3-i)。2014 年 3 个季节浮游植物多样性指数平面分布与 2012 年和 2013 年变化不大,多样性指数略低。

## 2.2 浮游植物群落结构与水环境因子的相关性分析

### 2.2.1 辽东湾油类及营养结构的变化 图 4 分别

给出了辽东湾海域 2012–2014 年各项环境因子总体平均值的季节变化情况。从连续 3 年整体结果来看,辽东湾油类含量最高监测值达到 2889  $\mu\text{g/L}$ ,最低值为 5  $\mu\text{g/L}$ 。其中,2012 年油类的监测均值 8 月最高,达到 36  $\mu\text{g/L}$ ,10 月最低,为 16  $\mu\text{g/L}$ 。2013 年 5 月和 10 月油类监测均值为 3 年监测中最高,分别为 39  $\mu\text{g/L}$  和 38  $\mu\text{g/L}$ ,2014 年油类监测最高均值出现在 5 月,为 25  $\mu\text{g/L}$ 。从区域分布来看,油类浓度高值区出现在辽东湾西部和北部近岸海域,低值区出现在辽东湾中部和东南部海域。

无机氮和活性磷酸盐监测值呈明显季节性变化,无机氮监测值 5 月和 10 月高,8 月有明显降低,活性磷酸盐监测值 5 月和 8 月低,在 10 月监测值有明显升高。从年际变化来看,2013 年无机氮的监测值要高于 2012 年和 2014 年同期水平,活性磷酸盐 2014 年最高,2012 年最低。调查区域 N/P 比值平均值在 12.8:1–4.3:1 之间,除 2014 年 10 月 N/P 比值平均值低于大洋海水和浮游生物体的 Redfield 比值 16:1 外

表 2 2012–2014 年辽东湾海域 3 个季节浮游植物的优势种及优势度

Tab.2 The dominant species and the corresponding dominance degrees in three seasons in the Liaodong Bay from 2012 to 2014

调查时间(年-月) Sampling time (Y-M)	优势种 Dominant species	优势度 Dominance degree
2012-05	夜光藻 <i>N. scintillans</i>	0.372
	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	0.092
	具槽帕拉藻 <i>M. sulcata</i>	0.063
2012-08	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	0.840
2012-10	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.	0.156
	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp.	0.115
	密联角毛藻 <i>Chaetoceros densus</i>	0.063
2013-05	具槽帕拉藻 <i>M. sulcata</i>	0.204
	柔弱几内亚藻 <i>Guinardia delicatula</i>	0.153
	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp.	0.102
2013-08	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp.	0.362
	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	0.102
	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	0.079
2013-10	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.	0.179
	具槽帕拉藻 <i>M. sulcata</i>	0.131
	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp.	0.102
2014-05	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp.	0.271
	具槽帕拉藻 <i>M. sulcata</i>	0.196
	夜光藻 <i>N. scintillans</i>	0.070
2014-08	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	0.212
	短角弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i>	0.091
	泰晤士扭鞘藻 <i>Streptothecca tamesis</i>	0.045
2014-10	具槽帕拉藻 <i>M. sulcata</i>	0.384
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp.	0.119
	布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwelli</i>	0.056

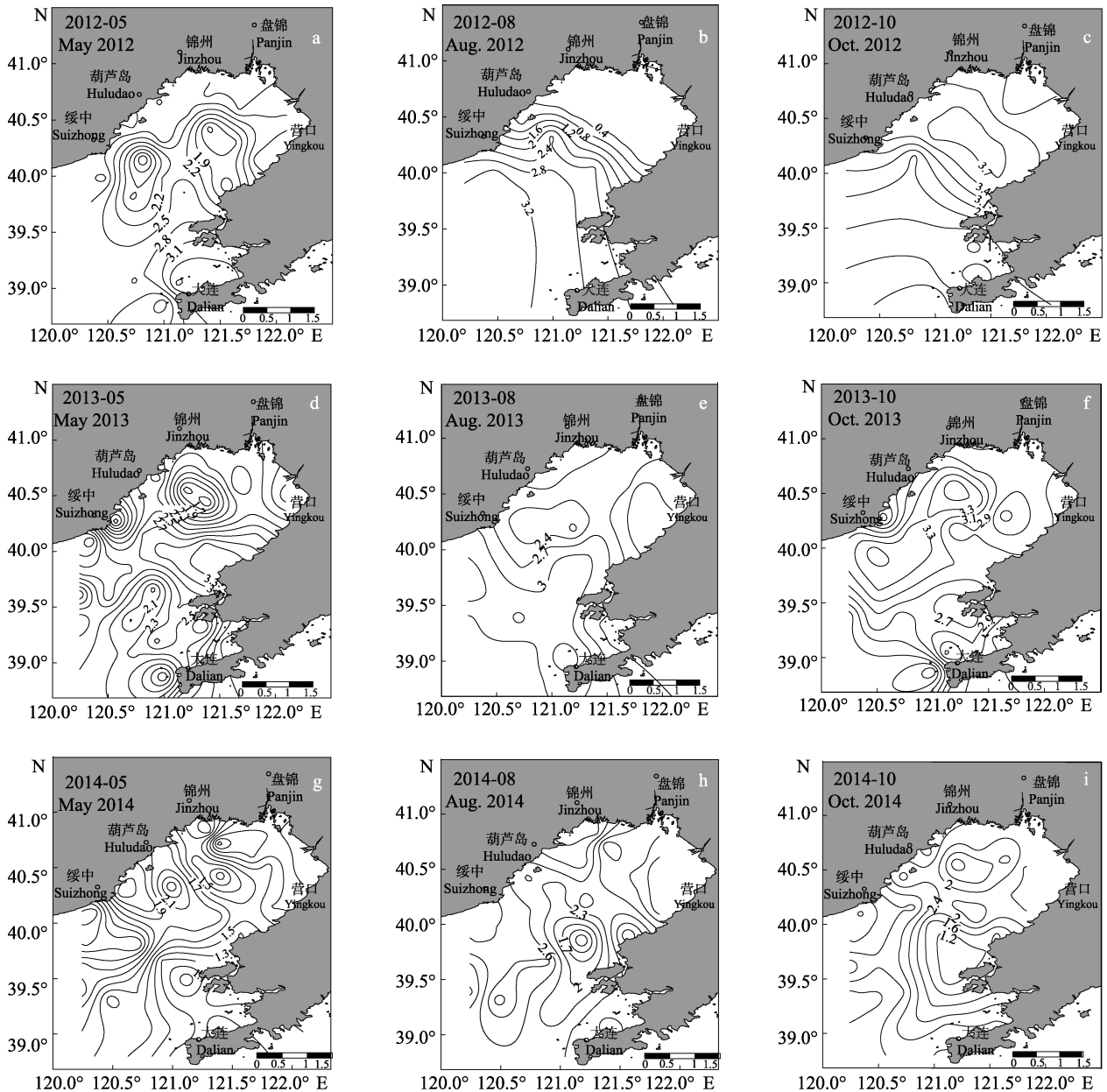


图 3 2012–2014 年辽东湾浮游植物多样性指数季节性分布

Fig.3 Seasonal distribution of the diversity index of phytoplankton in the Liaodong Bay from 2012 to 2014

(Redfield, 1958), 其他航次 N/P 比值远高于 16 : 1。营养盐结构呈现明显的 P 限制。

**2.2.2 浮游植物群落结构数据与环境因子的 Pearson 相关性分析** 调查海域浮游植物群落结构数据与环境因子的 Pearson 相关性分析结果见表 3。从表 3 可以看出, 浮游植物群落结构的变化受多种环境因子的影响。2012 年辽东湾浮游植物群落结构的变化与水温、COD、溶解氧以及油类相关性显著; 2013 年浮游植物群落结构变化与 COD、无机氮、活性磷酸盐相关性显著; 2014 年浮游植物群落结构变化与水温、溶解氧、活性磷酸盐以及油类相关性显著。

### 3 讨论

2011 年 6 月蓬莱 19-3 油田发生的溢油事故, 对辽东湾直接污染区域较小, 但是考虑到渤海属于半封闭海域, 海水交换能力差, 渤海大面积溢油污染造成的水质和生物群落的影响, 是否波及整个辽东湾海域浮游植物群落结构, 有必要进行系统性研究。

本次调查辽东湾浮游植物群落结构在种类组成上, 2012 年 5 月、8 月、10 月 3 个航次浮游植物种类数分别为 26 种、32 种和 38 种, 均低于 2013 年和 2014 年同期水平。而宋伦等(2007)对辽东湾 2005 年 7–9 月浮游植

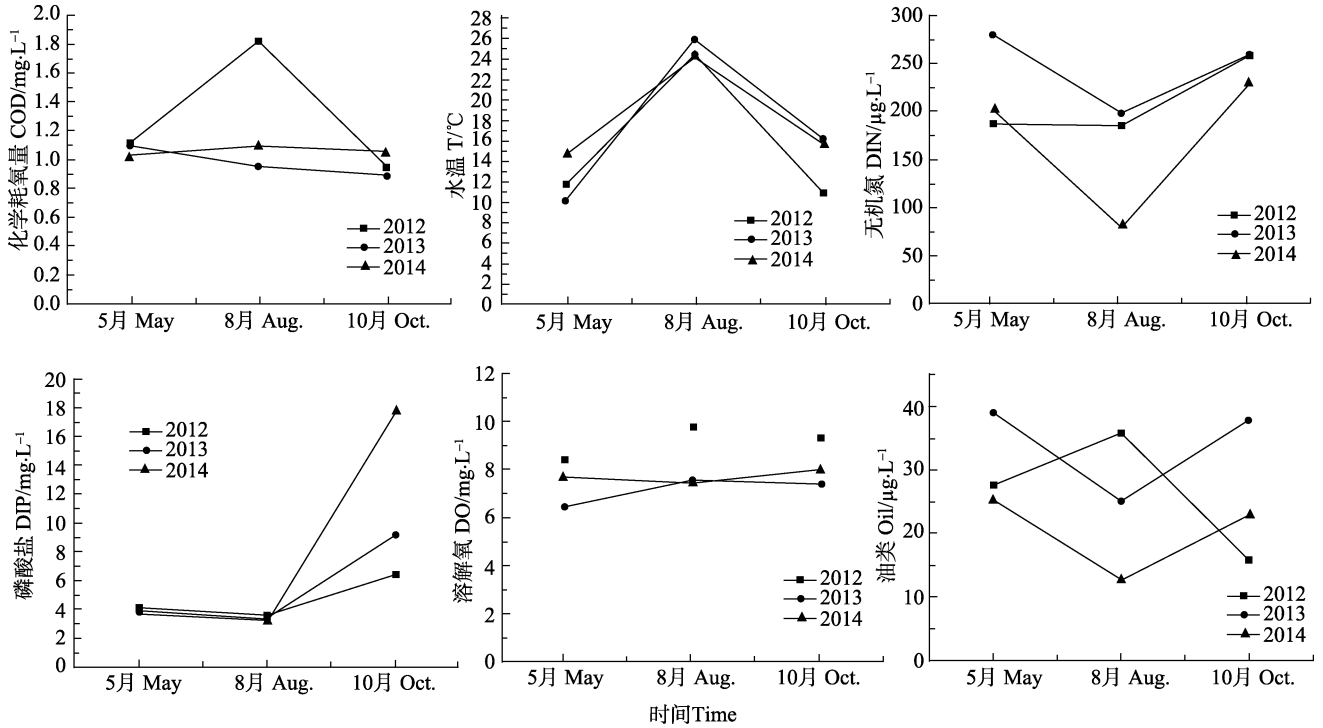


图 4 2012–2014 年辽东湾海域环境因子季节性变化  
Fig.4 Seasonal variation of environmental factors in the Liaodong Bay from 2012 to 2014

表 3 浮游植物群落结构与环境因子的 Pearson 相关系数

Tab.3 Pearson correlation between the phytoplankton community structure and the environmental factors (R)

年份 Year	项目 Item	DIN	DIP	Oil	T	DO	COD
2012	种类数 Amount of species	-0.162	-0.188	0.284*	0.389**	-0.087	0.599**
	细胞丰度 Cell abundance	-0.037	-0.030	-0.218	-0.324**	-0.320*	0.360
	多样性指数 Diversity index	0.217	0.066	-0.376**	-0.383**	0.097	-0.279
2013	种类数 Amount of species	-0.275**	0.308**	0.079	-0.192	-0.062	-0.311**
	细胞丰度 Cell abundance	0.013	-0.058	0.059	-0.114	0.174	-0.105
	多样性指数 Diversity index	-0.277**	0.099	0.080	0.126	-0.084	-0.127
2014	种类数 Amount of species	-0.108	0.326**	-0.148	0.278**	-0.385**	-0.044
	细胞丰度 Cell abundance	0.052	-0.147	-0.203*	0.311**	-0.043	0.091
	多样性指数 Diversity index	0.032	0.242*	-0.005	0.268**	-0.323**	0.086

\*\*为在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \*为在 0.05 水平(双侧)上显著相关

\*\*denoted significant correlation at 0.01 level (double side), \* denoted significant correlation at 0.05 level (double side)

物调查, 辽东湾浮游植物种类数为 56 种, 以及栉莎等 (2012)、高伟等(2012)2009 年对辽东湾西部春、夏、冬

季网采浮游植物群落结构进行的分析结果为浮游植物种类春季(5 月)32 种, 夏季(8 月)82 种, 冬季(12 月)60

种。从上述结果看,溢油发生后一年的2012年,辽东湾浮游植物种类数在各季节均有明显的降低,而2013年和2014年浮游植物种类数的上升,表明了浮游植物群落很强的自我修复能力。

从优势种组成上看,连续3年的调查结果基本一致。辽东湾5月浮游植物优势种均为具槽帕拉藻,角毛藻属和夜光藻,8月中肋骨条藻优势度明显,10月主要优势种以圆筛藻属、具槽帕拉藻和角毛藻属为主。其中5月和10月优势种的组成,与以往有关该海域的文献报道结果差异不大(孙军等,1998;栾莎等,2012;高伟等,2012;傅明珠等,2014)。而8月航次连续3年均以中肋骨条藻为主要优势种,这在溢油发生前的文献报道中是罕见的。中肋骨条藻的大量繁殖使整个辽东湾浮游植物细胞丰度分布和生物多样性指数均产生了严重影响。尤其是2012年8月整个辽东湾海域中肋骨条藻的优势度达到0.840、浮游植物细胞丰度均值达 $3072 \times 10^4 \text{ ind/m}^3$ ,生物多样性指数均值降低到1.34,浮游植物群落结构受到了明显的影响。

通过浮游植物种类、细胞丰度以及生物多样性指数与环境因子的Pearson相关性分析结果发现,浮游植物群落结构的变化,除与水温、COD、溶解氧以及营养盐的相关性显著外,与海水中油类含量的变化也有显著相关性。

从连续3年的调查结果来看,调查区域N/P比值平均值在12.8:1-74.3:1之间,除2014年10月N/P比值平均值低于16:1外,其他航次N/P比值均高于16:1,大量的氮源有利于中肋骨条藻的大量繁殖(霍文毅等,2001)。溢油事故发生后,导致辽东湾海域油类的监测值整体升高,高值区主要集中在辽东湾西部和北部近岸海域。根据黄逸君等(2010、2011)对浮游植物进行原油污染慢性毒性效应研究发现,高浓度的原油胁迫对浮游植物的生长有极显著抑制作用,而低浓度的原油污染不会抑制浮游植物生长,反而可促进其生长。在高浓度WAF( $\geq 2.28 \text{ mg/L}$ )和低浓度WAF( $\leq 1.16 \text{ mg/L}$ )胁迫下,各季节浮游植物群落中中肋骨条藻的优势度均呈升高趋势,而其他优势种大都呈下降趋势。本次调查中油类监测值虽有所升高,但整体低于 $1.16 \text{ mg/L}$ 的水平,

符合促进中肋骨条藻生长的条件。因此中肋骨条藻能暴发性繁殖可能与海水中油类含量的升高也有一定关系。

综上所述,19-3油田溢油事故发生后,辽东湾浮游植物种类数在2012年有明显的降低,而2013年和2014年浮游植物种类数的上升,表明了浮游植物群落很强的自我修复能力。中肋骨条藻在夏季出现暴发性繁殖,可能与海水中油类含量的升高有一定关系。除此之外,溢油后浮游植物主要物种没有出现较大变化,浮游植物群落较稳定,生物多样性变化不大。

## 参 考 文 献

- 王君丽,刘春光,冯剑丰,等. 石油烃对海洋浮游植物生长的影响研究进展. 环境污染与防治, 2011, 4(4): 81-86
- 宋伦,周遵春,王年斌,等. 辽东湾浮游植物多样性及与海洋环境因子的关系. 海洋环境科学, 2007, 26(4): 365-368
- 栾莎,宫相忠,双秀芝,等. 2009年春季辽东湾网采浮游植物群落结构. 海洋科学, 2012, 36(5): 57-64
- 高伟,宫相忠,双秀芝,等. 2009年夏、冬季辽东湾网采浮游植物群落结构分析. 海洋湖沼通报, 2012 (4): 162-169
- 黄逸君,陈全震,曾江宁,等. 石油污染对海洋浮游植物群落生长的影响. 生态学报, 2011, 31(2): 513-521
- 傅明珠,孙萍,孙霞,等. 锦州湾浮游植物群落结构特征及其对环境变化的响应. 生态学报, 2014, 34(13): 3650-3660
- 黄逸君,江志兵,曾江宁,等. 石油烃污染对海洋浮游植物群落的短期毒性效应. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1095-1106
- 徐兆礼,陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鱼场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15
- 霍文毅,俞志明,邹景忠,等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 311-318
- Djomo JE, Dauta A, Ferrier V *et al.* Toxic effects of some major polyaromatic hydrocarbons found in crude oil and aquatic sediments on *Scenedesmus subspicatus*. Water Res, 2004, 38(7): 1817-1821
- Parab SR, Pandit RA, Kadam AN, *et al.* Effect of Bombay high crude oil and its water-soluble fraction on growth and metabolism of diatom *Thalassiosira* sp. Indian J Mar Sci, 2008, 37(3): 251-255
- Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. Am Sci, 1958, 46(11): 150-170

(编辑 江润林)

## Influence of 19-3 Oil Spill Accident on Phytoplankton Community in the Liaodong Bay

SONG Guangjun<sup>①</sup>, LI Ai, WU Jinhao, WANG Zhaohui

(Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Liaoning Key Laboratory of Marine Biological Resources and Ecology, Dalian, Liaoning 116023)

**Abstract** In this study we investigated the changes and contributing factors of species composition, cell abundance, biological diversity and dominant species of phytoplankton community in the Liaodong Bay, with emphasis on their correlation with the 19-3 oil spill accident in Penglai. Our analysis was based on the field data about phytoplankton community collected in the Liaodong Bay in May (Spring), August (Summer) and October (Autumn) from 2012 to 2014. It was found the number of phytoplankton species was the lowest in May 2012, and the highest in October 2013. Overall the number in 2012 was lower than those in 2013 and 2014. The cell abundance of the phytoplankton community rose unexpectedly in all three summer seasons. The maximum reached  $3072 \times 10^4$  ind/m<sup>3</sup> in August 2012, and the minimum ( $27 \times 10^4$  ind/m<sup>3</sup>) appeared in May 2012. The dominant species in different seasons were nearly unchanged between 2012 and 2014. The dominant species in May were *Paralia sulcata*, *Chaetoceros*, *Noctiluca scintillans*, and it was *Skeletonema costatum* in August. In October *Coscinodiscus*, *P. sulcata*, and *Chaetoceros* gained the dominance. Interestingly, *S. costatum*, a dominant microalga, underwent explosive reproduction in August 2012, which might be associated with the increased oil concentration in surface seawater in the Liaodong Bay. Correlation analysis was performed to explore the links between the environmental factors and parameters such as species composition, cell abundance, and biological diversity index. The results indicated that the alteration in phytoplankton community structure was significantly correlated with water temperature, COD, dissolved oxygen and nutrients. Furthermore, the community structure was also strongly affected by the oil concentration in surface seawater.

**Keywords** Oil pollution; Liaodong Bay; Phytoplankton; Community structure; Biological diversity index

<sup>①</sup> Corresponding author: SONG Guangjun, E-mail: sgj666@qq.com