

胶州湾浮游植物粒级结构及其时空变化^{*}

孙晓霞¹ 孙 松^{1, 2}

(1. 中国科学院海洋研究所 山东胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站 青岛 266071;

2. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071)

提要 基于 2003—2010 年间对胶州湾分粒级叶绿素 *a* 浓度的连续观测, 系统研究了胶州湾浮游植物粒级结构的季节变化、年际变化及长期变化特征。结果表明, 胶州湾表层浮游植物粒级组成以小型和微型浮游植物为主, 其浓度由东北部和北部向湾中间及湾外逐渐递减。不同区域分粒级叶绿素 *a* 浓度的季节与年际变化规律相似。小型和微型浮游植物表现出明显的双峰型季节变化, 小型浮游植物的高峰值通常出现在冬季, 而微型浮游植物则出现在夏季。长期变化结果表明, 冬季小型浮游植物所占比例自 90 年代起表现为增加的趋势, 而夏季的变化规律与冬季相反, 自 1998 年开始, 小型浮游植物所占比例下降, 微型浮游植物比例有所上升。春季和秋季小型和微型浮游植物的贡献率没有表现出明显的升高或降低趋势, 但微微型浮游植物的贡献率在 2000 年之后显著低于 2000 年之前。统计分析结果表明, 温度、营养盐浓度与结构是影响胶州湾浮游植物粒级结构变动的重要因素。

关键词 浮游植物, 粒级结构, 时空变化, 胶州湾

中图分类号 Q178.1; Q948.885.3

浮游植物的粒级结构特征对于控制海洋生态系统中的物流、能流结构和海洋碳的通量具有重要作用(宁修仁, 1997), 对于认识海域生态系统动力过程及微食物环的作用亦具有重要意义(黄邦钦等, 2006)。作为海洋食物网中低营养阶层的主体, 浮游植物类群组成的变化会导致整个海洋生态系统结构与功能的改变。

关于胶州湾浮游植物粒级结构的研究起步较早, 如陈怀清等(1992)、焦念志等(1995)、吴玉霖等(2004), 上述研究主要以季度月的研究为主, 缺乏对胶州湾浮游植物粒级结构的周年变化、年际变化和长期变化的研究。近 20 年来, 随着人类活动影响的加剧, 胶州湾的环境和浮游植物群落结构发生了很大的变化(吴玉霖等, 2005), 这种变化必然体现在浮游植物的粒级组成上, 并最终对整个生态系统的结构与功能产生影响。本文基于 2003—2010 年间胶州湾浮游植物粒

级结构的逐月观测, 系统研究和分析了胶州湾浮游植物粒级结构特征、时空变化规律及关键影响因子, 以为胶州湾生态系统的长期变化研究提供基本依据。

1 材料与方法

1.1 分粒级叶绿素 *a* 浓度的测定

胶州湾长期观测站位共 14 个, 本研究选取其中 2、3、5、10 号站, 分别代表胶州湾的不同区域, 进行分粒级叶绿素 *a* 的时空变化研究。于 2003 年 5 月—2010 年 12 月每月中旬采用叶绿素 *a* 粒级分离法对胶州湾四个代表性站位进行浮游植物粒级结构研究。采样站位如图 1 所示。按三个粒级范围进行叶绿素 *a* 的粒级分离, 分别为: $>20\mu\text{m}$ 的小型浮游植物(micro-phytoplankton), 主要包括较大个体的单细胞藻类和部分链状硅藻; $2—20\mu\text{m}$ 的微型浮游植物(nano-

^{*} 中国科学院知识创新工程重要方向项目群项目, KZCX2-YW-Q07-01 号; 国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2011CB403603 号; 中国科学院战略性先导科技专项, XDA05030401 号; 国家自然科学基金项目, 40876083 号。孙晓霞, 博士, 研究员, E-mail: xsun@qdio.ac.cn

通讯作者: 孙 松, 博士, 研究员, E-mail: sunsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-12-31, 收修改稿日期: 2012-02-28

phytoplankton); 0.45—2 μm 的超微型浮游植物 (pico-phytoplankton)。水样采集后, 立即使用孔径为 20 μm 的筛绢、2 μm 及 0.45 μm 的醋酸纤维素滤膜进行分级过滤, 滤水体积为 500ml。叶绿素 *a* 浓度的测定按海洋调查规范(GB12763.6-91)(国家技术监督局, 1991)规定的萃取荧光法, 用 Turner Design Model-10 荧光光度计进行测定, 计算不同粒级叶绿素 *a* 的含量。

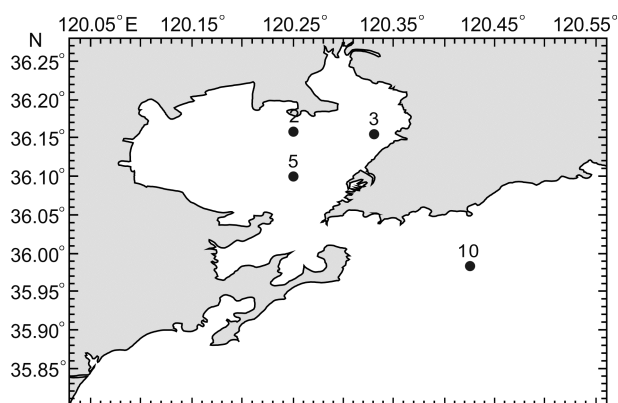


图 1 胶州湾分级叶绿素 *a* 调查站位图

Fig.1 Sampling stations of size-fractionated Chl. *a* in Jiaozhou Bay

1.2 其它环境要素的测定

其它环境要素的测定与分粒级叶绿素 *a* 同步进行, 其中, 温度、盐度的测定主要通过 CTD 进行, 氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐五项营养盐

的采集、处理、保存按照海洋调查规范(GB12763.6-91)(国家技术监督局, 1991)进行, 利用 SKALAR 流动分析仪(荷兰)和 QuAAtro 连续流动分析仪(德国)分析测定。浮游动物样品分别采用浅水 I 型和浅水 II 型浮游生物网由底至表进行垂直拖网采集, 甲醛溶液固定, 实验室内镜检计数。

1.3 数据分析

统计分析采用 SPSS16.0 软件进行。

2 结果

2.1 胶州湾浮游植物粒级组成的季节变化

2004—2010 年胶州湾不同区域浮游植物粒级组成的季节变化规律如图 2 所示。2、3、5、10 四个代表性站位分别表示湾北部、东北部、湾中间和湾外。四个区域受影响的过程不同, 其中 2 号站靠近近岸, 也是主要的贝类养殖区; 3 号站受废水排放影响较大, 富营养化程度较高; 5 号站位于湾中间区域, 也是水交换的锋面区, 同时受到近岸和外海的影响; 10 号站位于湾外, 主要代表外海及邻近海域的情况。图 2 结果表明, 不同区域叶绿素 *a* 浓度的总体水平不同, 表现为湾东北部的 3 号站和北部的 2 号站浓度较高, 向湾中间的 5 号站及湾外的 10 号站浓度逐渐递减。不同区域分粒级叶绿素 *a* 浓度的季节变化规律相似。从表层分粒级叶绿素 *a* 的变化情况看, 小型和微型浮游植物表现出明显的双峰型季节变化, 分别在冬季和夏

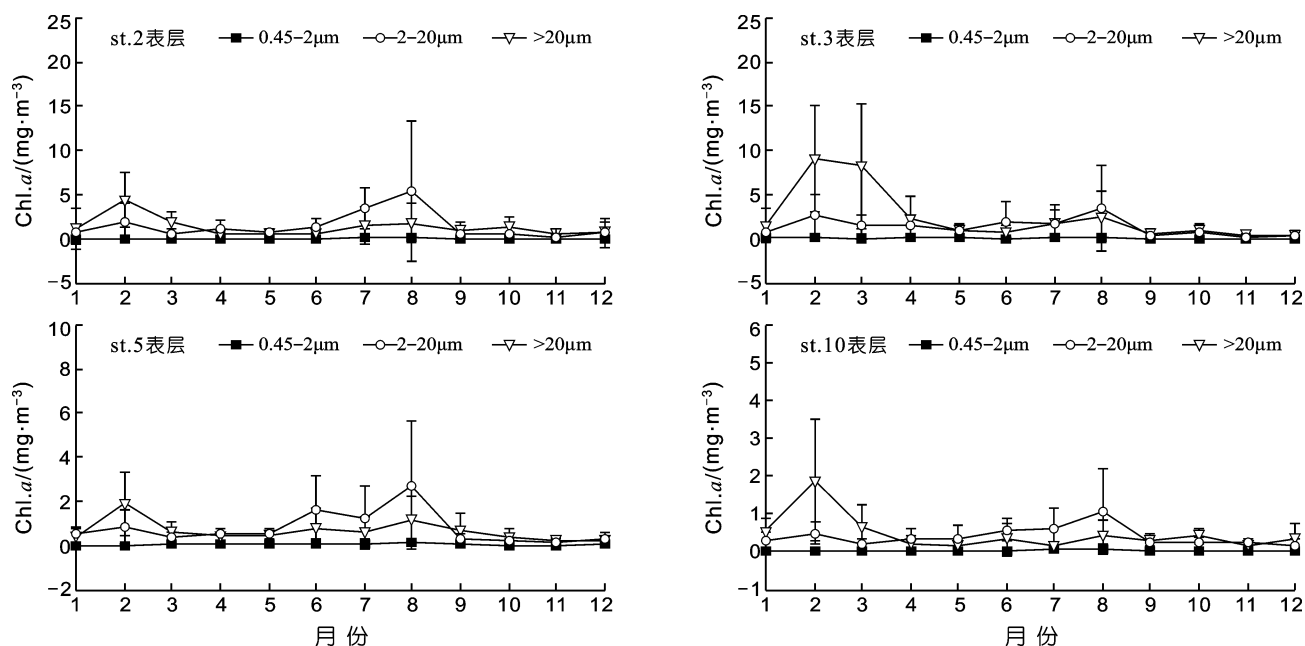


图 2 胶州湾不同区域分粒级叶绿素 *a* 浓度的季节变化(2004—2010 平均)

Fig.2 Seasonal changes of the size-fractionated Chl. *a* in Jiaozhou Bay (mean of 2004—2010)

季形成峰值, 但二者形成高峰和次高峰的时间不同。小型浮游植物的高峰值通常出现在冬季, 而微型浮游植物则出现在夏季。2、3、5、10 号站表层小型浮游植物叶绿素 a 的年平均值分别为 1.30、2.41、0.65 和 $0.47\text{mg}/\text{m}^3$, 其中 3 号站 2 月份小型浮游植物平均浓度最高, 达到 $9.1\text{mg}/\text{m}^3$ 。微型浮游植物叶绿素 a 的年平均值分别为 1.42、1.38、0.77、 $0.17\text{mg}/\text{m}^3$, 其中 2 号站 8 月份微型浮游植物平均浓度最高, 为 $5.36\text{mg}/\text{m}^3$ 。与小型和微型浮游植物相比, 微微型浮游植物的总体浓度较低, 四个站的平均浓度分别为 0.04、0.06、0.04 和 $0.03\text{mg}/\text{m}^3$, 微微型浮游植物平均浓度最高值出现在 3 号站的 8 月份。这一规律与以前报道的胶州湾总叶绿素 a 浓度呈现双周期型的季节变化规律是一致的(孙松等, 2002)。

进一步分析不同粒级叶绿素 a 所占比例的变化情况, 发现不同站位尽管分粒级叶绿素 a 浓度不同, 但组成比例基本是一致的, 为此, 取不同站位的平均浓度进行分粒级叶绿素比例研究, 结果如图 3 所示。根据图 3 的结果, 表层小型浮游植物在冬季和秋季对总叶绿素 a 浓度的贡献较大, 以 3 月份所占比例最高, 达到 80.6%, 6 月份最低, 贡献率为 30%。微型浮游植物在春季和夏季的贡献较大, 6—8 月份所占比例最高, 达到 65%左右。微微型浮游植物的贡献率低于 4%。

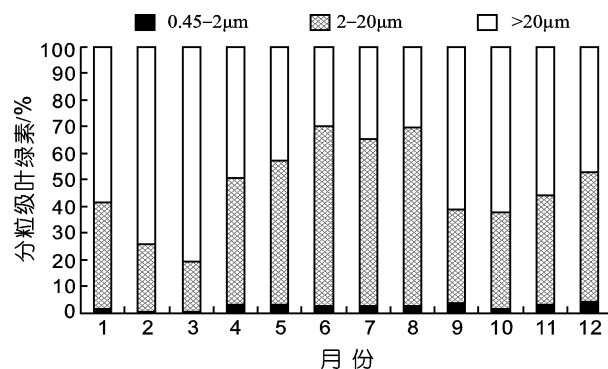


图3 胶州湾分粒级叶绿素 a 组成比例季节变化

Fig.3 Seasonal changes of the percentages of size-fractionated Chl. a in Jiaozhou Bay

2.2 胶州湾浮游植物粒级组成的年际变化

2003—2010 年胶州湾分粒级叶绿素 a 的年际变化规律为: 表层小型和微型浮游植物的变化规律与季节变化相似, 基本上呈现每年双周期的变化规律, 其中大于 $20\mu\text{m}$ 粒级叶绿素 a 的最高峰值出现在 2005 年 2 月份的 3 号站, 达到 $20.85\text{mg}/\text{m}^3$; $2-20\mu\text{m}$ 粒级叶绿素 a 的最高峰值出现在 2004 年 8 月份的 2 号站, 达到 $21.29\text{mg}/\text{m}^3$, $0.45-2\mu\text{m}$ 粒级叶绿素 a 的浓度高值出现在 2008 年 8 月份的 3 号站, 浓度为 $1.03\text{mg}/\text{m}^3$ 。与不同粒级叶绿素 a 的浓度相对应, 胶州湾表层不同粒级叶绿素 a 所占比例的年际变化规律如图 4 所示。

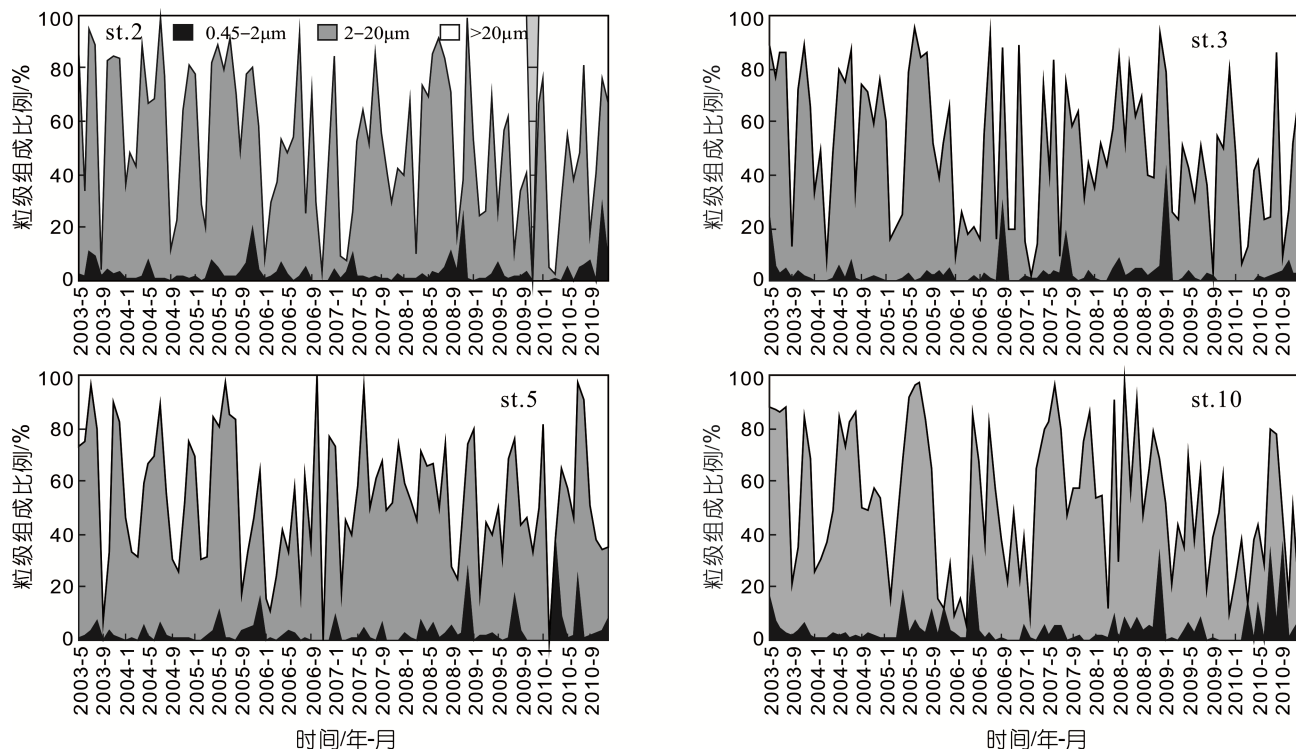


图4 胶州湾分粒级叶绿素 a 组成比例的年际变化

Fig.4 Annual changes of the percentages of the size-fractionated Chl. a in Jiaozhou Bay

表层水体中小型和微型浮游植物叶绿素 *a* 所占比例的波动范围分别可以达到为 0%—100%, 微型浮游植物所占比例的波动范围为 0%—40.3%。不同年度分粒级叶绿素 *a* 比例基本保持冬季以小型浮游植物为主、夏季以微型和微微型浮游植物为主的变化规律。

2.3 胶州湾浮游植物粒级组成的长期变化

结合胶州湾浮游植物粒级组成的历史资料, 进一步分析近 20 年来胶州湾浮游植物粒级组成的长期变化。为保持与历史资料的一致性, 采用湾中间的 5 号站数据进行分析, 结果如图 5 所示。通过与陈怀清等(1992)、王勇(2001)¹⁾、吴玉霖等(2004)等历史资料的比较发现, 不同季节浮游植物粒级结构的变化规律不同。图 5(a)的结果表明, 冬季小型浮游植物所占比例自 20 世纪 90 年代起表现为增加的趋势, 1998 年之前, 小型浮游植物的贡献率不足 50%, 至 2006 年达到 80% 以上, 2010 年接近 100%。自 2001 年开始, 微型浮游植物的比例有所下降, 2001—2003 年微型浮游植物比例可达到 40% 左右, 到 2006、2007 和 2009 年则不足 20%。同样, 微微型浮游植物的比例从 1998 年开始下降, 2000 年之后所占比例不足 5%。图 5(c)的结果表明, 夏季浮游植物粒级结构的变化规律与

冬季相反, 主要表现为, 自 1998 年开始, 小型浮游植物所占比例下降, 微型浮游植物比例有所上升。图 5(b)、(d)的结果表明, 春季和秋季小型和微型浮游植物的贡献率没有表现出明显的升高或降低趋势, 呈现为一种波动状态, 但微微型浮游植物的贡献率在 2000 年之后低于 2000 年之前。

3 讨论

根据已有研究, 决定浮游植物粒级结构组成特征的环境因子通常有多个方面。其中温度、营养盐浓度以及浮游动物摄食等方面较为关键。为深入了解胶州湾浮游植物粒级结构变动的控制因素, 选取胶州湾中部代表性站位 5 号站, 针对温度、盐度、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐、大、中网采浮游动物的丰度等与浮游植物粒级变动相关的环境要素进行主成分分析, 结果如表 1 所示。共提取三个主成分, 其中第一主成分主要由温度、盐度、硅酸盐浓度、硝酸盐浓度和亚硝酸盐浓度组成。其中温度直接代表季节变化的影响, 盐度、硅酸盐浓度、硝酸盐浓度主要受控于河流输入季节性变化的影响(Shen, 2001; Liu *et al*, 2005), 在此间接代表季节变化。因此,

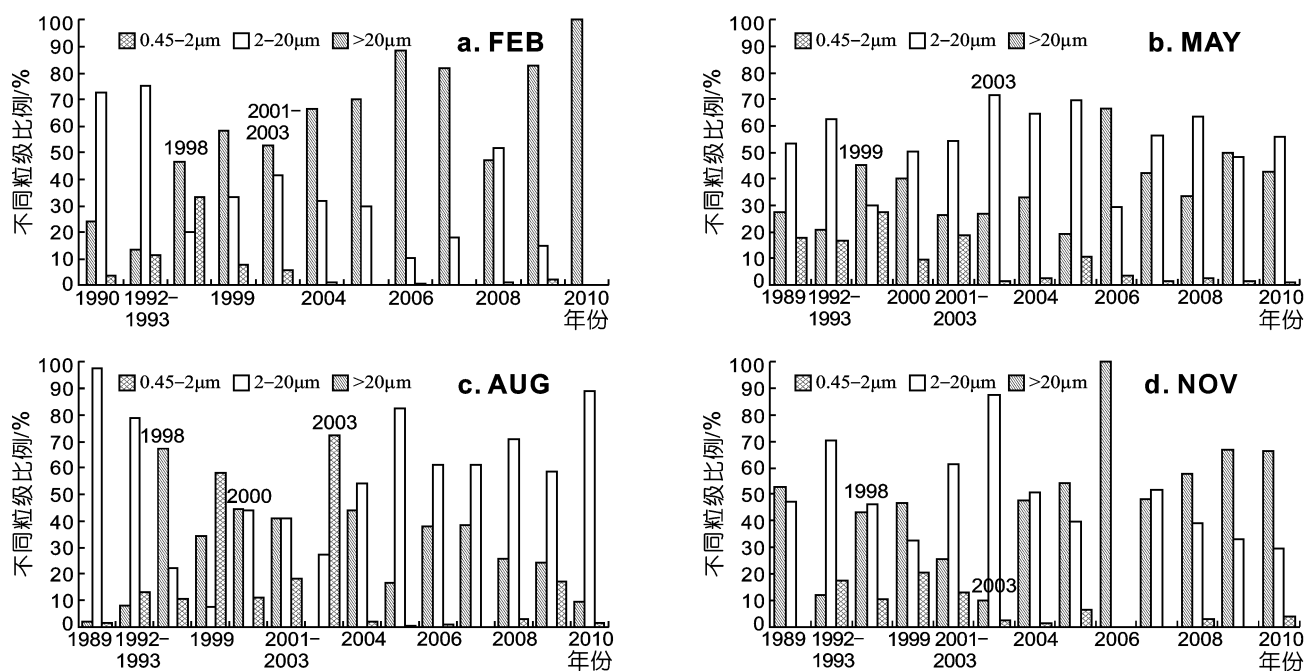


图 5 不同粒级浮游植物比例的长期变化

Fig.5 Long term changes of the percentages of the size-fractionated Chl.a

1) 王 勇, 2001. 中国若干典型海域作用域浮游植物上、下行效应的研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 1—199

第一主成分主要代表了季节变化以及随季节变化引起的营养盐浓度变化的影响。第二主成分主要由大、中网浮游动物丰度组成, 主要代表浮游动物对浮游植物粒级结构的影响。第三主成分主要由氨氮和磷酸盐浓度组成, 由于胶州湾的氨氮和磷酸盐主要来自污水排放, 第三主成分主要代表因排污引起的营养盐浓度变化的影响。在此基础上, 进一步进行分粒级叶绿素 a 浓度及贡献率与上述环境因子的相关性分析, 结果分别如表 2、表 3 所示。

根据胶州湾浮游植物粒级结构组成与季节变化特征, 胶州湾的浮游植物粒级组成主要以小型和微型浮游植物为主, 其中冬季以小型浮游植物占据优势, 而夏季则以微型浮游植物为主。根据相关性分析

表 1 胶州湾主要环境要素主成分分析结果
Tab.1 The Principal Component Analysis of the major environmental factors in Jiaozhou Bay

环境因子	主成分		
	1	2	3
T	0.679	0.340	-0.171
S	-0.923	-0.030	-0.002
SiO_3^{2-}	0.905	0.025	-0.059
NH_4^+	0.305	0.316	0.584
NO_3^-	0.844	-0.095	0.134
NO_2^-	0.821	-0.046	-0.035
PO_4^{3-}	-0.136	0.025	0.841
zp1	-0.095	0.900	-0.096
zp2	-0.188	0.907	-0.054

表 2 胶州湾不同粒级叶绿素 a 浓度与环境因子的相关性分析
Tab.2 Correlation between the size-fractionated Chl. a concentrations and the environmental factors

站 位	粒级(μm)	水温	盐度	硝酸盐	亚硝酸盐	氨盐	磷酸盐	硅酸盐	浮游动物 I	浮游动物 II	桡足类 I	桡足类 II
st.2	0.45—2	0.317** ¹⁾	-0.267*	0.029	0.084	-0.056	0.014	-0.035	0.189	0.070	0.120	0.073
	2—20	0.284**	-0.274*	0.073	0.072	-0.104	0.001	-0.105	0.214*	0.168	0.188	0.144
	>20	-0.129	-0.059	0.025	-0.017	-0.113	-0.089	-0.261*	0.078	-0.039	0.121	-0.069
st.3	0.45—2	0.138	-0.157	0.048	0.033	-0.092	0.062	0.096	0.060	0.032	0.051	0.043
	2—20	0.200	-0.167	-0.043	-0.002	-0.092	-0.007	0.063	0.042	0.043	0.018	0.042
	>20	-0.167	0.092	-0.087	-0.219*	-0.070	-0.127	-0.183	-0.055	-0.047	-0.053	-0.047
st.5	0.45—2	0.223*	-0.025	0.060	0.008	0.184	0.196	-0.052	0.129	0.322**	0.024	0.359**
	2—20	0.324**	-0.303**	0.308**	0.122	0.348**	0.069	0.165	0.217*	0.215	-0.004	0.231
	>20	0.017	-0.167	0.205	0.293**	0.07	0.026	0.060	0.061	0.035	0.032	0.043
st.10	0.45—2	0.194	-0.046	0.261*	0.005	0.302**	0.174	0.078	0.045	0.126	-0.015	0.133
	2—20	0.294**	-0.193	0.225*	0.014	0.276**	0.143	0.164	0.007	0.168	-0.048	0.173
	>20	-0.285**	0.086	-0.047	0.041	-0.125	-0.110	-0.145	-0.032	-0.109	-0.055	-0.104

注: $n = 90$ 。*表示差异显著($P < 0.05$), **表示差异极显著($P < 0.01$)

表 3 胶州湾不同粒级叶绿素 a 贡献率与环境因子的相关性分析
Tab.3 Correlation between the percentages of size-fractionated Chl. a and the environmental factors

站 位	粒级(μm)	水温	盐度	硝酸盐	亚硝酸盐	氨盐	磷酸盐	硅酸盐	浮游动物 I	浮游动物 II	桡足类 I	桡足类 II
st.2	0.45—2	0.077	-0.024	0.176	0.215*	0.136	0.004	0.185	-0.050	-0.091	-0.053	-0.092
	2—20	0.258*	-0.173	0.084	0.002	0.004	0.132	0.201	0.072	0.166	0.031	0.178
	>20	-0.267*	0.174	-0.113	0.039	-0.027	-0.130	-0.229*	-0.062	-0.150	-0.022	-0.162
st.3	0.45—2	0.061	-0.143	0.112	0.046	-0.032	0.063	0.095	0.037	0.032	0.041	0.043
	2—20	0.214*	-0.203	0.093	0.198	0.037	0.130	0.242*	0.093	0.043	0.071	0.042
	>20	-0.215*	0.222	-0.112	0.197	-0.028	-0.137	-0.249*	-0.096	-0.047	-0.076	-0.047
st.5	0.45—2	-0.029	0.080	-0.057	-0.113	0.031	0.075	-0.101	-0.005	0.027	-0.016	0.052
	2—20	0.260*	-0.107	0.028	-0.079	0.196	0.057	0.122	0.163	0.172	0.004	0.172
	>20	-0.248*	0.085	-0.014	0.104	-0.199	-0.074	-0.095	-0.159	-0.171	0.000	-0.175
st.10	0.45—2	0.080	0.066	0.049	-0.092	0.070	0.122	0.012	0.023	0.031	0.012	0.044
	2—20	0.362**	-0.150	-0.063	-0.075	0.164	0.217*	0.199	0.190	0.278*	0.209*	0.264*
	>20	-0.371**	0.127	0.047	0.097	-0.176	-0.241*	-0.195	-0.189	-0.272*	-0.204	-0.261*

注: $n = 90$ 。*表示差异显著($P < 0.05$), **表示差异极显著($P < 0.01$)

结果, 绝大部分站位分粒级叶绿素 *a* 浓度与贡献率均与温度呈现显著的相关性, 主要表现为微型和微微型浮游植物与水温之间呈现显著的正相关关系, 而小型浮游植物与水温之间呈现显著的负相关关系, 说明冷水中较大个体的浮游植物所占比例较高, 而暖水则适合较小个体浮游植物占据优势。上述结果表明水温是控制胶州湾浮游植物粒级结构季节性变动的重要因素之一。在其它海域的相关研究也表明温度与浮游植物粒级组成之间存在密切的关系。例如, 在东海南部陆架区, 以聚球藻为主要组成的微微型浮游植物数量与温度的变化有密切关系。当温度高于 20℃ 和低于 20℃ 时, 聚球藻的种群丰度可以相差 10 倍 (Chiang *et al.*, 2002)。Andersson 等 (1994) 研究了光照和温度的变化对温带海域波罗的海小型、微型和微微型浮游植物演变的影响, 证明粒级越小的浮游植物, 温度对其影响越大。较高的温度有利于小粒级浮游植物生长。此外, 水温也被认为是影响浮游植物粒级空间分布格局的一个重要因素, 在冷水中大个体浮游植物 (小型和微型浮游植物) 的比例相应较高。

除水温之外, 部分站位的盐度、硝酸盐、硅酸盐与分粒级叶绿素 *a* 浓度和贡献率之间也表现出一定的相关性。由于影响胶州湾的河流为季节性河流, 而胶州湾盐度、硅酸盐的含量主要受河流径流的影响, 硝酸盐浓度主要受径流及大气沉降的影响 (Liu *et al.*, 2005)。相关性分析表明, 水温与上述环境要素之间存在极为显著的相关关系, 由此可以认为分粒级叶绿素 *a* 与上述要素之间的相关性更多到受季节性因素的影响。氨氮的浓度与 5 号站和 10 号站较小粒级浮游植物叶绿素 *a* 浓度 (包括微微型和微型浮游植物) 之间存在极为显著的正相关关系, 说明较小粒级浮游植物的生长更容易受到氨氮浓度的影响, 且这种影响在靠近外海的站位更为明显。磷酸盐的浓度与分粒级叶绿素 *a* 浓度之间未表现出相关关系, 但与 10 号站分粒级叶绿素 *a* 贡献率表现出一定的相关性, 二者的作用关系尚需进一步的验证。

关于营养盐与浮游植物粒级结构之间的关系, 一般认为, 在硝酸盐浓度较高的海域, 通常支持个体较大粒级的浮游植物生长, 在氨氮含量较高的海域, 通常支持较小粒级浮游植物的生长。胶州湾 5 号、10 号站氨氮与较小粒级浮游植物之间的相关性进一步证实了这一点。为了进一步了解浮游植物粒级结构与无机氮组成结构之间的关系, 分析了分粒级叶绿素 *a* 贡献率与总溶解无机氮中不同氮盐组成比例之间的

相关性, 结果如表 4 所示。可以看出, 对应营养盐浓度较高的近岸站位, 由于营养盐相对过剩, 二者未表现出明显的相关关系。对于湾中部的 5 号站, 氨氮比例与小型浮游植物表现为负相关关系。对于湾外的 10 号站, 氨氮比例与微型浮游植物之间表现为极为显著的正相关关系, 与小型浮游植物之间表现为极为显著的负相关关系, 而硝酸盐则相反, 与小型浮游植物之间表现为极其显著的正相关关系, 与微型浮游植物之间表现为极其显著的负相关关系, 进一步证实了上述观点。

表 4 胶州湾不同粒级叶绿素 *a* 贡献率与无机氮盐贡献率的相关性分析

Tab.4 Correlation between the percentages of size-fractionated Chl.*a* and the percentages of ammonia, nitrite, and nitrate

站位	粒级(μm)	氨盐	硝酸盐	亚硝酸盐
st.2	0.45—2	0.054	-0.058	0.023
	2—20	-0.082	0.003	0.039
	>20	0.071	0.007	-0.042
st.3	0.45—2	-0.186	0.184	0.125
	2—20	-0.072	0.031	0.176
	>20	0.180	-0.069	-0.193
st.5	0.45—2	0.145	-0.105	-0.123
	2—20	0.179	-0.162	-0.089
	>20	-0.210*	0.185	0.117
st.10	0.45—2	0.140	-0.083	-0.144
	2—20	0.355**	-0.354**	0.132
	>20	-0.379**	0.763**	0.165

这一现象在其它海域亦有例证。Furnas (1983) 对 Narragansett 湾的研究指出, 当硝酸盐浓度超过 5 μmol/L 时, 大于 10 μm 粒级的浮游植物占氮吸收的 80% 以上, 当硝酸盐浓度小于 1 μmol/L 时, 小于 10 μm 粒级的浮游植物占优。Malone (1971) 提出网采浮游植物主要利用新生氮源, 而个体较小的浮游植物如微型和微微型浮游植物主要利用氨氮等再生氮源。Maguer 等 (2009) 研究了法国比斯开湾春季分粒级浮游植物生物量和氮吸收对高营养盐含量的响应。结果表明, 对于硝酸盐丰富的水域, 个体较大的浮游植物 (>10 μm) 对生物量的贡献和对硝酸盐的吸收速率大, 这在硝酸盐浓度高于 7—10 μmol/L 的近岸水体尤为显著。在这些水体中, 硝酸盐在氮吸收中的贡献高于 50%, 而较小的浮游植物 (<10 μm) 主要吸收氨氮。由此认为, 比斯开湾高的硝酸盐输入是影响浮游植物粒级结构的首要因子。近 20 年来胶州湾的营养盐变化特点为各项营养盐浓度均有显著升高, 其中以硝酸

盐浓度升高的幅度最大, 许多区域超过 $7\text{--}10\mu\text{mol/L}$, 而氮氮的含量在 2001 年后涨幅减缓, 部分年份甚至开始下降。胶州湾 5 号站不同氮源占总溶解无机氮比例的长期变化如图 6 所示。除春季氨氮占优势外, 其余季节均由原来的氨氮占优逐渐转变为硝酸氮占优。这种趋势与图 5 中小型浮游植物贡献率的长期变化趋势基本一致。

关于胶州湾浮游植物粒级结构与浮游动物之间的关系, 考虑到桡足类是胶州湾浮游动物摄食浮游植物的主要类群, 在此分别分析了大网和中网采集的浮游动物丰度以及桡足类丰度与分粒级叶绿素 a 浓度和贡献率之间的相关关系。从表 2 和表 3 的结果可以看出, 绝大部分站位浮游动物和不同粒级叶绿素 a 之间不存在明显的相关关系, 但 5 号站中网采集的浮游动物以及桡足类丰度与微小型浮游植物叶绿素 a 浓度之间存在极为显著的正相关关系, 10 号站中网采集的浮游动物及桡足类与微型浮游植物叶绿素 a 贡献率之间存在显著的正相关关系, 与小型浮游植物叶绿素 a 之间存在显著的负相关关系。一些研究表明, 桡足类的摄食具有一定的粒级选择性, 桡足类通常倾向于摄食直径大于 $5\text{--}10\mu\text{m}$ 的食物颗粒, 对小于 $5\mu\text{m}$ 的饵料颗粒摄食效率很低(Harris, 1982; Dam *et al*, 1991)。这在某种程度上能够说明上述的相关关系, 但浮游动物与浮游植物之间的摄食关系极其复

杂, 浮游动物在胶州湾浮游植物粒级结构的变化中发挥怎样的作用, 尚需进一步的研究。

4 结论

胶州湾浮游植物粒级结构及其时空变化研究的结果表明:

(1) 胶州湾浮游植物粒级组成以小型和微型浮游植物为主, 微小型浮游植物的贡献率不足 4%。小型和微型浮游植物表现出明显的双峰型季节变化, 小型浮游植物的高峰值通常出现在冬季, 而微型浮游植物则出现在夏季。

(2) 不同季节浮游植物粒级结构的长期变化规律不同。冬季小型浮游植物所占比例自 90 年代起表现为增加的趋势, 由 1998 年之前不足 50% 的贡献率升高至 2006 年的 80% 和 2010 年的接近 100%。微型浮游植物的比例有所下降, 2001—2003 年微型浮游植物比例可达到 40% 左右, 到 2006、2007 和 2009 年则不足 20%。夏季浮游植物粒级结构的变化规律与冬季相反, 自 1998 年开始, 小型浮游植物所占比例下降, 微型浮游植物比例有所上升。

(3) 水温是控制胶州湾浮游植物粒级结构季节性变动的重要因素之一, 微型和微小型浮游植物的生长更容易受到氨氮浓度的影响, 而硝酸盐与小型浮游植物之间表现为极其显著的正相关关系。

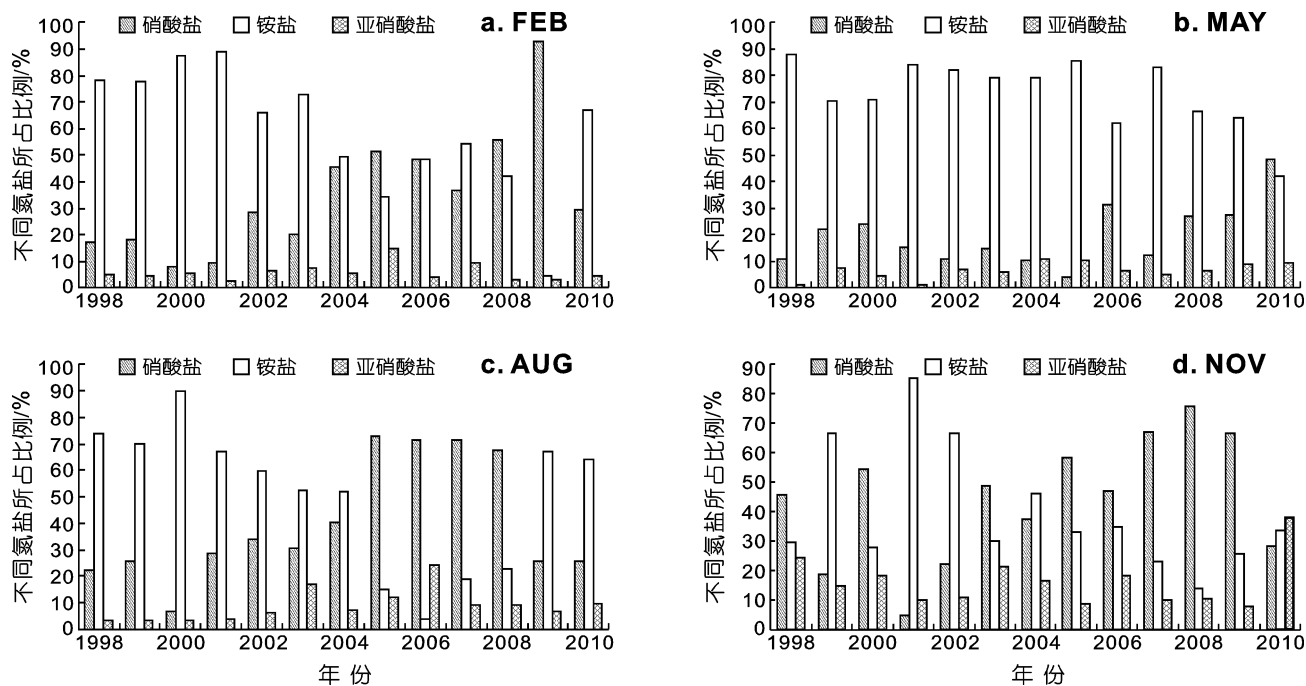


图 6 不同氮盐占总无机氮比例的变化

Fig.6 Long term changes of the percentages of ammonia, nitrite and nitrate in the dissolved inorganic nitrogen

致谢 本研究得到胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站和中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室浮游生物组各位老师及同学的大力支持, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 宁修仁, 1997. 海洋微型和微型浮游生物. 东海海洋, 15(3): 60—64
- 孙 松, 刘桂梅, 张永山, 2002. 90 年代胶州湾浮游植物种类组成和数量分布特征. 海洋与湖沼, 33(浮游动物研究专辑): 37—44
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山等, 2004. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究. 海洋与湖沼, 35(6): 518—523
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山, 2005. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落的影响. 海洋与湖沼, 36(6): 487—498
- 陈怀清, 钱树本, 1992. 青岛近海微型、超微型浮游藻类的研究. 海洋学报, 14(3): 105—113
- 国家技术监督局, 1991. 海洋调查规范(GB/T12763.7-1991). 北京: 中国标准出版社: 1—16
- 黄邦钦, 刘 媛, 陈纪新等, 2006. 东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布. 海洋学报, 28(2): 156—164
- 焦念志(Jiao Nianzhi), 高亚辉(Gao Yahui), 1995. Ecological studies on nanoplanktonic diatoms in Jiaozhou Bay, China. 见: 董金海, 焦念志主编, 胶州湾生态学研究. 北京: 科学出版社, 96—102
- Andersson A, Haecky P, Hagström A, 1994. Effect of temperature and light on the growth of micro- nano- and pico-plankton: impact on algal succession. Marine Biology, 120: 511—520
- Chiang K P, Kuo M C, Chang J *et al*, 2002. Spatial and temporal variation of the *Synechococcus* population in the East China Sea and its contribution to phytoplankton biomass. Continental Shelf Research, 22: 3—13
- Dam H G, Peterson W T, 1991. *In situ* feeding behavior of the copepod temora longicornis, effects of seasonal changes in chlorophyll size fractions and female size. Mar Ecol Prog Ser, 71: 113—123
- Furnas M L, 1983. Nitrogen dynamics in the lower Narragansett Bay, Rhode Island. I—uptake by size-fractionated phytoplankton populations. Journal of Plankton Research, 5: 657—676
- Harris R P, 1982. Comparison of the feeding behavior of *Calanus* and *Pseudocalanus* in two experimentally manipulated enclosed systems. J Mar Biol Ass U K, 62:71—91
- Liu S M, Zhang J, Chen H T *et al*, 2005. Factors influencing nutrient dynamics in the eutrophic Jiaozhou Bay, North China. Progress in Oceanography, 66: 66—85
- Malone T C, 1971. The relative importance of nanoplankton and net plankton as primary producers in the California Current system. Fisheries Bulletin, 68: 799—820
- Maguer J, Waeles M, Morin P *et al*, 2009. Size-fractionated phytoplankton biomass and nitrogen uptake in response to high nutrient load in the North Biscay Bay in spring. Continental Shelf Research, 29(8): 1103—1110
- Shen Z L, 2001. Historical Changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52: 211—224

PHYTOPLANKTON SIZE STRUCTURE AND ITS TEMPORAL AND SPATIAL CHANGES IN JIAOZHOU BAY

SUN Xiao-Xia¹, SUN Song^{1, 2}

(1. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071;

2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Abstract On the basis of the monthly observation of concentrations of size-fractionated Chl.*a* during 2003—2010, the phytoplankton size structure and its seasonal, annual, and long term changes in Jiaozhou Bay were studied. Results indicated that the micro- and nano-phytoplankton were the main components in the phytoplankton community in Jiaozhou Bay. The concentration of Chl.*a* decreased from the north and northeast to the middle and the south of the bay. The seasonal and annual changes of the size-fractionated Chl.*a* concentrations were similar in different areas of the bay. The micro- and nano-phytoplankton showed a seasonal change of double-peak, with the micro-phytoplankton peak in winter and nano-phytoplankton peak in summer. The percentage of the micro-, nano- and pico-phytoplankton in different areas were similar. The results of the long term changes indicated that the percentage of the micro-phytoplankton was increasing since 1990s in the winter, and the nano-phytoplankton percentage increases in the summer. The percentage of pico-phytoplankton significantly decreased after 2000. The temperature, the concentration and structure of nutrients were important factors affecting the change of the size fractionated Chl.*a* in Jiaozhou Bay.

Key words Phytoplankton, Size structure, Temporal and spatial change, Jiaozhou Bay