DOI: 10.5846/stxb201803200545
宋秀凯,程玲,付萍,何健龙,李佳蕙,于广磊,刘爱英.莱州湾金城海域网采浮游植物年际变化及与环境因子关系.生态学报,2019,39(8): - .
Song X K, Cheng L, Fu P, He J L, Li J H, Yu G L, Liu A Y.Changes of net-collected phytoplankton community in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors.Acta Ecologica Sinica,2019,39(8): - .

莱州湾金城海域网采浮游植物年际变化及与环境因子关系

宋秀凯,程　玲,付　萍,何健龙,李佳蕙,于广磊,刘爱英
(山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 烟台　264006)

摘要:为了解莱州湾金城海域浮游植物群落年际变化特征,在该海域设置了 15 个监测站位,于 2009 年和 2010 年采用浅水Ⅲ型浮游生物网逐月连续进行 24 个航次浮游植物调查,同步监测其他环境因子。浮游植物样品经鲁格氏溶液固定后在 OLYMPUS BX_{51} 显微镜下进行分类、鉴定、计数,共鉴定出浮游植物 81 种,隶属于硅藻门、甲藻门、黄藻门和金藻门 4 门 25 科 43 属。其中硅藻 16 科 33 属 67 种,占种类数的 82.7%;甲藻 6 科 7 属 11 种,占种类数的 13.6%;黄藻 2 科 2 属 2 种,占种类数的 2.5%;金藻 1 科 1 属 1 种,占种类数的 1.2%。2009 年和 2010 年金城海域浮游植物种类组成和比例基本一致,浮游植物丰度年际变化和种类数年际变化均呈现明显的双峰模型,每年 2 月和 9 月为高峰期,5 月为全年最低值。2009 年和 2010 年细胞丰度均值分别为 465×10^4(38.4×10^4—1351×10^4) 个/m^3 和 457×10^4(41.8×10^4—1380×10^4) 个/m^3,均低于 1982—1983 年平均水平。浮游植物群落年际相似性在 60%水平聚类分为四个类群,其中Ⅰ类为 5 月份样品,优势种为夜光藻和洛氏角毛藻;Ⅱ类为 11—4 月份样品,优势种有中肋骨条藻、旋链角毛藻和夜光藻;Ⅲ类为 8、9、10 月份样品,优势种为洛氏角毛藻和丹麦细柱藻;Ⅳ类为 6、7 月份样品,优势种为洛氏角毛藻和尖刺拟菱形藻。浮游植物群落 Shannon-Winner 多样性指数平均 2.715 (1.446—3.807),Margalef 丰富度指数平均 2.418 (1.545—3.153),Pielou 均匀度指数平均 0.523 (0.263—0.706)。2009 年和 2010 年多样性指数和均匀度高峰值出现在 3 月和 10 月,低值出现在 7 月和 9 月;均匀度指数年际变化低值出现在 6—9 月。浮游植物群落结构主要受水温和盐度环境因素的影响,其中水温与洛氏角毛藻丰度呈极显著正相关($R=0.613$,$P<0.01$),与旋链角毛藻、中肋骨条藻和夜光藻丰度呈极显著负相关($R=-0.662$,-0.649, -0.649,$P<0.01$);化学需氧量与旋链角毛藻和中肋骨条藻均呈显著负相关($R=-0.589$, -0.480,$P<0.05$);盐度与中肋骨条藻呈极显著负相关($R=-0.585$,$P<0.01$);其他环境因子与各优势种丰度相关性不明显。

关键词:莱州湾;浮游植物;环境因子;典范对应分析

Changes of net-collected phytoplankton community in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors

SONG Xiukai, CHENG Ling, FU Ping, HE Jianlong, LI Jiahui, YU Guanglei, LIU Aiying*
Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Key Laboratory of Marine Ecological, Yantai 264006, *China*

Abstract: Based on 24 cruises at 15 stations from January 2009 to December 2010, interannual variations in the phytoplankton community and their relationship with other environmental factors in the Jincheng area of Laizhou Bay were studied. Phytoplankton were vertically hauled using a type-III standing phytoplankton net and environmental factors were recorded *in situ* synchronously. A total of 81 species of phytoplankton belonging to 43 genera of 4 phyla were detected. Bacillariophyta and Pyrrophyta were dominant, accounting for 67 and 11 species reflecting 82.7% and 13.6% of the total taxa, respectively. Xanthophyta included 2 species, while Chrysophyta included 1 species, accounting for 2.5% and 1.2%,

基金项目:国家重点研发计划(SQ2018YFC140023); 国家海洋公益性行业科研专项(200805031); 山东省渤海海洋生态修复及能力建设项目(20140601)资助
收稿日期:2018-03-20;　　**网络出版日期**:2018-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: aiyingl@163.com

respectively. Both in 2009 and 2010, the phytoplankton species composition and proportion were very similar. Compared to 2009, the proportion of diatom showed a slight increase, while dinoflagellates decreased slightly in 2010. *Leptocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros curvisetus*, and *Chaetoceros lorenzianus* were the most abundant species in Bacillariophyta, while *Noctiluca scintillans* was most abundant in Pyrrophyta. Interannual variability of phytoplankton abundance and the number of species showed a clear bimodal distribution. In 2009 and 2010, the average cell abundance was 465×10^4 (38.4×10^4—1351×10^4) and 457×10^4 (41.8×10^4—1380×10^4) cells/m^3 respectively, all of which were lower than the average values observed in 1982—1983. CUSTER and MDS ordination analyses showed that the phytoplankton community was divided into four groups at 60% similarity. Group I contained samples from May, in which *Noctiluca scintillans* and *Chaetoceros lorenzianus* were the most abundant species. Samples from November through April belonged to Group II, in which *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros curvisetus*, and *Noctiluca scintillans* were the most abundant species. Group III included samples in August, September, and October, in which *Chaetoceros lorenzianus* and *Leptocylindrus danicus* were the most abundant species.Group IV included samples from June and July, in which *Chaetoceros lorenzianus* and *Pseudo-nitzschia pungens* were the most abundant species. The means of the Shannon-Winner diversity index, Margalef richness, and Pielou evenness were 2.715 (1.446—3.807), 2.418 (1.545—3.153), and 0.523 (0.263—0.706), respectively. Both the diversity index and evenness of phytoplankton reached a maximum in March and October, while the minimum value was observed in July. The minimum value of the evenness index of phytoplankton was detected in June to September. Water temperature and salinity were the main environmental factors affecting the community structure of phytoplankton. Water temperature showed significantly positive correlations with *Chaetoceros lorenzianus* ($R=0.613$, $P<0.01$), but negatively correlated with *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema costatum*, and *Noctiluca scintillans* ($R=-0.662$, -0.649, -0.649, $P<0.01$). There were negative correlations between the chemical oxygen demand and *Chaetoceros curvisetus* and *Skeletonema costatum* ($R=-0.589$, -0.480, $P<0.05$). Salinity was significantly negatively correlated with *Skeletonema costatum* ($R=-0.585$, $P<0.01$), whereas other environmental factors were not significantly correlated with the abundance of dominant species.

Key Words: Laizhou Bay; phytoplankton; environmental factors; canonical correspondence analysis

浮游植物是海洋重要的初级生产力,海洋浮游植物群落结构的转变将改变浮游植物的生物量及生产力,继而对整个海洋生态系统的物质循环和能量传递产生重要影响[1]。浮游植物群落对环境变化响应敏感,因此群落的变动可以反映水质健康和气候变化。近年来,越来越多的研究表明[2-4],受近海环境变化的胁迫,浮游植物群落结构正处于不稳定状态。

莱州湾地处渤海南岸,是渤海三大海湾之一,入海径流丰富,营养盐充足,是传统鱼、虾、蟹的产卵场和索饵场[5]。随着近几年养殖业的发展,莱州湾金城海域已发展成为山东省重要海湾扇贝养殖基地之一,但由于片面追求高产量,忽视长远的生态和环境效益,缺乏对水域生态养殖容量的科学了解和统一的规划管理,致使局部海域开发过度;另一方面由于养殖密度过高,造成生态环境质量下降,浮游植物的群落结构也随之发生了较大变化,严重影响海水养殖业的持续稳定发展。浮游植物作为双壳贝类重要的饵料生物,其种类和数量多寡将直接影响养殖贝类的产量。因此,研究该海域浮游植物种类和数量的年际变动,有助于了解养殖海域生态环境和养殖业的现状,解决养殖贝类死亡率高和出肉率低等问题。本文分析了 2009—2010 年连续两年 24 个月莱州湾金城海域贝类养殖区主要理化因子及网采浮游植物种类组成、数量分布和生物多样性变化规律,并通过典范对应分析结合多个环境因子探讨浮游植物与环境间的复杂关系,旨在较为系统地阐述近岸浮游植物的群落结构特征及演替规律,进一步深入研究莱州湾浮游植物的长期变化规律及海洋生态系统动态变化机制,为莱州湾浅海养殖业的合理开发、环境治理和修复提供基础数据。

1　材料与方法

1.1　样品采集

调查海域为莱州湾金城海域(119.9°—120.2°E,37.3°—37.6°N),共设 15 个采样站位(图 1),该海域水深范围 3.5—13.0 m,由南向北逐渐加深。于 2009—2010 年逐月进行共 24 个航次水质及浮游植物调查。采样船只为当地渔民渔船。

浮游植物采集及样品处理等均按《海洋调查规范》[6]进行,使用浅Ⅲ浮游生物网自底层至表层作垂直拖网采集,样品经鲁格氏溶液固定后实验室进行分类、鉴定、计数和统计。原则上每个样品鉴定到种的比例占总种类数的 80%以上,每个样品镜检 3 次,每次镜检计数细胞个数不少于 200 个。各采样站位同步调查水温(WT)、盐度(Salinity)、透明度(Transparency)、化学需氧量(COD)、pH 值、叶绿素 a(Chl *a*)、总氮(TN)及总磷(TP)等环境参数,所有操作均按照《海洋监测规范》进行[7]。

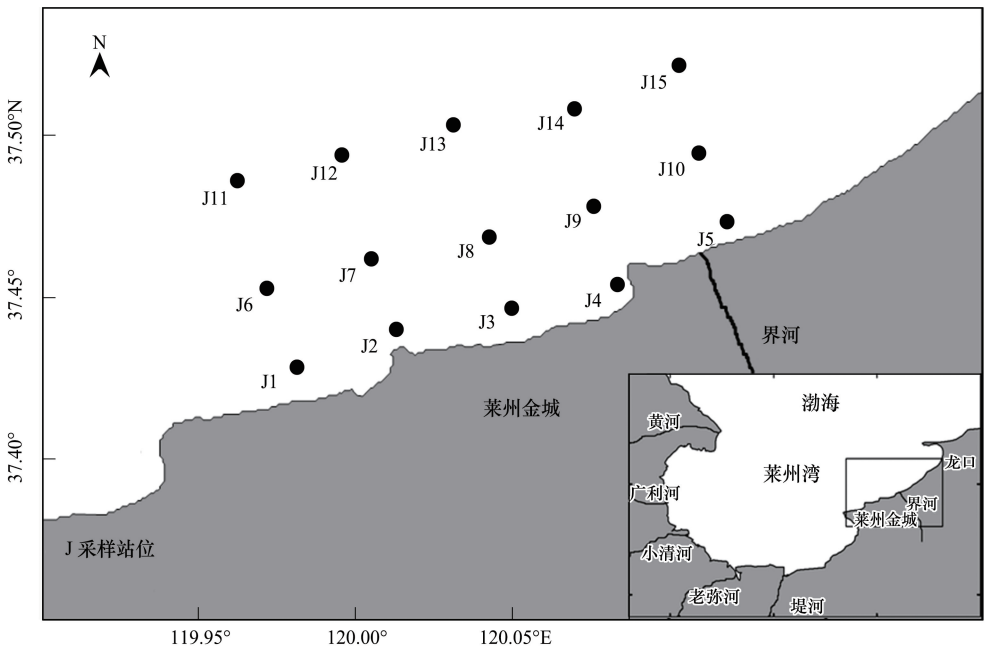

图 1　莱州湾金城海域采样站位图

Fig.1　Sampling sites in Jincheng area of Laizhou Bay

1.2　数据分析

1.2.1　优势种、多样性指数、丰富度、均匀度分析

浮游植物丰度以每立方米出现的细胞数表示(个/m^3)。

优势种的优势度:$Y=(n_i/N')\times f_i$

式中,n_i为第 i 种的丰度,f_i为该种在各站位中出现的频率,N'为总丰度。根据种类优势度公式计算各种生物的优势度,将 $Y>0.02$ 的生物定为优势种。

物种多样性指数的计算采用 Shannon-Winner 指数[8]:$H'=-\sum_{i=1}^{S}P_i\log_2 P_i$

物种丰富度指数采用 Margalef 指数(d_{Ma})计算公式[9]:$d_{Ma}=(S-1)/\log_2 N$

均匀度指数采用 Pielou 指数计算公式[10]:$E=H'/\ln S$

式中,N 为采集样品中所有物种的总个体数,S 为样品中的种类总数,P_i为第 i 种的个体数与样品中的总个体数的比值。

1.2.2 群落结构分析

多元统计方法包括聚类分析和典范对应分析(CCA)等,均是基于种类数据和环境数据集合的排序方法,已广泛应用于海洋生态群落结构分析中[11-13]。本文选取水温、盐度、pH、透明度、化学需氧量、总氮、总磷和叶绿素 a 8 个指标分析其对浮游植物群落结构的影响。CCA 分析中,浮游植物主要选取海区常见种,剔除出现频率小于 15%的物种,物种及环境数据均采用对数 $\log(x+1)$ 转换。

全部数据的统计分析用 SPSS 19.0 软件完成,群落结构聚类分析使用 PRIMER 6.0 软件完成,典范对应分析采用 CANOCO 4.5 软件完成。

2 结果

2.1 浮游植物群落组成

本调查共鉴定出浮游植物 81 种,隶属于硅藻门、甲藻门、黄藻门和金藻门 4 门 25 科 43 属。其中硅藻门最多,共 16 科 33 属 67 种,占总种数的 82.7%;甲藻门次之,共 6 科 7 属 11 种,占总种数的 13.6%;黄藻门 2 科 2 属 2 种,占总种数的 2.5%;金藻门 1 科 1 属 1 种。2009 年和 2010 年金城海域浮游植物种类数基本一致,硅藻优势种主要以角毛藻属、丹麦细柱藻、菱形藻属为主,甲藻以夜光藻为主。2009 年与 2010 年种类组成及比例基本一致,硅藻比例均在 80%以上,甲藻为 10%左右,其余为金藻和黄藻。与 2009 年相比,2010 年硅藻所占比例略有升高,甲藻略有下降(图 2)。

莱州湾调查海域浮游植物门类组成的周年变化如图 3 所示,除 2009 年 5 月及 2010 年 5 月、10 月外,其余月份均为硅藻占绝对优势,比例均在 80%以上。5 月份甲藻比例明显升高,主要是夜光藻的大量出现;7、8、9 月硅藻占绝对优势,几乎见不到其他藻类。周年变化显示调查海域浮游植物以硅藻为主要优势,季节演替不明显。

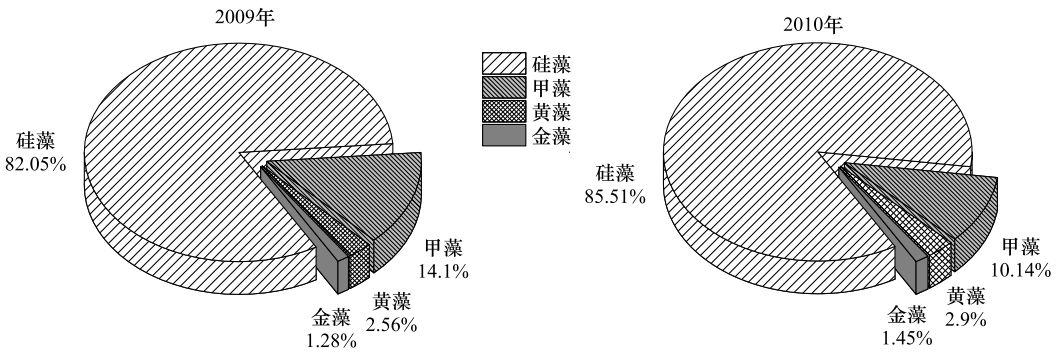

图 2 2009—2010 年浮游植物种类组成

Fig.2 Specific composition of phytoplankton from 2009 to 2010

2.2 浮游植物群落结构

为直观展示各月份浮游植物丰度变化情况,浮游植物丰度周年变化采用常用对数形式表示。如图 4 所示,浮游植物丰度的年际变化呈现明显的双峰模型,2009 年与 2010 年变化趋势基本一致,2 月份达全年最高值,之后呈下降趋势,至 5 月为全年最低值,在 9 月到达到全年的第二个高峰。

浮游植物种类数年际变化与丰度相似亦呈双峰型变化趋势,2009 年与 2010 年略有差别,除 8 月和 10 月外,其余月份 2010 年浮游植物种类数均小于 2009 年。

浮游植物多样性指数年际变化呈现明显的季节变化规律,高峰分别出现在 3 月和 10 月,2009 年多样性指数最低值出现在 7 月,2010 年最低值出现在 9 月。除 2010 年 9 月份外,生物多样性指数均在 1.5—3.5 的正常范围内。

浮游植物均匀度指数年际变化趋势显示:1—5 月均匀度指数较为稳定,6—9 月有所下降,10—12 月有所

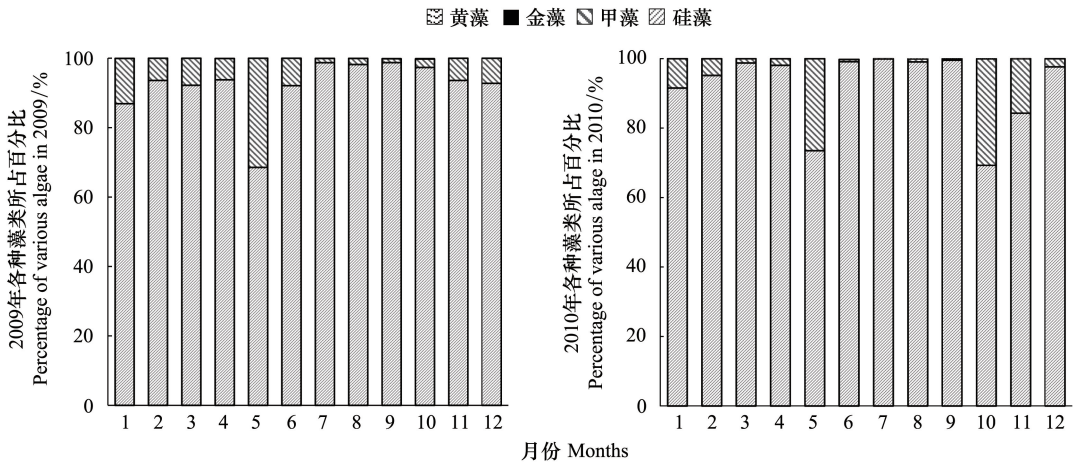

图 3　2009—2010 年浮游植物门类组成周年变化

Fig.3　Annual variation in species composition of phytopiankton from 2009 to 2010

升高并趋于稳定。除 2010 年 8 月和 9 月外,均匀度指数均大于 0.3。

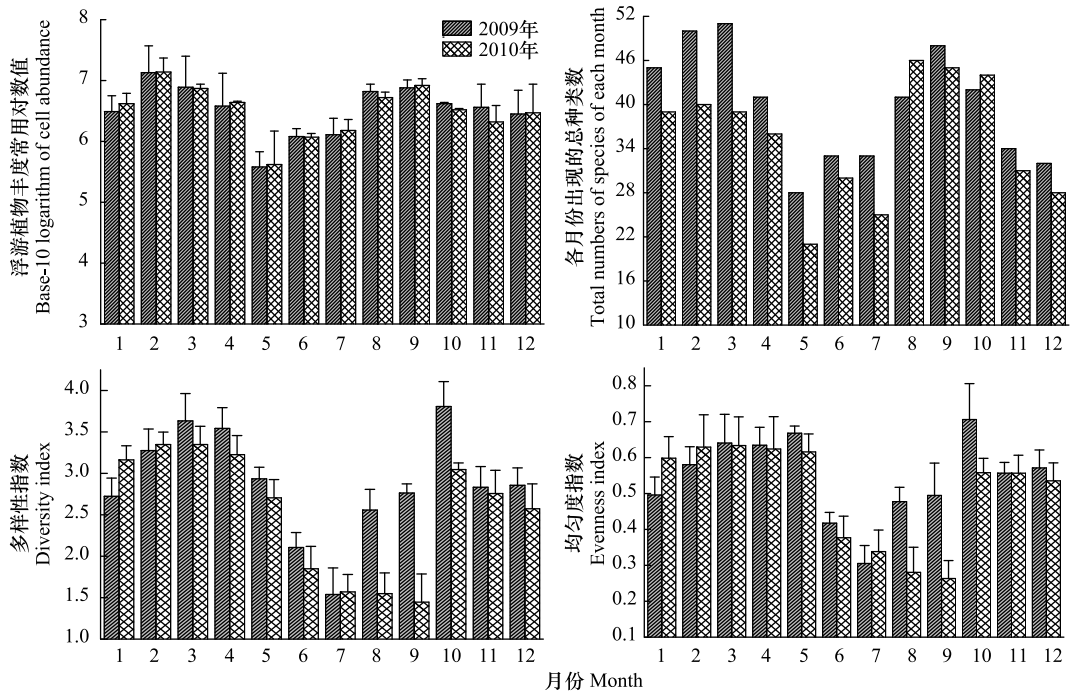

图 4　2009—2010 年浮游植物群落结构(细胞丰度、总种类数、多样性指数、均匀度指数)**年际变化**

Fig.4　Phytoplankton community variation including cell abundance, species, diversity and evenness from 2009 to 2010

2.3　优势种群动态变化

海区主要优势种季节更替明显(表 1)。春季(3—5 月)主要优势种为尖刺拟菱形藻(Y = 0.0228—0.217)、夜光藻(Y = 0.0282—0.293)、旋链角毛藻(Y = 0.0902—0.217)等;夏季(6—8 月)主要优势种为洛氏角毛藻(Y = 0.167—0.776)、尖刺拟菱形藻(Y = 0.0233—0.203)、丹麦细柱藻(Y = 0.108—0.276)等;秋季(9—11 月)主要优势种为丹麦细柱藻(Y = 0.0416—0.262)、洛氏角毛藻(Y = 0.0559—0.739)、中肋骨条藻(Y = 0.0285—0.436)等;冬季(12—2 月)主要优势种为尖刺拟菱形藻(Y = 0.0417—0.486)、中肋骨条藻(Y = 0.0725—0.442)、旋链角毛藻(Y = 0.0389—0.281)等。

表 1 主要优势种的优势度年际变化

Table 1 Interannual variation of dominance index

监测月份 monitoring date	丹麦细柱藻 *Leptocylindrus danicus*	尖刺拟菱形藻 *Pseudo-nitzschia pungens*	中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*	洛氏角毛藻 *Chaetoceros lorenzianus*	旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus*	诺氏海链藻 *Thalassiosira nordenskioldi*	细弱圆筛藻 *Coscinodiscus subtilis*	夜光藻 *Noctiluca scintillans*
2009-01		0.486 *		0.0486	0.0389	0.0810		0.130 *
2009-02	0.133	0.163 *	0.0962	0.0777	0.281 *	0.0244		0.0629
2009-03	0.102	0.213 *	0.0732	0.0772	0.160 *	0.0568		0.0605
2009-04	0.0262	0.217 *	0.0751	0.0622	0.217 *	0.118		0.0516
2009-05	0.0235	0.104	0.0982	0.182 *		0.148		0.293 *
2009-06		0.0233		0.698 *			0.0285	0.0680 *
2009-07				0.776 *			0.0244 *	
2009-08	0.276 *		0.0764	0.438 *	0.056			
2009-09	0.262 *		0.0587	0.399 *	0.0842		0.0376	
2009-10	0.211 *		0.0285	0.167 *	0.0232			
2009-11	0.138 *	0.0338	0.436 *		0.105	0.0747		0.0562
2009-12	0.0142	0.0417	0.442 *	0.0512	0.114 *	0.0901		0.0693
2010-01	0.0264	0.168 *	0.288 *	0.0559	0.109			0.084
2010-02	0.254 *	0.0869	0.0725		0.0717	0.217 *		0.0471
2010-03	0.304 *	0.0606	0.0553	0.0845	0.0902	0.195 *		
2010-04	0.165	0.0228	0.0469	0.0258	0.219 *	0.276 *		0.0282
2010-05		0.115	0.0973	0.268 *		0.191		0.254 *
2010-06		0.111 *		0.697 *				0.0255
2010-07		0.203 *		0.673 *				
2010-08	0.108 *	0.0306		0.722 *				
2010-09	0.109 *			0.739 *				
2010-10	0.158 *		0.0561	0.235 *	0.0513			
2010-11	0.0416	0.0739	0.382 *	0.0559	0.216 *			
2010-12		0.204	0.353 *	0.0486	0.240 *	0.0810	0.0252	0.0265

优势度>0.02 的物种为该航次的优势种,表格中带 * 的数字为该月份海区前两位优势种的优势度

除了主要优势种群随季节演替明显外,各主要优势种丰度随季节变化也十分明显,由图 5 可以看出,主要优势种(除洛氏角毛藻)均在 2 月达全年丰度的最高值,5 月各优势种丰度均较低,与浮游植物丰度年际变化趋势较为一致;8、9 月洛氏角毛藻、丹麦细柱藻丰度相对较高,是造成 8、9 月浮游植物丰度出现另一高峰的主要原因。2009 年与 2010 年各优势种丰度年际变化基本一致。

2.4 浮游植物群落聚类分析

对各个航次的浮游植物细胞丰度进行平方根转化,做出 Bray-Curtis 相似性矩阵,以此矩阵进行 CLUSTER 聚类和 MDS 标序,结果见图 6。调查海域浮游植物群落在 60%相似性水平大致可分为 4 个类群,同时使用 SIMPER 分析了各组分的优势物种。第Ⅰ类群以 5 月份样品为代表,第Ⅱ类群包括 11、12、1、2、3、4 月份样品,第Ⅲ类群包括 8、9、10 月份样品,第Ⅳ类群包括 6、7 月份样品。

类群Ⅰ:2009 年 5 月和 2010 年 5 月浮游植物群落相似性约 89.6%,此月份浮游植物丰度偏低,种类数较少,甲藻丰度占比较高,夜光藻、诺氏海链藻、洛氏角毛藻和丹麦细柱藻等为特征种,贡献率分别为 15.7%、12.4%、9.6%和 6.4%,累计贡献率为 44.1%。此时,海区的水温(15.8±0.9)℃、盐度 30.992±1.281、总氮(0.621±0.013) mg/L、总磷(0.0255±0.0083) mg/L。

类群Ⅱ:2009 和 2010 年每年 11 月至次年 4 月浮游植物群落相似性约 52.7%,该时间内水温相对较低,硅藻为主要优势种,特征种主要为尖刺拟菱形藻、中肋骨条藻、旋链角毛藻等,贡献率分别为 10.3%、7.4%和 6.6%,累计贡献率 24.3%。此时,海区的水温(5.5±2.7)℃、盐度 30.354±0.607、总氮(0.802±0.272) mg/L、总

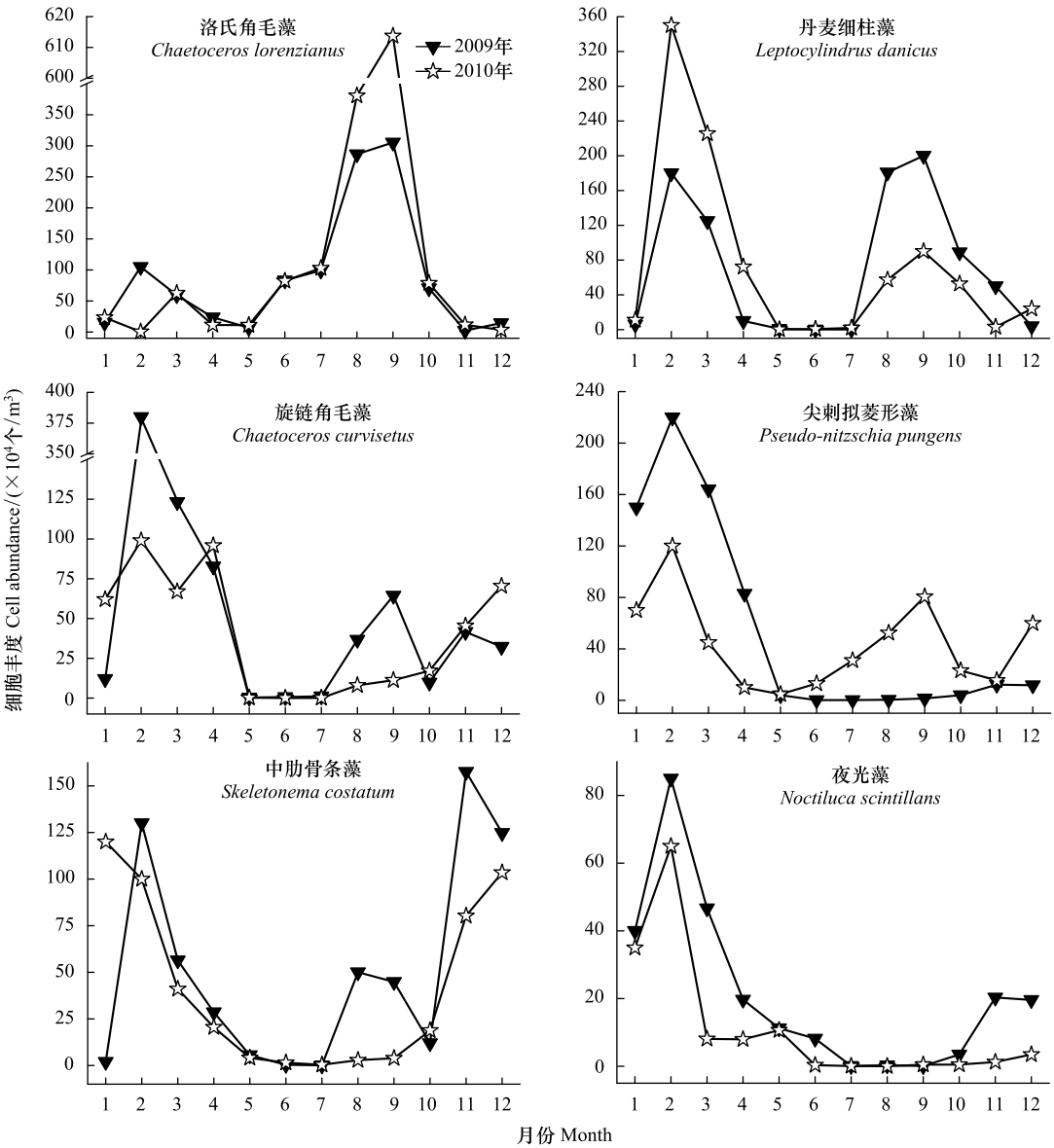

图 5　2009—2010 年主要优势种的丰度动态变化

Fig.5　Cell abundance variation of dominate species from 2009 to 2010

磷(0.0265±0.0086) mg/L。

类群Ⅲ:2009 和 2010 年每年 8 月至 10 月的浮游植物群落相似性约 59.8%,此时间范围水温较高,特征种为丹麦细柱藻、洛氏角毛藻、掌状冠盖藻等,贡献率分别为 10.6%、9.8%和 6.6%,累计贡献率 21.0%。此时,海区的水温(23.2±4.3)℃、盐度 30.614±0.264、总氮(0.685±0.235) mg/L、总磷(0.0431±0.0143) mg/L。

类群Ⅳ:2009 和 2010 年 6 月、7 月浮游植物群落相似性约 59.6%,特征种为尖刺拟菱形藻、洛氏角毛藻、圆柱角毛藻和大西洋角毛藻等硅藻,贡献率分别为 9.9%、8.7%、8.4%和 6.6,累计贡献率为 19.6%。此时,海区的水温(25.4±0.7)℃、盐度 30.914±0.427、总氮(0.664±0.112) mg/L、总磷(0.0227±0.0142) mg/L。

2.5　浮游植物群落结构与环境因子关系

为探讨浮游植物与环境因子的关系,对浮游植物主要优势种与水温等 8 项环境指标做相关性分析,结果如表 2 所示。水温与洛氏角毛藻丰度呈极显著正相关($R=0.613$,$P<0.01$),与旋链角毛藻、中肋骨条藻和夜光藻丰度均呈极显著负相关($R=-0.662$, -0.649, -0.649,$P<0.01$);化学需氧量与旋链角毛藻和中肋骨条藻均

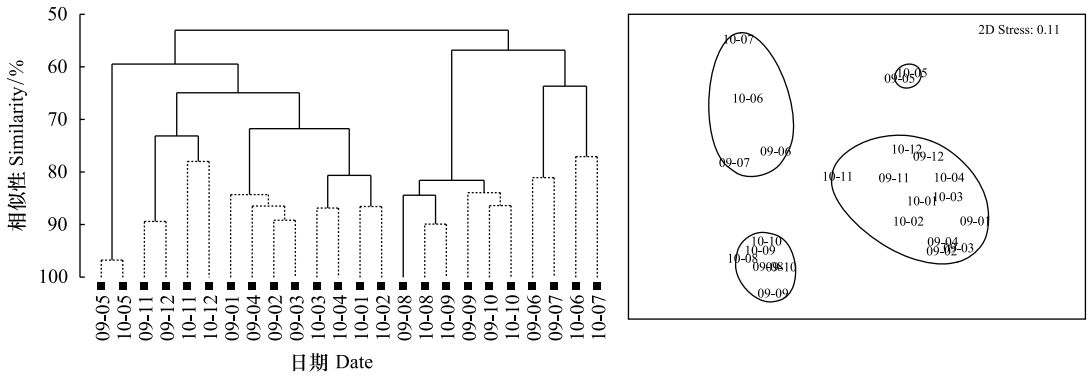

图 6 金城海域 24 个航次浮游植物群落的聚类树状图和多维尺度转换排序(MDS, non-metric Multidimensional Scaling)

Fig.6 Cluster and MDS of phytoplankton community on 24 monitoring dates in Jincheng aera

呈显著负相关($R=-0.589$, -0.480, $P<0.05$);盐度与中肋骨条藻呈极显著负相关($R=-0.585$, $P<0.01$);其他环境因子与各优势种丰度相关性不明显。

表 2 主要优势种丰度与环境因子的相关性

Table 2 Pearson correlations of environmental factors and cell abundance of main dominate species

理化指标 Environment factors	洛氏角毛藻 *Chaetoceros lorenzianus* *R*	丹麦细柱藻 *Leptocylindrus danicus* *R*	尖刺拟菱形藻 *Pseudo-nitzschia pungens* *R*	旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus* *R*	中肋骨条藻 *Skeletonema costatum* *R*	夜光藻 *Noctiluca scintillans* *R*
透明度 Transparency	0.185	0.140	−0.078	−0.064	−0.176	0.019
酸碱度 pH	0.001	0.272	−0.057	0.236	−0.215	0.093
水温 Water temperature	0.613**	−0.022	−0.368	−0.697*	−0.662**	−0.649**
化学需氧量 Chemical oxygen demand	−0.041	−0.163	−0.288	−0.589*	−0.480*	−0.291
盐度 Salinity	0.126	0.181	−0.036	−0.113	−0.585**	−0.127
叶绿素 a Chla	−0.064	−0.082	−0.462*	−0.329	0.169	−0.155
总氮 Total nitrogen	−0.113	−0.100	0.254	0.325	0.151	−0.075
总磷 Total phosphorus	0.447*	0.396	−0.155	−0.144	−0.364	−0.489*

*0.05 显著水平(双尾), **0.01 显著水平(双尾)

为了进一步探讨环境因子与浮游植物群落结构的关系,对主要优势种与 8 种环境因子进行 CCA 分析。由图 7 可以看出,影响浮游植物群落结构最主要的因素是水温,其次是盐度,化学需氧量、总氮、总磷、透明度及叶绿素 a 对浮游植物的影响较小。不同种类的浮游植物对环境因子的要求不同,夜光藻、旋链角毛藻等多为低温低盐种,洛氏角毛藻则为高温高盐种;故而在水温较高的 8、9 月份洛氏角毛藻丰度较高,而在 1、2 月份旋链角毛藻、夜光藻等丰度较高。丹麦细柱藻与盐度及 pH 均呈现较强的正相关。

3 讨论

3.1 浮游植物群落组成及参数变化

莱州湾浮游植物种类众多,有关其种类组成的研究曾有过记载[14-15]。本次莱州湾金城海域调查初步鉴定浮游植物(含变型及变种)共 43 属 81 种,隶属于 4 大门类,多于 1997 年的 62 种[5],其中硅藻门无论丰度还是种类数均占绝对优势,这与陈碧娟等[5]2001 年的研究结果一致。2009 年和 2010 年莱州湾调查海域浮游植物丰度变化范围分别为 38.4×10^4—1351×10^4 个/m^3 和 41.8×10^4—1380×10^4 个/m^3,1992—1993 年莱州湾浮游植物丰度变化范围 28×10^4—1780×10^4 个/m^3,而 1982—1983 年莱州湾浮游植物丰度变化为 27×10^4—3629×10^4 个/m^3,莱州湾浮游植物丰度较上世纪 90 年代有所降低[15-16]。

浮游植物丰度分布的季节变化明显,高峰分别出现在 2 月和 9 月,最低值出现在 5 月。王俊,康元德对 1992—1993 年渤海浮游植物的调查结果表明,浮游植物丰度最高峰分别出现在上半年的 2 月份和下半年的 10 月份,5 月为全年最低值[15];刘慧等对莱州湾养殖海区 2001—2002 年浮游植物的研究显示早春 2—3 月是细胞丰度的高峰,最低值出现在 4—5 月[17];均与本次调查结果一致。莱州湾处于北半球中纬度温带海,浮游植物的季节变化应符合温带海域浮游植物两周期的季节变化类型,渤海季节变化特点是上、下半年各有一次数量高峰[18]。本次调查结果符合这一结论,说明莱州湾多年来浮游植物数量的年际变化规律基本一致,未发生较大波动。

浮游植物多样性指数和均匀度指数是其生物群落结构的重要参数,通常情况下多样性指数小于 1、均匀度小于 0.3 可认为群落结构受到了其他环境因素的扰动[19],莱州湾金城海域浮游植物多样性指数均大于 1,均匀度指数均大于 0.3,该海域浮游植物群落结构相对稳定。

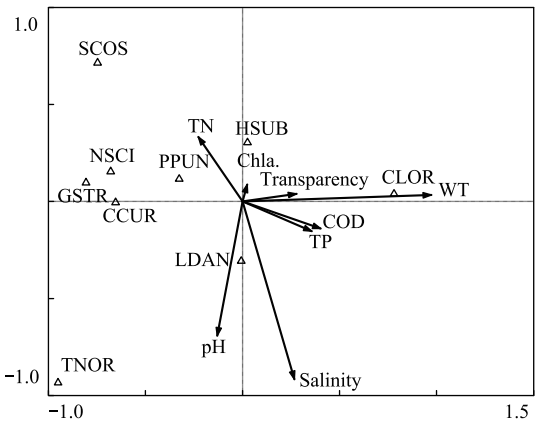

图 7　浮游植物优势种与环境因子典范对应分析

Fig.7　Canonical correspondence analysis (CCA) of dominant species and associated environmental factors

CLOR:洛氏角毛藻 *Chaetoceros lorenzianus*;LDAN:丹麦细柱藻 *Leptocylindrus danicus*;CCUR:旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus*;PPUN:尖刺拟菱形藻 *Pseudo-nitzschia pungens*;SCOS:中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*;NSCI:夜光藻 *Noctiluca scintillans*;TNOR:诺氏海链藻 *Thalassiosira nordenskioldii*;HSUB:细弱圆筛藻 *Coscinodiscus subtilis*;GSTR:斯氏几内亚藻 *Guinardia striata*;透明度 Transparency;pH:酸碱度 pH value;WT:水温 Water temperature;COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand;Chla.:叶绿素 a Chlorophyll a;TN:总氮 Total nitrogen;TP:总磷 Total phosphorus;盐度 Salinity

3.2　浮游植物群落聚类及主要优势种变化

2009—2010 年莱州湾金城海域浮游植物群落聚类分为四大类:Ⅰ类为 5 月份样品,2009 年和 2010 年 5 月样品相似度达 80%以上,优势种为夜光藻和洛氏角毛藻,尤其夜光藻,在数量上占绝对优势,与刘慧等[17]2001 年莱州湾东部养殖区浮游植物的调查结果一致;Ⅱ类 11 月—4 月样品为冬春季样品,优势种有中肋骨条藻、旋链角毛藻和夜光藻;Ⅲ类 8、9、10 月样品主要为夏秋季样品,优势种主要包括洛氏角毛藻和丹麦细柱藻;Ⅳ类为 6、7 月样品,优势种为洛氏角毛藻和尖刺拟菱形藻。全年优势种与 1982 年的结果有较大不同,1982 年莱州湾的主要优势种为中肋骨条藻、透明辐杆藻和日本星杆藻[20],2001—2003 年度的主要优势种为中肋骨条藻、角毛藻、柔弱根管藻和斯氏几内亚藻[17]。

3.3　环境因子等对浮游植物群落的影响

莱州湾金城海域地处中纬度地区,季节分明,因此温度尤其是表层水温对生物的影响较大,典范对应分析显示,莱州湾金城海域影响浮游植物群落结构最主要的因素是水温,这与以往的研究结果一致[21-22]。此外,与温度呈正相关的优势种主要为洛氏角毛藻,而夜光藻、旋链角毛藻等与温度呈负相关,这与浮游植物优势种随季节变化的演替规律一致。此外,分析显示总氮、总磷对浮游植物的影响较小,调查海域主要为扇贝养殖区,不存在氮磷限制现象。有研究发现扇贝养殖促进了浮游植物特别是硅藻的繁盛,这可能是由于扇贝的滤食作用以及扇贝养殖区小生境中丰富的微生物,促进了浮游植物必须的营养盐及微量元素的循环供应[17,23]。另外,结合养殖的实际情况,5 月为扇贝海上挂苗期,此时浮游植物丰度为全年最低,尤其作为扇贝饵料藻的硅藻类比例下降,会影响扇贝的产量和质量,因此要合理控制养殖规模,防止因饵料缺少导致贝类死亡。

参考文献(References):

[1] Lalli C M, Parsons T R. Biological Oceanography: An Introduction. New York: Pergamon Press, 1993: 45-79.

[2] 王云龙, 袁骐, 沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征. 中国水产科学, 2005, 12(3): 300-306.

[3] 孙翠慈, 王友绍, 孙松, 张凤琴. 大亚湾浮游植物群落特征. 生态学报, 2006, 26(12): 3948-3958.

[4] 戴明, 李纯厚, 张汉华, 贾晓平. 海南岛以南海域浮游植物群落特征研究. 生物多样性, 2007, 15(1): 23-30.
[5] 陈碧鹃, 陈聚法, 崔毅, 李秋芬, 袁有宪. 莱州湾东部养殖区浮游植物的生态特征. 海洋水产研究, 2001, 22(3): 64-70.
[6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6—2007 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4—2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析. 北京: 中国标准化出版社, 2008.
[8] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1963: 125-125.
[9] Margalef R. Perspectives in Ecological Theory. Chicago: University of Chicago Press, 1968: 1-111.
[10] Pielou E C. An Introduction to Mathematical Ecology. New York: Wiley-Interscience, 1969.
[11] Zhou S C, Jin B S, Guo L, Qin H M, Chu T J, Wu J H. Spatial distribution of zooplankton in the intertidal marsh creeks of the Yangtze River Estuary, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 85(3): 399-406.
[12] Huang C J, Lin X P, Lin J D, Du H, Dong Q X. Population dynamics of *Pseudo-nitzschia pungens* in Zhelin Bay, China. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2009, 89(4): 663-668.
[13] 刘亚林, 姚炜民, 张树刚, 陈雷. 2008年夏季飞云江口浮游植物分布特征及与环境因子的相关性. 海洋环境科学, 2009, 28(S1): 31-34.
[14] 康元德. 莱州湾浮游植物的季节变化. 齐鲁渔业, 1985, 9(2): 31-34.
[15] 王俊, 康元德. 渤海浮游植物种群动态的研究. 海洋水产研究, 1998, 19(1): 43-52.
[16] 王俊. 莱州湾浮游植物种群动态研究. 海洋水产研究, 2000, 21(3): 33-38.
[17] 刘慧, 方建光, 董双林, 梁兴明, 姜卫蔚, 王立超, 连岩. 莱州湾和桑沟湾养殖海区浮游植物的研究Ⅰ. 海洋水产研究, 2003, 24(2): 9-17.
[18] 俞建銮, 李瑞香. 渤海、黄海浮游植物生态的研究. 黄渤海海洋, 1993, 11(3): 52-59.
[19] 马建新, 郑振虎, 李云平, 邢红艳, 刘义豪. 莱州湾浮游植物分布特征. 海洋湖沼通报, 2002, (4): 63-67.
[20] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第三分册 山东半岛北部和东部海湾. 北京: 海洋出版社, 1991.
[21] 王妍, 张永, 王玉珏, 刘东艳. 胶州湾浮游植物的时空变化特征及其与环境因子的关系. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 163-170.
[22] 王迪, 陈丕茂, 逯晶晶, 马媛. 钦州湾浮游植物周年生态特征. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1686-1692.
[23] Hawkins A J S, Fang J G, Pascoe P L, Zhang J H, Zhang X L, Zhu M Y. Modelling short-term responsive adjustments in particle clearance rate among bivalve suspension-feeders: separate unimodal effects of seston volume and composition in the scallop *Chlamys farreri*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2001, 262(1): 61-73.