

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.17086

黄河口邻近海域浮游植物群落及其多样性的长期变化 (1960—2010)

栾青杉¹, 康元德¹, 王俊^{1,2}

1. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 渔业资源与生态系统研究室, 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 研究了 1960—2010 年黄河口邻近海域浮游植物群落及其多样性的长期变化, 数据来源于 19 次调查 245 份样品。使用小型浮游生物网垂直采集浮游植物样品, 于光学显微镜下进行分类统计。共鉴定出浮游植物 108 种, 其中硅藻(Bacillariophyta)87 种, 甲藻(Pyrrophyta)17 种, 角毛藻(*Chaetoceros* spp.)和圆筛藻(*Coscinodiscus* spp.)分别出现了 27 种和 10 种。浮游植物总丰度年代际平均为 2.74×10^6 ind/m³, 在 20 世纪 80 年代出现峰值, 高达 16.8×10^6 ind/m³。硅藻在 20 世纪占据优势, 群落以角毛藻、圆筛藻等大的中心硅藻为主, 进入 21 世纪后出现小型化的趋势, 舟形藻(*Navicula* spp.)、新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)等羽纹硅藻以及具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)等底栖性物种开始形成优势。甲藻丰度出现了上升的趋势, 角藻(*Ceratium* spp.)、夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、原多甲藻(*Protoperidinium* spp.)开始增多。50 年来, 星脐圆筛藻(*C. asteromphalus*)、辐射圆筛藻(*C. radiatus*)、柔弱角毛藻(*C. debilis*)、伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)等物种在群落中一直占据较为明显的优势, 但是优势种组成演替和格局转换明显。在黄河持续断流和强厄尔诺事件的共同影响下, 口区浮游植物丰度和多样性在 20 世纪末降至最低, 平均仅为 87.7×10^4 ind/m³ 和 1.97(Shannon-Weaver 指数)。进入 21 世纪后, 调水调沙等人类活动对口区浮游植物丰度和多样性水平的改善产生了积极影响, 较 20 世纪末分别有了 2.3 倍和 16.8% 的增加, 呈现出稳步回升的趋势。对黄河口浮游植物群落及其多样性长期变化过程的研究, 为河口生态系统演变和健康保护、渔业资源的增殖养护提供了基础资料。

关键词: 浮游植物; 丰度; 多样性; 长期变化; 黄河口

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)05-0913-09

黄河口地处莱州湾与渤海湾之间, 是黄河入海的通道。黄河径流量和泥沙量的动态变化, 直接改变渤海近岸海水的盐度、营养盐水平和水体透明度, 进而影响到河口区的生物生产力及整个河口生态系统^[1-2]。浮游植物作为海洋生态系统的基础生产者, 对于水文环境条件的变化非常敏感, 特别是在河口^[3]、海湾^[4]、海峡^[5]等区域, 多变的物理化学环境驱动浮游植物在季节、年间、年代际出现明显的物种转换、丰度波动和群落演替的现象。

受流域气候和人类活动的影响, 黄河自 1972 年首次出现自然断流以来, 断流频率越来越高, 断流天数越来越长, 入海径流量的急剧减少, 直接影响到黄河对渤海营养盐的输送, 给河口三角洲的水文环境、生态平衡、生产活动带来不利影响^[1-2]。面对黄河长期水沙不平衡的问题, 黄河水利委员会自 2002 年以来, 定期对黄河进行调水调沙, 由此引发的入海径流量在短时间内激增, 对近海环境及口区生态系统产生了显著影响^[6]。

本研究对 1960—2010 这 50 年间黄河口邻近

收稿日期: 2017-03-07; 修订日期: 2017-05-28.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303050); 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB453302); “泰山学者”建设工程专项.

作者简介: 栾青杉(1981—), 副研究员, 从事海洋浮游植物生态学研究. E-mail: luanqs@ysfri.ac.cn

通信作者: 王俊, 研究员, 从事渔业资源增殖养护研究. E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn

海域网采浮游植物群落及其多样性的长期变化进行了研究,并通过与黄河断流、厄尔尼诺、调水调沙等事件的综合比较,分析浮游植物群落结构长期变化和格局转换的基本特征,探讨气候因素和人类活动影响口区浮游植物年代际变动的深层原因,旨在为河口生态系统健康保护、渔业资源增殖养护提供基础资料和参考依据。

1 材料和方法

1.1 样品采集

本研究样品采自黄河口邻近海域: 118.5~120°E, 37.5~38.5°N(图 1)。在 1960—2010 这 50 年间进行了 19 次季节性调查,总计 245 次采样(表 1)。浮游植物样品采集使用浅水 3 型浮游生物网(网口面积 0.1 m², 筛孔 77 μm)自底至表垂直拖网,样品转移至 1 L 的塑料瓶中,加入终浓度 5%的甲醛水溶液,常温避光保存。

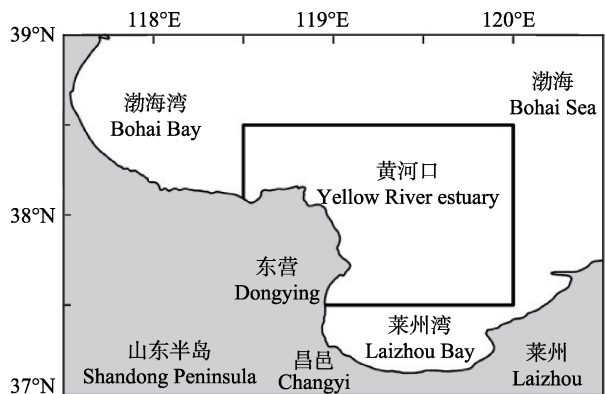


图 1 黄河口邻近海域浮游植物样品采集区域

Fig. 1 Sampling region of phytoplankton in adjoining waters of the Yellow River estuary

1.2 群落分析

浮游植物群落分析于实验室内进行,根据样品中浮游植物的多少进行稀释或浓缩,并标定到一定体积。取 0.5 mL 的亚样品(subsample)置于计数框中,然后在 Leica 光学显微镜下进行物种鉴定与细胞计数,物种分类依据其形态学上的差异,参考朱树屏等^[7]、金德祥等^[8]、Tomas^[9]的分类标准。

1.3 数据处理

浮游植物的物种丰富度、多样性、均匀度和优势度,分别采用 Margalef 指数(d_{Ma})、Shannon-

Weaver 指数(H')、Pielou 指数(J)和 Y 指数进行计算,具体公式参考文献[10]:

$$d_{Ma} = \frac{(S-1)}{\ln N}$$
$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \times \log_2 P_i$$
$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$
$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$

式中, N 为样品中所有物种的总个体数; S 为样品中的物种总数; P_i 为第 i 种的个体数与样品中总个体数的比值; n_i 为第 i 种的总个体数; f_i 为该种在各样品中出现的频率。本研究选取 $Y \geq 0.02$ 的物种为优势种进行分析。

表 1 黄河口邻近海域浮游植物采样基本信息
Tab. 1 Baseline information on phytoplankton sampling in adjoining waters of the Yellow River estuary

年代 period	调查时间 sampling time	采样点个数 number of samples
1960s	1960 年 5 月	30
	1960 年 8 月	34
	1960 年 11 月	27
1980s	1982 年 5 月	16
	1982 年 8 月	15
	1982 年 10 月	15
	1983 年 2 月	8
	1992 年 8 月	8
1990s	1992 年 10 月	11
	1993 年 2 月	8
	1993 年 5 月	8
	1998 年 5 月	6
	1998 年 8 月	6
	1998 年 10 月	6
	2004 年 5 月	9
2000s	2004 年 10 月	9
	2009 年 10 月	10
	2010 年 5 月	9
	2010 年 8 月	10

注: 表中所列调查资料皆为中国水产科学研究院黄海水产研究所未发表内部资料。

Note: Datasets in the table were obtained from the unpublished results from previous surveys by Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences.

2 结果与分析

2.1 物种组成及其格局转换

黄河口年代际浮游植物群落样品共计鉴定出浮游植物 108 种, 其中: 硅藻 35 属 87 种、甲藻 4 属 17 种, 其余为绿藻 2 种、金藻 1 种和蓝藻 1 种。角毛藻(*Chaetoceros* spp.)、圆筛藻(*Coscinodiscus* spp.)和海链藻(*Thalassiosira* spp.)分别出现了 27 种、10 种和 6 种, 占到硅藻物种数的 31.0%、11.5% 和 6.9%, 是硅藻中较大的类群。原多甲藻(*Protoperdinium* spp.)、角藻(*Ceratium* spp.)和鳍藻(*Dinophysis* spp.)分别出现了 8 种、5 种和 3 种, 占到甲藻物种数的 47.1%、29.4%和 17.6%, 是甲藻中较大的类群。

硅藻在 20 世纪占据优势, 群落以角毛藻、圆筛藻等大的中心硅藻为主, 进入 21 世纪后出现小型化的趋势, 舟形藻(*Navicula* spp.)、新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)等羽纹硅藻以及具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)开始形成优势。甲藻出现了增加的趋势, 角藻、夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、原多甲藻开始增多。50 年来, 星脐圆筛藻(*C. asteromphalus*)、辐射圆筛藻(*C. radiatus*)、柔弱角毛藻(*C. debilis*)、伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)等物种在群落中一直占据较为明显的优势。但是, 优势种组成演替明显, 由仅在 20 世纪形成优势的浮动弯角藻(*Eucampia zoodiacus*)、琼氏圆筛藻(*C. jonesianus*)、卡氏角毛藻(*C. castracanei*)、透明幅杆藻(*Bacteriastrum hyalinum*)、三角角藻(*C. tripos*)等, 转换到仅在 21 世纪形成优势的舟形藻、具槽帕拉藻、虹彩圆筛藻(*C. oculisiridis*)、新月菱形藻、叉状角藻(*C. furca*)等。

黄河口浮游植物群落中优势种的生态类型有: 广温种、温带种、暖温种和大洋种(表 2), 优势种的生态类型也出现了明显的年代际格局转换。50 年来, 广温种所占比例波动较小, 平均 70.1%(表 3); 温带种所占比例进入 20 世纪 90 年代后降低了 40.7%; 暖温种比例在 90 年代达到高峰, 较 21 世纪 60~80 年代增加了 1.2 倍; 大洋种生态类型在 21 世纪开始出现, 且占到了 5.6%的比例。

2.2 细胞丰度的年代际变化

50 年间, 黄河口浮游植物总细胞丰度变化在 $(6\sim 1679)\times 10^4$ ind/m³ 之间, 平均 2.74×10^6 ind/m³, 在 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪出现了 3 个丰度的高值(图 2), 分别达到 16.8×10^6 ind/m³、 6.9×10^6 ind/m³ 和 8.9×10^6 ind/m³。硅藻丰度在 $(5.4\sim 1640)\times 10^4$ ind/m³, 平均 2.62×10^6 ind/m³, 硅藻的长期变化趋势与总丰度的变化趋势较为一致, 并且直接决定了总浮游植物的 3 个峰值, 分别由双突角毛藻(*C. didymus*)、浮动弯角藻和北方劳德藻(*Lauderia borealis*)形成。甲藻丰度变化在 $(0.1\sim 106)\times 10^4$ ind/m³, 平均 12.5×10^4 ind/m³, 甲藻在 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪亦出现了 3 个峰值, 达到 38.4×10^4 ind/m³、 15.7×10^4 ind/m³ 和 106×10^4 ind/m³, 分别由三角角藻、夜光藻和叉状角藻控制。

甲/硅藻比显示黄河口浮游植物的群落结构亦出现了年代际的变化。在 20 世纪 60~80 年代, 甲/硅藻比一直处于较为稳定的水平, 平均 0.045。进入 20 世纪 90 年代和 21 世纪, 甲/硅藻比开始升高, 分别出现 0.96 和 0.34 的峰值。角毛藻丰度在 50 年间平均达到 10^6 ind/m³ 的水平, 在 1982 年夏季出现了一个极峰, 高达 14.2×10^6 ind/m³。圆筛藻丰度在 50 年间出现了先上升、后下降、再上升的趋势, 平均 18.5×10^4 ind/m³, 两个峰值分别为 20 世纪 80 年代的 77.1×10^4 ind/m³ 和 21 世纪的 48.7×10^4 个/m³, 低值出现在 1998 年夏季, 为 0.36×10^4 ind/m³。

2.3 多样性的长期变化

多样性指数的变化在一定程度上反映了浮游植物群落的稳定性程度。黄河口浮游植物的多样性在 20 世纪 60~80 年代保持在相对稳定的水平(图 3), Margalef 指数和 Shannon-Weaver 指数平均分别为 1.07 和 2.64。进入 90 年代后 d_{Ma} 和 H' 开始降低, 平均分别降低了 28.8%和 18.2%, 并于 1998 年春季分别降低至历史最低水平, 仅为 0.42 和 1.64。进入 21 世纪后多样性开始逐渐回升, d_{Ma} 和 H' 分别增加了 1.6 倍和 40.2%, 达到 1.08 和 2.30 的平均水平。

表 2 黄河口邻近海域浮游植物优势种组成的年代际变化

Tab. 2 Interdecadal changes on dominant phytoplankton composition in adjoining waters of the Yellow River estuary

生态类型 ecotype	中文名 Chinese name	拉丁文名 Latin name	年代 age			
			1960s	1980s	1990s	2000s
硅藻门 Bacillariophyta						
广温种 eurythermal species	冰河拟星杆藻	<i>Asterionopsis glacialis</i>				●
	透明幅杆藻	<i>Bacteriastrum hyalinum</i>		●	●	
	窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i>			●	
	卡氏角毛藻	<i>Chaetoceros castracanei</i>	●	●	●	
	扁面角毛藻	<i>Chaetoceros compressus</i>	●			
	双突角毛藻	<i>Chaetoceros didymus</i>		●		
	冕孢角毛藻	<i>Chaetoceros subsecundus</i>				●
	星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	●	●	●	●
	中心圆筛藻	<i>Coscinodiscus centralis</i>		●		
	虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculusiridis</i>				●
	辐射圆筛藻	<i>Coscinodiscus radiatus</i>	●	●	●	●
	布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i>	●		●	●
	浮动弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i>	●		●	
	斯氏几内亚藻	<i>Guinardia striata</i>		●		●
	北方劳德藻	<i>Lauderia borealis</i>				●
	舟形藻	<i>Navicula</i> spp.			●	●
	新月菱形藻	<i>Nitzschia closterium</i>				●
	具槽帕拉藻	<i>Paralia sulcata</i>				●
	尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	●	●	●	●
	尖刺伪菱形藻大西洋变种	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> var. <i>atlantica</i>		●		
温带种 temperate species	刚毛根管藻	<i>Rhizosolenia setigera</i>	●			●
	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	●	●	●	●
	伏氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	●		●	
	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	●			
	柔弱角毛藻	<i>Chaetoceros debilis</i>	●	●	●	●
	高孢角毛藻	<i>Chaetoceros mitra</i>	●			
暖温种 warm-temperate species	拟垂缘角毛藻	<i>Chaetoceros pseudocrinitus</i>	●			
	圆柱角毛藻	<i>Chaetoceros teres</i>		●		
	菱软几内亚藻	<i>Guinardia flaccida</i>		●		●
	诺氏海链藻	<i>Thalassiosira nordenskioldii</i>			●	
大洋种 oceanic species	短孢角毛藻	<i>Chaetoceros brevis</i>		●		
	窄面角毛藻	<i>Chaetoceros paradoxus</i>		●	●	
	暹罗角毛藻	<i>Chaetoceros siamense</i>			●	
	琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>	●			
	威氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus wailesii</i>			●	
	中华齿状藻	<i>Odontella sinensis</i>			●	
大洋种 oceanic species	翼鼻状藻印度变型	<i>Proboscia alata</i> f. <i>indica</i>				●
	偏心圆筛藻	<i>Coscinodiscus excentricus</i>				●
甲藻门 Pyrrophyta						
广温种 eurythermal species	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>				●
	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	●	●	●	●
暖温种 warm-temperate species	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	●		●	

注：表中结果皆为中国水产科学研究院黄海水产研究所未发表内部资料，“●”表示该种在相应时期出现并为群落优势种。

Note: Datasets in the table were obtained from the unpublished results from previous surveys by Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences. “●” indicates the dominant species during corresponding survey periods.

表 3 浮游植物优势种生态类型所占比例的年代际变化
Tab. 3 Interdecadal changes on ecotypes of dominant phytoplankton species

生态类型 ecotype	年代 age				%
	1960s	1980s	1990s	2000s	
广温种 eurythermal species	70.6	68.8	63.2	77.8	
温带种 temperate species	17.6	18.8	10.5	11.1	
暖温种 warm-temperate species	11.8	12.5	26.3	5.6	
大洋种 oceanic species	0	0	0	5.6	

注: 表中结果皆为中国水产科学研究院黄海水产研究所未发表内部资料。

Note: Datasets in the table were obtained from the unpublished results from previous surveys by Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences.

3 讨论

3.1 黄河口浮游植物生态分布及其季节性变化

黄河口浮游植物以近岸类群为主^[11], 春季, 常见翼鼻状藻印度变型(*Proboscia alata* f. *indica*)、密联角毛藻(*C. densus*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、旋链角毛藻(*C. curvisetus*)、爱氏辐环藻(*Actinocyclus ehrenbergii*)等高盐物种; 夏季, 异常角毛藻(*C. abnormis*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)等低盐物种以及斜纹藻(*Pleurosigma* spp.)、布纹藻(*Gyrosigma* spp.)等底栖性物种开始形成优势; 秋冬季, 菱形海线藻(*T. nitzschoides*)、窄隙角毛藻(*C. affinis*)等高盐物种渐增。

1984 年的浮游植物季节性资料显示^[11]: 夏季出现丰度的极峰, 高达 540×10^4 ind/m³, 秋季峰值次之, 达到 420×10^4 ind/m³, 季度月平均为 327×10^4 ind/m³。本研究分析了 1982—1983 年间的结果也发现了夏季丰度最高, 秋季次之, 其他季节较低的季节性变化规律, 四季平均为 529×10^4 ind/m³, 与同期资料较为一致。此外, 仅从夏季来看, 浮游植物平均丰度亦存在年间的差异: 21.2×10^4 ind/m³^[12] (2009 年)、 564×10^4 ind/m³^[3] (2005 年)、 971×10^4 ind/m³^[13] (2013 年)、 2296×10^4 ind/m³^[14] (2006 年)等, 本研究夏季最低出现在 1998 年, 仅为 6×10^4 ind/m³, 最高出现在 1982 年, 高达 1679×10^4 ind/m³。由此可见, 单一季节的浮游植物亦出现明显的年代际波动。

3.2 黄河口浮游植物长期变化的原因

50 年来, 区域气候的自然变化与人类活动事件, 特别是黄河断流、强厄尔尼诺、调水调沙等事件, 对黄河口浮游植物群落的长期变动和格局转换产生了较为明显的影响(表 4)。

在人为和自然因素的共同影响下, 黄河自 1972 至 1999 共计 28 年间, 出现断流 22 次, 累积断流 1089 d。特别是进入 20 世纪 90 年代, 年断流天数持续增加, 至 1997 年达到全年断流 226 d 的峰值^[1-2, 15]。断流引起黄河口海域盐度升高, 外海水往口区推进, 水体透明度增加, 有利于浮游植物的生长。但是, 断流带来的营养盐(N、P、Si)入海量的急剧减少及其结构的改变, 又对浮游植物产生限制性的不利影响。本研究发现, 与 20 世纪 80 年代相比, 在 1991—1996 年间, 黄河年均断流天数增加了 5.4 倍, 口区浮游植物丰度和多样性相应降低了 46.7%和 8.4%; 在 1997—1998 年间, 年均断流天数增加了 12.3 倍, 丰度和多样性相应降低了 83.4%和 21.5%。此外, 由于甲藻对营养盐变化的敏感性要低于硅藻等类群^[6], 甲/硅藻比进入 20 世纪 90 年代后出现了明显的升高, 浮游植物群落结构发生改变。由此可见, 断流带来的口区营养盐水平下降和结构改变对浮游植物产生的不利影响, 要显著高于光照条件的改善。

气候振荡事件(热带风暴、飓风、干旱等)对河口浮游植物群落结构转换的影响(比如 Neuse 河口的长时间序列研究^[16]), 时常能够超过人类活动引起的营养盐输入的影响, 特别是在控制藻华的发生阈值、持续时间、空间范围和程度等方面。黄河断流的发生和持续与厄尔尼诺事件的频发存在遥相关的联系^[15]。比如, 1997—1998 年出现了史上最强的厄尔尼诺现象, 随之而来的则是两年 368 天的断流。径流量的急剧减少, 除了引起河口浮游植物丰度的降低以外, 外海水的进入也导致群落优势种组成发生改变, 一些暖水性物种会向近岸群落入侵^[5, 17]。本研究发现了相似的现象, 温带种生态类型所占比例在 20 世纪 90 年代出现了大幅的下降, 相反, 暖温种比例则有了成倍的提升, 并且群落中开始出现暖水种和大洋种, 如洛氏角毛藻(*C. lorenzianus*)、太阳漂流藻(*Planktoniella*

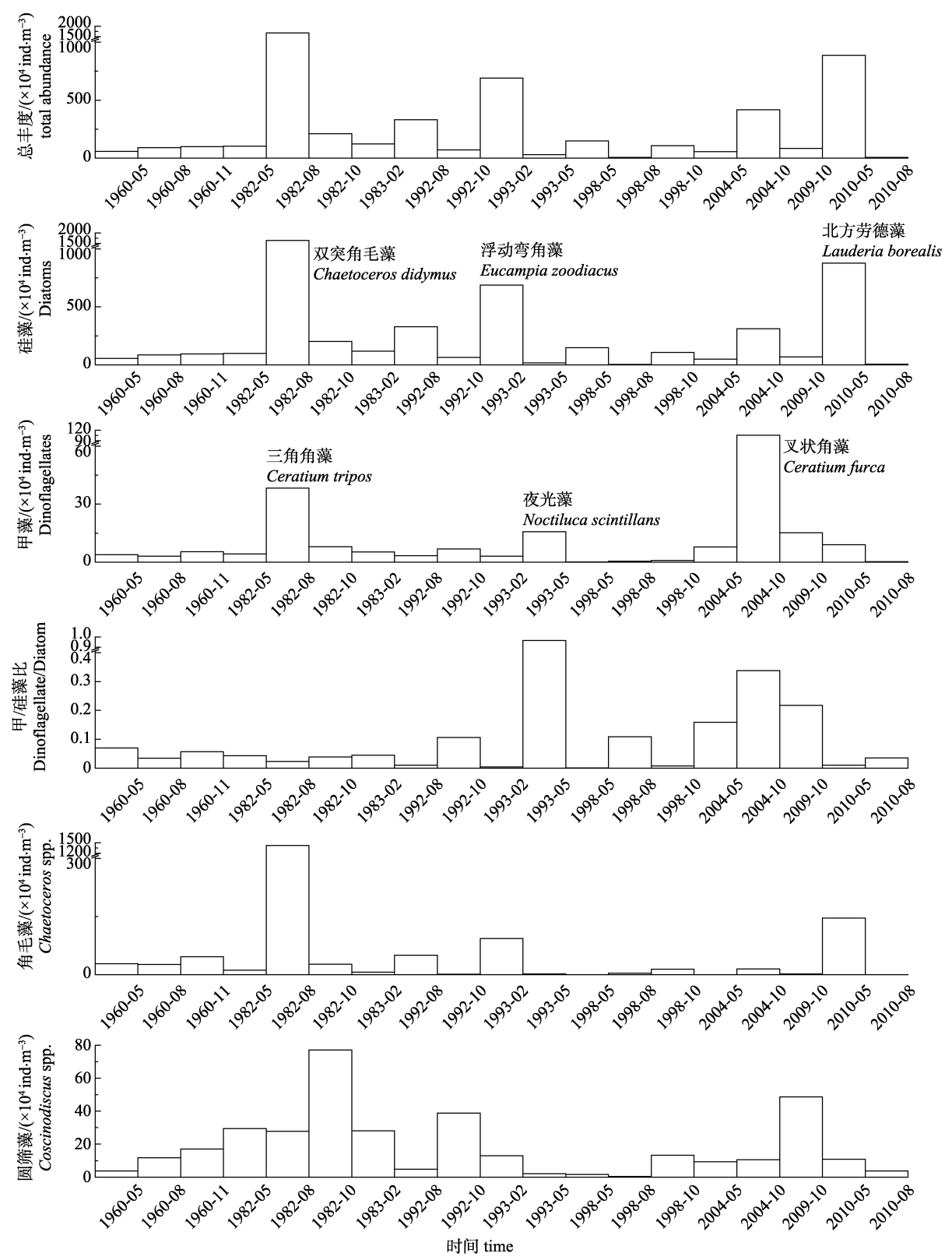


图 2 黄河口邻近海域浮游植物细胞丰度的年代际变化

图中数据来源于中国水产科学研究院黄海水产研究所未发表内部资料。

Fig. 2 Interdecadal changes on phytoplankton cell abundances in adjoining waters of the Yellow River estuary

Datasets in the figure were obtained from the unpublished results from previous surveys by Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences.

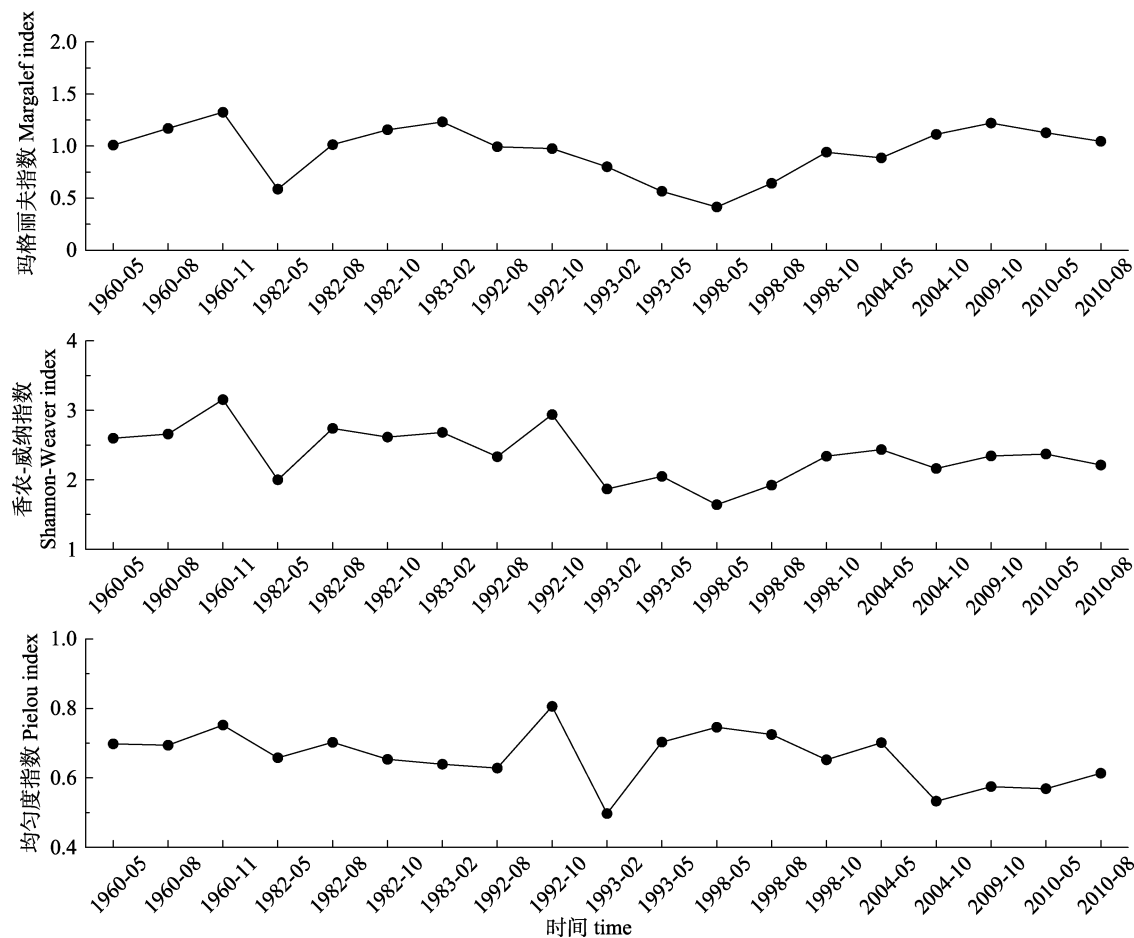


图 3 黄河口邻近海域浮游植物多样性的年代际变化

图中数据来源于中国水产科学研究院黄海水产研究所未发表内部资料。

Fig. 3 Interdecadal changes on phytoplankton diversity in adjoining waters of the Yellow River estuary
Datasets in the figure were obtained from the unpublished results from previous surveys by Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences.

表 4 气候与人类活动事件对黄河口邻近海域浮游植物的影响

Tab. 4 Effects of climate and anthropogenic activities on phytoplankton in adjoining waters of the Yellow River estuary

年代 period	年份 year	累积(年均)断流天数/d cumulative (year average) days of absence of river flow	平均丰度/ ($\times 10^4$ ind/ m^3) average abundances	多样性指数 diversity index, H'	事件 event
1960s	—	—	83.2	2.8	—
1970s	1972, 1974—1976, 1978—1979	86(14.3)	—	—	断流 flow interruption
1980s	1980—1983, 1987—1989	105(15)	529	2.51	断流 flow interruption
1990s	1991—1996	488(81.3)	282	2.3	断流 flow interruption
	1997	226	—	—	断流 flow interruption
	1998	142	87.7	1.97	厄尔尼诺 El Niño
	1999	42	—	—	断流 flow interruption
2000s	—	—	291	2.3	调水调沙 water-sediment regulation

注：表中事件与断流天数资料来源于文献[1—2, 15].
Note: Events and flow interruption days in the table were obtained from literatures[1—2, 15].

sol)、掌状冠盖藻(*Stephanopyxis palmeriana*)、中 型等。
华齿状藻(*Odontella sinensis*)和翼鼻状藻印度变 自 2002 年开展的黄河调水调沙工程, 通过短

时间内径流量的激增,携带大量水沙入海,改善了口区的物理-化学环境(尤其是营养盐水平和结构),并且在一定程度上缓解了黄河口浮游植物普遍存在的P限制和局部区域的Si限制问题^[6, 13],使得口区浮游植物丰度和多样性水平逐渐恢复,对近岸环境及河口生态系统健康带来有利影响。本研究结果显示进入21世纪后,黄河口浮游植物丰度和多样性出现了稳步回升的趋势,较1998年分别有了2.3倍和16.8%的增加,恢复到了1991—1996年间的平均水平。由此可见,黄河调水调沙工程对口区浮游植物群落的格局转换产生了积极的影响。

河口浮游植物的分布和变动受多种环境因素的制约,除了基本的温盐、透明度、营养盐之外,水动力和摄食过程亦对其产生影响。浮游植物对气候变化和人类活动的适应性响应具有连续性和复杂性,对于黄河口浮游植物长期变动、格局转换及其驱动因素的研究,还需要更长时间序列资料的积累来不断验证和完善。

参考文献:

- [1] Tian J, Wang M. Study on the affect of the drying up of the Yellow River on the ecological environment in the seawater near the delta[J]. Marine Environmental Science, 1997, 16(3): 59–65. [田家怡, 王民. 黄河断流对三角洲附近海域生态环境影响的研究[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(3): 59–65.]
- [2] Ye Q C. Flow interruptions and their environmental impact on the Yellow River delta[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(5): 385–393. [叶青超. 黄河断流对三角洲环境的恶性影响[J]. 地理学报, 1998, 53(5): 385–393.]
- [3] Zhang J M, Liu S, Zhang Q, et al. Population variation of phytoplankton around Yellow River Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(6): 834–837. [张继民, 刘霜, 张琦, 等. 黄河口附近海域浮游植物种群变化[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 834–837.]
- [4] Sun X X, Sun S, Wu Y L, et al. Long-term changes of phytoplankton community structure in the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(5): 639–646. [孙晓霞, 孙松, 吴玉霖, 等. 胶州湾网采浮游植物群落结构的长期变化[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 639–646.]
- [5] Lin G M, Yang Q L. Interdecadal variation in distribution features of phytoplankton in the Taiwan Strait under global climate change[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(5): 615–623. [林更铭, 杨清良. 全球气候变化背景下台湾海峡浮游植物的长期变化[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(5): 615–623.]
- [6] Su Z J, Wang Y Y, Dong Z J, et al. Response of phytoplankton assemblages to the water sediment regulation in the adjacent sea of the Yellow River mouth[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(4): 62–74. [苏芝娟, 王玉珏, 董志军, 等. 调水调沙后黄河口邻近海域浮游植物群落响应特征[J]. 海洋学报, 2015, 37(4): 62–74.]
- [7] Zhu S P, Guo Y J. Studies on the genus *Chaetoceros* Ehrenberg from the fishing ground of the mackerel, *Pneumatophorus japonicus* (Houttuyn), off the Shantung coast from Chefoo to Weihai. Part I. A systematic study[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1957, 1(1): 27–94. [朱树屏, 郭玉洁. 烟台、威海鲈鱼渔场及其附近海区角毛硅藻属的研究 I. 分类的研究[J]. 海洋与湖沼, 1957, 1(1): 27–94.]
- [8] Jin D X, Chen J H, Huang K G. Planktonic Diatoms in China Seas[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1965. [金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.]
- [9] Tomas C R. Identifying Marine Phytoplankton[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [10] Luan Q S, Sun J Q, Wu Q, et al. Phytoplankton community in adjoining water of the Antarctic Peninsula during austral summer 2010[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(4): 508–518. [栾青杉, 孙坚强, 吴强, 等. 2010年夏南极半岛邻近海域的浮游植物群落[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(4): 508–518.]
- [11] Compilation Committee of the China Bays & Estuaries. China Bays & Estuaries (14th fascicule)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1998. [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第十四分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998.]
- [12] Liu X, Liu G. Net-phytoplankton community structure of the Huanghe Estuary and its adjacent area in the summer of 2009[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(1): 153–162. [刘晓彤, 刘光兴. 2009年夏季黄河口及其邻近水域网采浮游植物的群落结构[J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 153–162.]
- [13] Qin X, Xu B D, Yang X G, et al. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental variables in summer in the Yellow River Estuary and its adjacent waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(5): 711–720. [秦雪, 徐宾铎, 杨晓改, 等. 黄河口及其邻近水域夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2016, 40(5): 711–720.]
- [14] Leng Y, Zhao S, Liu S, et al. Distribution characteristics of phytoplankton in the Estuary of Yellow River during summer[J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(6): 41–46. [冷宇, 赵升, 刘霜, 等. 黄河口海域夏季浮游植物的分布特征[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(6): 41–46.]

- [15] Lai B X. The connection from far between the Huanghe River flux suspend and El Niño[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2005, 25(6): 594–610. [赖比星. 黄河断流与 El Niño 事件的遥相关[J]. *气象科学*, 2005, 25(6): 594–610.]
- [16] Paerl H W, Rossignol K L, Hall S N, et al. Phytoplankton community indicators of short- and longterm ecological change in the anthropogenically and climatically impacted neuse river estuary, North Carolina, USA[J]. *Estu Coasts*, 2010, 33: 485–497.
- [17] Avaria S, Munoz P. Effects of the 1982–1983 El Niño on the marine phytoplankton off northern Chile[J]. *J Geophys Res*, 1987, 92(13): 14369–14382.

Long-term changes of phytoplankton community and diversity in adjoining waters of the Yellow River estuary (1960–2010)

LUAN Qingshan¹, KANG Yuande¹, WANG Jun^{1,2}

1. Laboratory for Fishery Resources and Ecosystem, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Function Laboratory for Marine Ecology and Environmental Sciences; Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: Based on 245 samples collected in 19 cruises from 1960 to 2010 in adjoining waters of the Yellow River estuary, the long-term changes of the phytoplankton community and diversity were analyzed. These samples were towed from the seafloor to the surface at each site by using a standard phytoplankton net and subsequently checked for the species composition and cell abundance under an optical microscope in the laboratory. A total of 108 species were recorded, of which 87 were diatoms and 17 were dinoflagellates. *Chaetoceros* spp. and *Coscinodiscus* spp. were the larger groups, with 27 and 10 species documented, respectively. The average total phytoplankton abundance during the last fifty years was 2.74×10^6 ind/m³, with a peak of 16.8×10^6 ind/m³ in the 1980s. Diatoms dominated the community in the last century, such as the large centric diatoms *Chaetoceros* spp. and *Coscinodiscus* spp. However, the species in this century shifted to pennate diatoms like *Navicula* spp. and *Nitzschia closterium*, as well as benthic species like *Paralia sulcata*. There was an increasing trend in abundance of the dinoflagellates *Ceratium* spp., *Noctiluca scintillans*, and *Protoperdinium* spp. During the past fifty years, *Coscinodiscus asteromphalus*, *Coscinodiscus radiatus*, *Coscinodiscus debilis*, and *Thalassionema frauenfeldii* were dominant in the community. However, the composition of dominant phytoplanktons had indeed changed and shifted. Under the co-influence of the absence of river flow and a strong El Niño event, the species abundances and diversity had decreased to the lowest levels during the last century, with average values only being 87.7×10^4 ind/m³ (Shannon-Weaver index=1.97). During this century, however, the phytoplankton community and diversity in the Yellow River estuary have been altering under human activity, such as water-sediment regulation, with a steady recovery of 2.3 times and 16.8% increase over the levels at the end of the last century. This study on the long-term shift in phytoplankton community and diversity will provide a basic background for future protection of the estuarine ecosystem and enhancement of fishery resources in the adjoining waters of the Yellow River estuary.

Key words: phytoplankton; abundance; diversity; long-term changes; Yellow River estuary

Corresponding author: WANG Jun. E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn