

黎 慧, 万夕和, 贲成恺, 等. 南黄海辐射沙脊群海域浮游植物群落结构特征及主要环境影响因子[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(1): 231–235. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.01.043

# 南黄海辐射沙脊群海域浮游植物群落结构特征 及主要环境影响因子

黎 慧, 万夕和, 贲成恺, 王李宝, 沈 辉, 史文军, 乔 毅, 张朝晖

(江苏省海洋水产研究所, 江苏南通 226007)

**摘要:**根据 2011 年 5、8、10 月及 2012 年 2 月对南黄海辐射沙脊群海域 4 个航次的调查, 获取了全年浮游植物的种类、数量和优势种等数据。结果显示, 辐射沙脊群海域在全年调查中共鉴定出浮游植物 60 种, 其中硅藻门 52 种, 占绝对优势。中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、加氏星杆藻(*Asterionella kariana*)和有翼圆筛藻(*Coscinodiscus bipartitus*) 在 4 个季节均为优势种; 不同季节藻类丰富度差异明显, 以秋季最多, 为 40 种, 多样性和均匀度指数差异不明显。通过分析该海区浮游植物群落结构与环境因子间关系发现, 相同属种类在典型对应分析(CCA)坐标中占据相似的生态位, 且相对位置较近; 与环境因子的关系也相似。

**关键词:**环境因子; 浮游植物群落结构; 南黄海; 辐射沙脊群

**中图分类号:** X834; S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)01-0231-05

浮游植物是海洋生态系统的重要组成部分, 其种群分布和结构特征直接影响海洋的整个生态系统<sup>[1-3]</sup>。浮游植物的种类、数量及群落结构与海水环境因子密切相关<sup>[4-5]</sup>, 因此探究浮游植物分布特征及海洋环境状况具有重要的生态学意义<sup>[6-7]</sup>。目前, 已有多统计方法应用于生物群落结构与环境关系的研究, 如相关性分析、典型对应分析等, 在分析浮游植物群落与环境的关系方面逐渐得到广泛运用<sup>[8-9]</sup>。

南黄海辐射沙脊群位于江苏省岸外海域, 面积约为 2.8 万 km<sup>2</sup>, 由 70 多条沙脊和沙脊间潮流通道

组成, 呈褶扇状向海辐射, 是世界上最大的潮间带辐射状水下沙脊<sup>[10-12]</sup>。南黄海辐射沙脊群是优越的“海洋牧场”, 丰富的海洋生物资源交织成复杂的海洋生物网。近年来, 关于南黄海辐射沙脊群附近海域的水文动力及地质地貌等方面的研究报道较多<sup>[13-14]</sup>, 但对本海域的浮游植物群落组成及水质环境状况鲜有报道。本研究通过对该海域浮游植物群落组成和环境因子的调查, 对其进行典型的对应分析, 确定影响浮游植物组成的重要环境因子, 为南黄海辐射沙脊群的开发提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查站位及时间

根据南黄海辐射沙脊群的地理位置及海洋环境资料<sup>[2-5]</sup>, 本调查在“东沙”和“高泥”人工岛工程海域(32°20′~33°30′N、120°40′E~岸线)设置 5 条调查断面, 共 15 个站位。调查时间为 2011 年 5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)及 2012 年 2 月(冬季), 站位分布见图 1。

收稿日期: 2018-09-30

基金项目: 江苏省重点研发计划-现代农业(编号: BE2017384); 江苏省南通市科技项目-应用基础研究(编号: MS12015076); 江苏省渔业科技类项目(编号: Y2017-20)。

作者简介: 黎 慧(1985—), 女, 山东泰安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋环境与生物学研究。Tel: (0513) 85223630; E-mail: xh0922@163.com。

通信作者: 张朝晖, 博士, 研究员, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: zzh6495@sohu.com。

[18] 夏增禄. 土壤环境容量研究[M]. 北京: 气象出版社, 1986.

[19] Haldar M, Mandal L N. Effect of phosphorus and zinc on the growth and phosphorus, zinc, copper, iron and manganese nutrition of rice [J]. Plant and Soil, 1981, 59(3): 415–425.

[20] McLaughlin M J, Palmer L T, Tiller K G, et al. Increased soil salinity cause elevated cadmium concentrations in field-grown

potato tuber[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(5): 1013–1018.

[21] Morishita T, Fumoto N, Yoshizawa T, et al. Varietal differences in cadmium levels of rice grains of Japonica, Indica, Javanica and hybrid varieties produced in the same plot of a field [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2016, 33(4): 629–637.

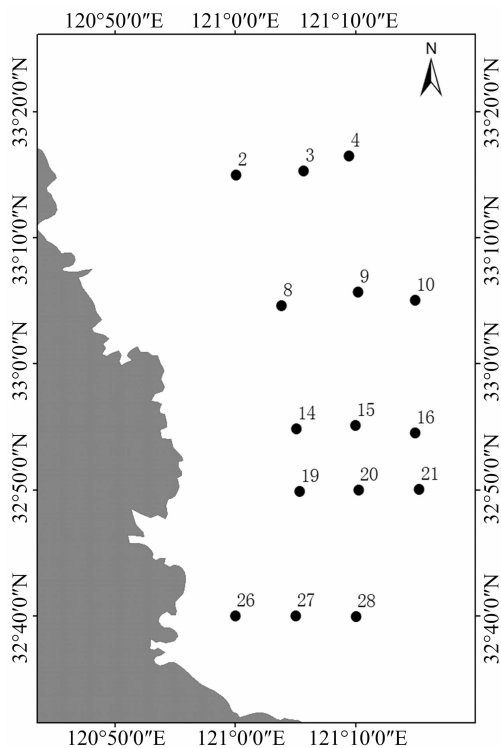


图1 南黄海辐射沙脊群海域调查站位分布

## 1.2 样品的采集与处理

**1.2.1 环境样品的采集与分析** 环境样品的采集、保存及分析方法均参照 GB 12763.4—2007《海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查》和 GB 17378.4—2007《海洋监测规范 第4部分:海水分析》进行<sup>[15-16]</sup>。采集表层水样,温度、透明度、盐度在现场用温盐深仪(CTD)测得,pH值用酸度计测量、溶解氧固定后用碘量法测量其含量,样品在现场经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后,将滤膜冷冻,用质量法测定总悬浮物含量;将样品带回实验室后用碱性高锰酸钾法测定化学需氧量(COD);NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P 含量测定法:水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜(450 °C 灼烧 4 h)过滤后置于聚乙烯瓶中,-20 °C 冷冻保存,带回实验室用 Lachat 8500 流动注射分析仪进行测定,NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P 含量分别采用镉柱还原法、萘乙二胺分光光度法、靛酚蓝法和磷钼蓝分光光度法进行测定。叶绿素 a 含量测定法采集表层水样 500 mL,现场过滤后带回实验室用紫外可见分光光度计测定叶绿素 a 含量<sup>[17]</sup>。

**1.2.2 藻类样品采集与分析** 浮游植物的采集、保存及分析方法均参照 GB 12763.6—2007《海洋调查规范 第6部分海水生物调查》进行<sup>[18-19]</sup>。浮游植物定性样品用浅水型浮游生物网(Ⅲ型)自底

至表垂直拖网采集,定量样品用采水器采集 1 L 表层水样于聚乙烯瓶中,加入 5% 福尔马林溶液进行固定,在实验室浓缩至 50 mL,用 0.1 mL 浮游植物计数框进行定性与定量分析。

浮游植物种类鉴定参照《中国淡水藻类》《中国常见淡水浮游藻类图谱》《中国内陆水域常见藻类图谱》<sup>[20-22]</sup>;数量采用 0.1 mL 藻类计数框计数法,使用光学显微镜在 200 倍下进行定性鉴定以及定量计数,浮游植物的计数方法为上镜视野法,将定量样品充分摇匀,迅速吸出 0.1 mL 置于计数框内(面积 20 mm × 20 mm)。盖上盖玻片后,在高倍镜下选择 3~5 行逐行计数,数量少时可全片计数。每个样品重复计数 2 片,取平均值记录,显微镜型号为尼康 Ti。

## 1.3 数据处理与统计分析

**1.3.1 计算公式如下** 多样性指数(Shannon - Wiener 指数)<sup>[23]</sup>:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i;$$

其中: $P_i = N_i/N$ 。

丰富度指数(Margalef 指数):

$$D = (S - 1) / \ln N。$$

均匀度指数(Pielou):

$$J = H / \ln S。$$

优势度:

$$Y = P_i f_i。$$

式中: $S$  为浮游植物种类总数, $P_i$  为第  $i$  种的个数( $N_i$ )与总个数( $N$ )的比值; $f_i$  为第  $i$  种出现的频率。当  $Y \geq 0.02$  时,该物种被视为优势种。

**1.3.2 典型对应分析(CCA)** 使用 Canoco 4.5 软件分析各季节浮游植物物种分布与环境因子之间的关系,为简化分析数据,物种数据经过筛选,选择在各站位的出现频率为 25%、相对丰度为 0.1% 的种类进行排序。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物种类组成

南黄海辐射沙脊群海域全年共发现浮游植物 60 种,属于 4 门,其中硅藻门最多,有 52 种,甲藻门 4 种,绿藻门 3 种,蓝藻门 1 种。物种丰富度呈现出明显的季节特征,其中秋季最多,共发现 40 种,属于 4 门,硅藻门 35 种,绿藻门 3 种,甲藻门和蓝藻门各 1 种;春季共发现 17 种,均是硅藻门;各属中圆筛藻属最多 8 种;夏季共发现 18 种,属于 2 门,其中硅藻

门 16 种,甲藻门 2 种;冬季共发现 22 种,属于 2 门,硅藻门 21 种,甲藻门 1 种。由表 1 可知,全年各季节各种的丰度度指数和均匀度指数差别不明显。

表 1 南黄海辐射沙脊群海域各个季节浮游植物的多样性、丰度度和均匀度指数

季节	多样性指数 ( <i>H'</i> )	丰富度指数 ( <i>D</i> )	均匀度指数 ( <i>J</i> )
春季	1.42	0.69	0.47
夏季	1.39	0.69	0.46
秋季	1.49	0.72	0.49
冬季	1.48	0.71	0.50

2.2 优势种

由表 2 可知,辐射沙脊群海域春季浮游植物优

势种主要为加氏星杆藻、奇异菱形藻、琼氏圆筛藻,其中加氏星杆藻优势度最高,占总细胞丰度 69.76%;夏季中肋骨条藻无论是在平均丰度上还是优势度上均占有绝对优势,其优势度为 0.769,其次为有翼圆筛藻,中肋骨条藻和有翼圆筛藻,它们在每个站位均有出现;秋季优势种的种类全年最多,有奇异菱形藻、条纹小环藻、爱氏辐环藻、扭曲小环藻和菱形藻属等;冬季优势种有中肋骨条藻、加氏星杆藻、具槽直链藻和彩虹圆筛藻等,其中中肋骨条藻的出现频率为 100%。中肋骨条藻、加氏星杆藻和有翼圆筛藻在全年都为优势种(表 3)。

表 2 南黄海辐射沙脊群海域各个季节浮游植物优势种组成及优势度指数

季节	物种	出现频率 (%)	平均丰度 (ind./m <sup>3</sup> )	占总细胞丰度的比例 (%)	优势度 <i>Y</i>
春季	加氏星杆藻 ( <i>Asterionella kariana</i> )	40.00	291	69.76	0.279
	奇异菱形藻 ( <i>Nitzschia paradoxa</i> )	33.33	40	9.60	0.032
	琼氏圆筛藻 ( <i>Coscinodiscus jonesianus</i> )	66.67	13	3.04	0.020
夏季	中肋骨条藻 ( <i>Skelrtonema costatum</i> )	100.00	2 092	76.91	0.769
	有翼圆筛藻 ( <i>C. bipartitus</i> )	100.00	85	3.12	0.031
	布氏双尾藻 ( <i>Ditylum brightwellii</i> )	86.67	66	2.41	0.021
秋季	奇异菱形藻 ( <i>N. paradoxa</i> )	60.00	223	26.17	0.157
	条纹小环藻 ( <i>Cyclotella striata</i> )	60.00	75	8.79	0.053
	爱氏辐环藻 ( <i>Actinocyclus ehrenbergii</i> )	80.00	48	5.66	0.045
	扭曲小环藻 ( <i>C. comta</i> )	73.33	40	4.69	0.034
	菱形藻属. ( <i>Nitzschia</i> sp.)	46.67	47	5.47	0.026
	辐射圆筛藻 ( <i>C. radiatus</i> )	66.67	32	3.71	0.025
	有翼圆筛藻 ( <i>C. bipartitus</i> )	66.67	30	3.52	0.023
冬季	中肋骨条藻 ( <i>Skelrtonema costatum</i> )	100.00	843	54.64	0.546
	加氏星杆藻 ( <i>A. kariana</i> )	73.33	315	20.41	0.150
	具槽直链藻 ( <i>Melosira sulcata</i> )	60.00	125	8.10	0.049
	虹彩圆筛藻 ( <i>C. oculus - iridis</i> )	73.33	57	3.67	0.027
	新月菱形藻 ( <i>N. closterium</i> )	60.00	63	4.10	0.025

表 3 辐射沙脊群浮游植物全年优势种组成

种名	出现频率 (%)	平均丰度 (ind./m <sup>3</sup> )	占总细胞丰度的比例 (%)	优势度
中肋骨条藻	55.00	745	53.83	0.296
加氏星杆藻	28.33	151	10.95	0.031
有翼圆筛藻	71.67	39	2.80	0.020

2.3 浮游植物细胞丰度

全年辐射沙脊群浮游植物总细胞丰度变动范围为 841 × 10<sup>4</sup> ~ 2 668 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>,平均值为 1 383 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>。其中,夏季各站的平均细胞丰度最高,达 2 720 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>,冬季和秋季次之,分别为 1 543 × 10<sup>4</sup>、853 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>,春季最低,为 417 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>。

春季辐射沙脊群浮游植物生物密度平均为

417 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>,范围为 40 × 10<sup>4</sup> ~ 3 430 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>。夏季辐射沙脊群浮游植物生物密度平均为 2 720 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>,范围为 330 × 10<sup>4</sup> ~ 9 210 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>。秋季辐射沙脊群浮游植物生物密度平均为 853 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>,范围为 125 × 10<sup>4</sup> ~ 3 025 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>。冬季辐射沙脊群浮游植物生物密度平均为 1 543 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>,范围为 900 × 10<sup>4</sup> ~ 2 325 × 10<sup>4</sup> ind./m<sup>3</sup>。全年季辐射沙脊

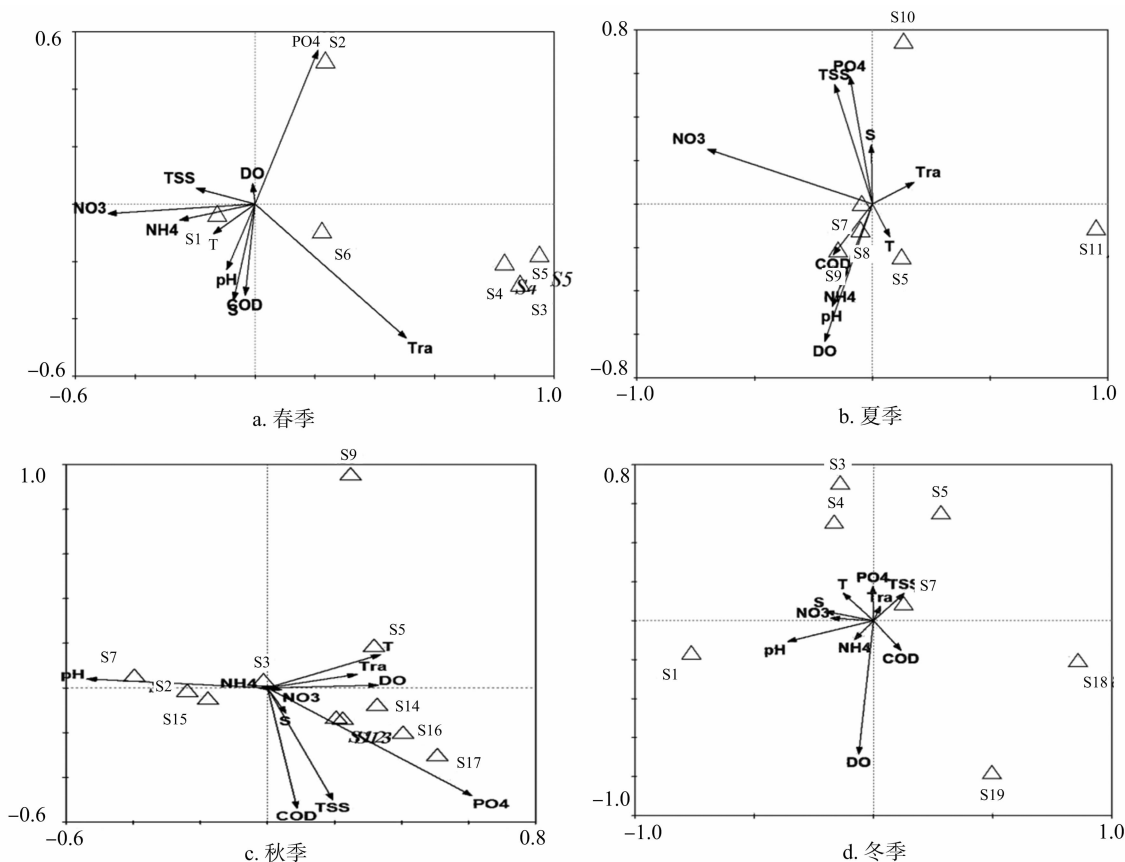
## 2.4 浮游植物丰度与环境因子的典型对应分析

表 4 进行 CCA 排序的浮游植物种类编号

编号	种类	编号	种类
S1	加氏星杆藻	S11	丹麦细柱藻
S2	奇异菱形藻	S12	条纹小环藻
S3	琼氏圆筛藻	S13	爱氏辐环藻
S4	虹彩圆筛藻	S14	扭曲小环藻
S5	有翼圆筛藻	S15	菱形藻属
S6	线形圆筛藻	S16	辐射圆筛藻
S7	中肋骨条藻	S17	小环藻属
S8	布氏双尾藻	S18	具槽直链藻
S9	菱形海线藻	S19	新月菱形藻
S10	诺氏海链藻		

落分布和种类分布间相关程度的大小,连线越长,说有相关性越大,反之越小。箭头连线和排序轴的夹角代表某个环境因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高;反之越低<sup>[24-29]</sup>。

由图 2 可知, 春季 4 种圆筛藻都集中在轴 1 (axis 1) 正方向, 与透明度和磷酸盐含量呈正相关, 而加氏星杆藻在轴 1 负方向, 与无机氮含量、pH 值、化学需氧量呈明显正相关<sup>[25]</sup>; 夏季诺氏海链藻与磷酸盐含量呈明显正相关, 盐度、透明度、硝酸盐含量、磷酸盐含量在轴 2 (axis 2) 的正方向, 中肋骨条藻、布氏双尾藻和菱形海线藻在轴 1 的负方向上, 与化学需氧量、铵态氮含量呈负相关<sup>[30-32]</sup>; 秋季种类较多, 其中小环藻和圆筛藻都集中在轴 1 (axis 1) 的正方向, 与透明度、磷酸盐含量等呈正相关, 与春季的规律类似, 中肋骨条藻、菱形藻和菱形海线藻都集中在轴 1 的负方向上, 与 pH 值呈负相关; 冬季圆筛藻集中在轴 2 的正方向, 与铵态氮含量、透明度、磷酸盐含量等呈正相关。总体来看, 相同属的种类在 CCA 坐标中占据相似的生态位, 且相对位置较近, 与环境因子的关系也类似。



$T$ —温度;  $S$ —盐度;  $Tra$ —透明度;  $DO$ —溶氧量;  $COD$ —化学需氧量;  $NH_4^+-N$ —铵态氮含量;  $NO_3^--N$ —硝态氮含量;  $PO_4^{3-}$ —磷酸盐含量

图2 不同季节浮游植物种类与环境因子间的 CCA 排序

### 3 结论

2011—2012 年南黄海辐射沙脊群海域在调查中共鉴定出浮游植物 60 种,其中硅藻门有 52 种,占绝对优势。全年的浮游植物优势种为中肋骨条藻、加氏星杆藻和有翼圆筛藻在全年都为优势种。

南黄海辐射沙脊群海域 4 个季节物种丰富度差异明显,以秋季最多,有 40 种,多样性和均匀度指数差异不明显。

从 CCA 排序中可以看出种类分布与环境因素之间的关系,即相同属的种类在 CCA 坐标中占据相似的生态位,且相对位置较近,与环境因子的关系也类似。

### 参考文献:

- [1] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. *Hydrobiologia*, 1998, 369/370: 11–26.
- [2] Nakane T, Nakaka K, Bouman H, et al. Environmental control of short-term variation in the plankton community of inner Tokyo Bay, Japan [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(4): 796–810.
- [3] 贾海波, 胡颖琰, 邵君波, 等. 长江口及其邻近海域春秋季节浮游植物群落及环境影响因子研究 [J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(6): 851–855.
- [4] 栾青杉, 孙 军. 2005 年夏季长江口水域浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2010, 30(18): 4967–4975.
- [5] Wasmund N, Tuimala J, Suikkanen S, et al. Long-term trends in phytoplankton composition in the western and central Baltic Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 87(2): 145–159.
- [6] 陈应华, 杨宇峰, 焦念志. 海水养殖对浮游生物群落和水环境的影响 [J]. *海洋科学*, 2001, 25(10): 20–22.
- [7] 冯士粹, 李凤岐, 李少普. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 251–266.
- [8] Pedro C, Emilio M, Valesca P, et al. Phytoplankton size structure and primary production in a highly dynamic coastal ecosystem (Ria de Vigo, NW-Spain): seasonal and short-time scale variability [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2006, 67(1/2): 251–266.
- [9] ter Braak C J F, Smilauer P. Canoco reference manual and user's guide to canoco for windows version 4.5 [M]. New York: Centre for Biometry Wageningen, 2002.
- [10] 万延森. 江苏辐射状沙脊群形成的初步探讨 [J]. *海洋研究*, 1982, 21(2): 83–89.
- [11] 宋志尧, 严以新, 薛鸿超, 等. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力

- 机制研究——II. 潮流运动立面特征 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 1998, 28(5): 411–417.
- [12] 任美镠, 许廷官, 朱季文, 等. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查(报告) [M]. 北京: 海洋出版社, 1985: 1102120.
- [13] 严长清, 孙 伟, 陆效平, 等. 江苏省沿海滩涂土地利用与生态保护研究 [J]. *生态科学*, 2007, 26(3): 263–268.
- [14] 欧维新, 杨桂山, 高建华. 盐城潮滩湿地对 N、P 营养物质的截留效应研究 [J]. *湿地科学*, 2006, 4(3): 179–186.
- [15] 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析: GB 17378.4—2007 [S].
- [16] 海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查: GB/T 12763.4—2007 [S].
- [17] 张正斌. 海洋化学 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2004: 127–135.
- [18] 海洋调查规范 第 6 部分: 海水生物调查: GB/T 12763.6—2007 [S].
- [19] 郭 皓. 中国近海赤潮生物图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 39.
- [20] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [21] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [22] 邓 坚. 中国内陆水域常见藻类图谱 [M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- [23] 沈国英, 施并章. 海洋生态学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1990.
- [24] 王保陈, 陈爱萍, 刘 峰. 海洋中 Redfield 比值的研究 [J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(2): 232–235.
- [25] 赵 霞, 谭丽菊, 王江涛, 等. 山东近海溶解态无机营养盐的分布特征研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(4): 799–804.
- [26] 王保陈, 王桂云, 郑昌洙, 等. 南黄海营养盐的平面分布及横向输运 [J]. *海洋学报*, 1999, 21(6): 124–129.
- [27] 高生泉, 林以安, 金明明, 等. 春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构 [J]. *东海海洋*, 2004, 22(4): 38–50.
- [28] 杨耀中, 冯卫兵. 南黄海辐射沙脊群悬沙特征研究 [J]. *水道港口*, 2010, 31(3): 157–163.
- [29] 黄惠明, 王义刚, 尚 进, 等. 冬季苏北辐射沙洲水域悬沙分布及输运特征分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2): 201–205.
- [30] Ma D X, Liu X Q. Types and formation mechanisms of tidal sand ridges in China offshore shelf [M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1998: 41–52.
- [31] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价 [J]. *台湾海峡*, 1998, 17(1): 64–70.
- [32] 万修全, 吴德星, 鲍献文, 等. 2000 年夏季莱州湾主要观测要素的分布特征 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(1): 7–12.