

黄海冷水团水域浮游植物群落粒级结构的季节变化

傅明珠^{1,2,3}, 孙萍^{1,2}, 王宗灵^{1,2,*}, 李艳^{1,2}, 李瑞香^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋生态环境科学与工程国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 根据 2006—2007 年度 4 个季节航次的实测资料, 分析了黄海冷水团水域浮游植物叶绿素及其粒级结构的时空分布特征及季节变化规律, 结果表明, 在研究海域 30 m 以浅叶绿素总量的平均含量从高到低的顺序为: 春季的 (1.01 mg/m^3)、夏季的 (0.81 mg/m^3)、秋季 (0.72 mg/m^3)、冬季 (0.68 mg/m^3); 在叶绿素浓度大于 1 mg/m^3 和小于 1 mg/m^3 的区域浮游植物粒级结构差异较大, 在整个研究海域, 粒径较小的微型和微微型浮游植物对总生物量的贡献始终占主导 ($>65\%$), 粒径较大的小型浮游植物在冬季和春季贡献率相对较高; 从季节尺度看, 浮游植物的平均粒级指数从大到小的顺序为: 春季的 ($15.47 \mu\text{m}$), 冬季的 ($11.08 \mu\text{m}$), 秋季的 ($8.61 \mu\text{m}$), 夏季的 ($6.52 \mu\text{m}$); 尽管不同季节水文和化学环境差异显著, 但是不同粒径浮游植物的贡献率随总生物量的变化表现出一致性的规律。对环境因子与叶绿素分布的相关分析表明, 浮游植物的生长在夏季主要受到营养盐来源的限制, 冬季主要受到水体混合引起的光照限制, 秋季可能受到磷酸盐和水体混合的共同限制。浮游植物粒级结构的分布格局主要是由各组分在不同环境中的资源竞争优势决定的。

关键词: 黄海冷水团; 叶绿素; 浮游植物粒级结构

中图分类号: Q75

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2010)01-0120-10

1 引言

浮游植物是海洋生态系统食物链的基础, 浮游植物群落的动态变化一直是海洋生态学的重要研究内容^[1-2]。由于不同粒径浮游植物在生理功能、沉降速率和被摄食压力等方面的差异, 浮游植物粒级结构能够强烈影响水生生态系统的食物网结构和碳的循环途径^[3-7]。粒径较大的浮游植物主要通过被中型浮游动物摄食而进入经典食物链, 这样的生态系统的食物网结构相对较简单, 物质和能量传递效率高, 是输出生产力的主要贡献者^[8]。粒径较小的浮游植物 ($<5 \mu\text{m}$) 主要通过原生动物的摄食进入复杂的微食物环, 能量在多级营养传递中被耗散, 有机碳输出真光层的潜力较弱^[4,6]。因此, 研究浮游植物粒级结构的动态变化及其环境影响机制, 对于

了解海洋浮游生态系统的食物网结构变化以及海洋浮游植物的生物泵效率均具有重要意义。

浮游植物在海区的时空分布在很大程度上取决于粒径差异所导致的竞争优势。由于粒径较小的浮游植物具有较高的比表面积, 故吸收营养盐和获取光量子的效率较高, 在低营养盐和弱光条件下具有竞争优势^[9-10]。小粒径浮游植物沉降速率较低, 相对于大粒径浮游植物在真光层中的停留时间较长, 这种优势在层化水体中表现得更为明显^[11], 然而由于小粒径浮游植物与其摄食者的世代周期接近, 因而受到较强的摄食压力, 生物量很难达到较高水平。由于大粒径浮游植物与其摄食者的世代时间差, 故在合适的条件下生物量会快速增加形成水华^[11]。同时, 在高营养盐条件下, 由于大粒径浮游植物具有较高的内禀增长率, 故生长速率会超过小粒径浮游

收稿日期: 2009-08-20; 修订日期: 2009-11-16。

基金项目: 中国近海海洋综合调查与评价专项课题(908-1-ST03); UNDP/GEF 黄海大海洋生态系示范项目(E-I-ratiochgdemo-2135)。

作者简介: 傅明珠(1980—), 女, 山东省淄博市人, 博士后, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: fumingzhu@fio.org.cn

植物而在浮游植物群落中占主导^[12]。因此,小粒径浮游植物在稳定的、寡营养盐的外海地区占优势^[13],而大粒径浮游植物在环境多变的、营养盐丰富的近岸地区占优势^[11,14-15]。目前绝大多数的观测数据都支持上述浮游植物粒级结构的分布格局。

在南黄海生态系统中,黄海冷水团水域受到沿岸流和长江冲淡水的影响较小,水体相对较稳定,是黄海一个典型的生态区域^[16]。黄海冷水团是我国陆架浅海上一个重要的海洋现象,已有的研究表明黄海冷水团的存在会对海水化学要素、浮游植物叶绿素和浮游细菌的分布^[17-19]以及浮游动物关键种中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)夏季的生存策略产生重要影响^[20-21]。尽管已经有部分文献报道了南黄海浮游植物粒级结构的分布特征^[22-23],但是关于黄海冷水团水域浮游植物群落粒级结构季节变化的研

究还鲜见报道。

本文的目的是通过 2006—2007 年 4 个季度航次的实测资料,分析黄海冷水团水域不同粒级浮游植物生物量和粒级结构的时空分布特征及季节变化规律,同时结合同步测定的水文和化学参数,探讨季节尺度上浮游植物粒级结构的主要环境调控因子。

2 材料与方法

2.1 研究海区与站位布设

本文的研究范围为南黄海 124°E 以西、夏季底层水温低于 10 °C 的黄海冷水团水域(图 1)。4 个航次的调查时间分别为 2006 年 7~8 月(夏季)、2007 年 1~2 月(冬季)、2007 年 4 月(春季)、2007 年 10~11 月(秋季)。调查船为“北斗号”科学考察船。

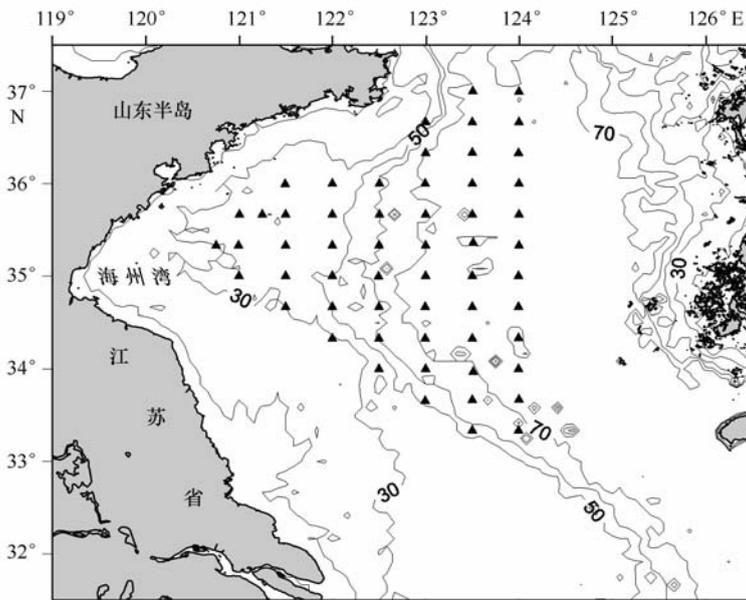


图 1 黄海冷水团水域采样站位($n=57$,水深单位为米)

2.2 样品采集与测定

每个站位的温度、盐度数据从 CTD (Seabird 917) 读出。水样用与 CTD 捆绑的采水器采集,采样深度为 0, 10, 30 m。营养盐的数据由同航次项目组其他成员按照《海洋调查规范》规定的方法经过 0.45 μm GF/F 过滤后,用分光光度计现场测定得到。

本研究将浮游植物分为小型($>20 \mu\text{m}$, 简称 micro), 微型($2\sim20 \mu\text{m}$, 简称 nano) 和微微型浮游植物($<2 \mu\text{m}$, 简称 pico) 进行研究。用不同粒径的

筛绢或滤膜对水样进行分级处理。将 500 mL 水样用 20 μm 的筛绢过滤, 过滤后的水样分成两部分, 分别用 2 μm 的核孔滤膜和 0.6~0.8 μm 的 GF/F 膜过滤, 所得滤膜样品依次代表小型、微型、微微型浮游植物叶绿素。滤膜冷冻保存, 经 $V:V=9:1$ 的丙酮萃取 14~24 h 后, 用 Turner-Designs 700 荧光计进行测定。

2.3 浮游植物粒级指数

为了对浮游植物粒径结构进行定量描述, 本文采用 Bricaud 等^[24] 提出的粒级指数 (SI, size index)

的概念对黄海冷水团水域浮游植物生物量粒级结构的季节变化进行研究。该指数假定小型、微型和微微型的平均中值粒径分别为 50, 5 和 1 μm , 则每个站点的粒级指数通过各粒级组分的中值粒径与其在总生物量中所占比例乘积的和来得到, 其计算公式为

$$SI = (a + 5b + 50c) / 100,$$

式中, a, b, c 分别表示微微型、微型和小型组分的中值粒级与其在总生物量中所占的比例。

尽管粒级指数仅是浮游植物群落的一个粗略的指标, 但是它提供了用单一参数表征浮游植物粒级结构的方法。

3 结果

3.1 水文与化学要素季节变化

黄海冷水团水域受到沿岸流的影响较小, 水文和化学要素的平面分布相对较均匀, 但垂直结构具有明显差异。夏季是黄海冷水团盛行时期, 水体高度层化, 表层水温较高, 平均为 25.17 $^{\circ}\text{C}$, 随水深增加温度逐渐降低, 在 30 m 层绝大多数站位已处于

黄海冷水团的范围内, 平均水温为 9.98 $^{\circ}\text{C}$ (表 1)。由于受到温跃层的阻隔, 在夏季表层水体营养盐处于耗尽状态, $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ 、磷酸盐和硅酸盐的平均浓度分别仅为 0.51, 0.11 和 1.13 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 随水深增加, 营养盐浓度表现出明显增加的趋势。在其他季节水文和化学要素的垂直分布较均匀, 在表 1 中仅列出表层水体数据。在秋季气温的降低和北向季风共同作用使研究海域的水体的稳定性被打破, 底层海水的营养盐被输送至上层水体, 表层海水的 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ 和硅酸盐浓度平均为 4.71 和 4.81 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 但是磷酸盐的浓度低至全年最低水平, 平均仅为 0.06 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。在冬季航次, 海表水温进一步降低, 由秋季的 18.79 $^{\circ}\text{C}$ 降低至 9.87 $^{\circ}\text{C}$, 营养盐浓度相对较丰富, $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$, 磷酸盐和硅酸盐的浓度分别为 5.09, 0.31 和 7.91 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。与冬季航次相比, 春季航次表层水温开始回升, 平均为 10.36 $^{\circ}\text{C}$, 由于浮游植物的消耗, 表层营养盐浓度有所降低, 硝态氮、磷酸盐和硅酸盐的浓度分别为 1.77, 0.20, 4.74 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。

表 1 2006—2007 年黄海冷水团水域水文与化学参数

季节	水深/m	温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度	$\text{NO}_2 + \text{NO}_3 / \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	$\text{PO}_4 / \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$	$\text{SiO}_3 / \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$
春季	0	6.95~12.69	31.77~34.04	0.46~6.55	0.08~0.536	0.58~11.62
		(10.36)	(32.67)	(1.77)	(0.20)	(4.74)
夏季	0	21.29~26.97	28.45~31.91	0.04~4.32	0~0.35	0~4.91
		(25.17)	(31.00)	(0.51)	(0.11)	(1.13)
	10	11.64~25.82	29.14~32.88	0.04~3.36	0~1.53	0~5.18
	30	6.74~14.10	31.87~33.77	0.19~9.84	0~0.61	0~9.24
		(9.98)	(33.09)	(2.11)	(0.24)	(3.12)
秋季	0	15.62~20.41	31.01~32.01	1.22~15.94	0~0.4	1.92~9.61
		(18.79)	(31.58)	(4.71)	(0.06)	(4.81)
冬季	0	4.03~15.23	31.64~34.16	0.18~8.59	0.03~0.59	1.36~11.85
		(9.87)	(32.53)	(5.09)	(0.31)	(7.91)

注: 括号内的数值为平均值。

3.2 不同粒径浮游植物叶绿素的平面分布与季节变化

在 4 个航次的调查中, 在研究海域 30 m 以浅叶绿素 (Chl a) 的平均浓度从高到低的顺序分别为: 春

季的 (1.01 mg/m^3)、夏季的 (0.81 mg/m^3)、秋季的 (0.72 mg/m^3)、冬季的 (0.68 mg/m^3)。在冬季 30 m 层总 Chl a 平均浓度明显低于上层水体的, 在春季和秋季 Chl a 平均浓度的垂直变化不大, 在夏

季 10~30 m 层 Chl a 平均浓度略高于表层水体的 (表 2)。小型浮游植物生物量的季节变动最大,微微型浮游植物生物量相对较稳定,微型的变化介于

前两者之间。从季节尺度看,研究海域浮游植物生物量始终由小粒径浮游植物占主导(表 2),小型浮游植物在春季和冬季对生物量的贡献率相对较高。

表 2 不同水层总叶绿素浓度、不同粒级叶绿素的浓度与平均值

季节		总 Chl a/mg · m ⁻³	Micro/mg · m ⁻³	Nano/mg · m ⁻³	Pico/mg · m ⁻³
春季	0 m	0.24~3.94 (1.02)	0.02~2.41 (0.29)	0.04~0.72 (0.24)	0.14~0.94 (0.37)
	10 m	0.29~4.10 (1.04)	0.02~2.34 (0.32)	0.03~0.84 (0.26)	0.13~0.83 (0.37)
	30 m	0.16~2.74 (0.96)	0.02~1.00 (0.31)	0~1.19 (0.32)	0.04~0.60 (0.26)
	贡献率		33.36%	29.82%	36.82%
夏季	0 m	0.09~3.21 (0.74)	0.01~0.87 (0.07)	0.03~1.58 (0.30)	0.06~1.25 (0.29)
	10 m	0.10~3.70 (0.87)	0.01~0.74 (0.08)	0.03~1.75 (0.31)	0.08~1.24 (0.37)
	30 m	0.12~3.85 (0.82)	0.01~0.60 (0.08)	0.03~2.04 (0.26)	0.10~1.00 (0.37)
	贡献率		10.72%	40.79%	48.49%
秋季	0 m	0.27~2.07 (0.77)	0~1.32 (0.16)	0.03~0.69 (0.15)	0.03~0.86 (0.42)
	10 m	0.26~2.16 (0.77)	0~1.60 (0.16)	0.01~0.60 (0.16)	0.09~0.80 (0.42)
	30 m	0.27~1.63 (0.60)	0.002~0.51 (0.08)	0.04~0.38 (0.12)	0.07~1.33 (0.40)
	贡献率		19.94%	21.03%	59.03%
冬季	0 m	0.32~2.98 (0.75)	0.02~2.27 (0.24)	0.06~0.95 (0.23)	0.06~0.75 (0.30)
	10 m	0.31~3.68 (0.80)	0.01~2.84 (0.32)	0.05~0.70 (0.22)	0.06~0.57 (0.30)
	30 m	0.01~0.81 (0.45)	0.02~0.20 (0.06)	0.06~0.32 (0.17)	0.06~0.47 (0.26)
	贡献率		30.65%	29.48%	39.87%

注:括号内数值为平均值。

在黄海冷水团水域,由于水文和化学要素平面分布相对较均匀,浮游植物生物量的分布规律不明显。总体来讲,在春季黄海中部浮游植物水华区总 Chl a 浓度较高;在夏季研究海域南部靠近黄海西岸一侧的 Chl a 浓度较高;在秋季和冬季研究海域北部近岸地区尤其在海州湾附近 Chl a 浓度较高。小型的 Chl a 与总 Chl a 浓度的分布趋势最相似,微型和微微型的 Chl a 浓度平面分布未表现出明显的规律性。

为了对不同季节研究海域的浮游植物粒级结构进行更直观的比较,采用粒级指数对各个季节的浮游植物粒径进行量化。研究海域 0~30 m 水层浮游植物平均粒级指数由高到低依次为:春季的(15.47 μm)、冬季的(11.08 μm)、秋季的(8.61 μm)、夏季的(6.52 μm)(图 2)。在水温较低的春季和冬季,浮游植物粒级指数要高于水温较高的夏季和秋季。

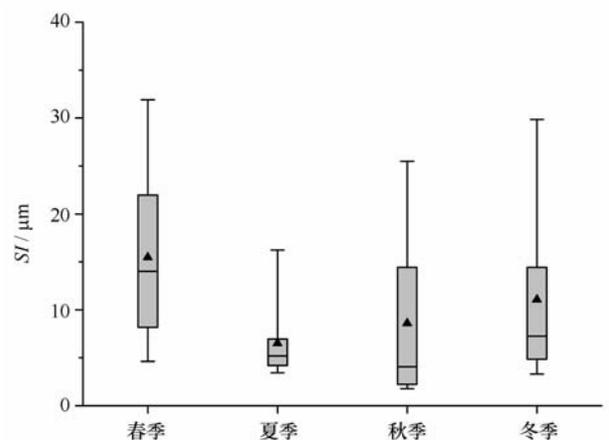


图 2 黄海冷水团水域(0~30 m)浮游植物粒级指数季节变化

3.3 总叶绿素与不同粒级组分的关系

尽管黄海冷水团水域的水动力条件以及营养盐 Chl a 浓度和结构有显著的季节差异,在不同季节以

及不同的水层,浮游植物总叶绿素浓度和各粒径浮游植物对总生物量的贡献率的关系表现出一致的变化规律。小型的贡献率随总生物量的增加而增加,微微型的贡献率随总生物量的增加而降低,微型的贡献率在 Chl a 浓度大于 1 mg/m^3 的区域随总生物量的增加而增加,而在 Chl a 浓度小于 1 mg/m^3 的

区域随总生物量变化不大(夏季和秋季)或略有下降(春季和冬季)(图 3)。大粒径和小粒径浮游植物的优势地位在 Chl a 浓度为 1 mg/m^3 附近发生转换,即小粒径浮游植物尤其是微微型在低生物量区域占优势,而大粒径浮游植物在生物量较高的区域占主导。

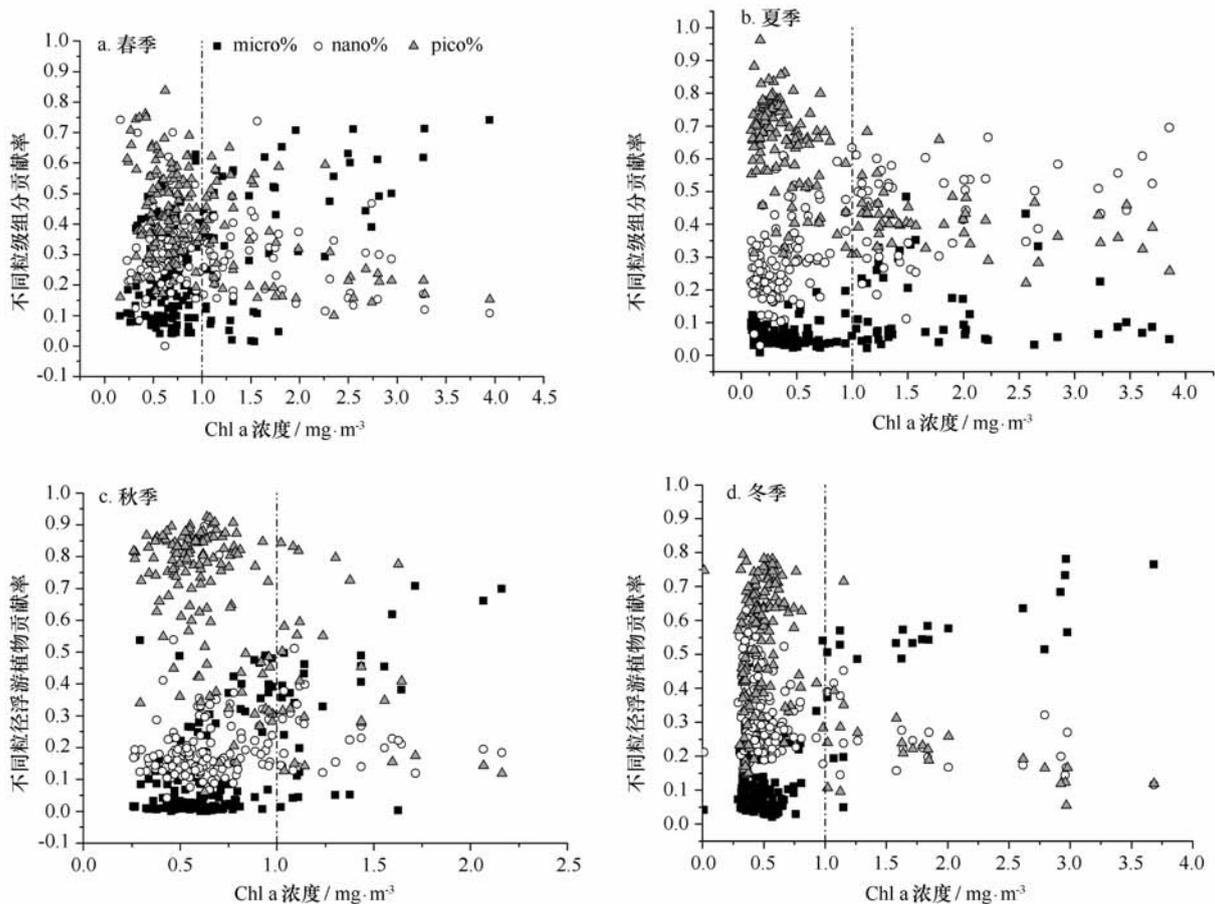


图 3 黄海冷水团水域(0~30 m)浮游植物总生物量与不同粒级组分贡献率的相关性

3.4 浮游植物粒级结构的垂直分布

如前文所述,随叶绿素浓度的变化浮游植物粒级结构有较大差异(图 3),因此本文将研究海域分为 Chl a 浓度大于 1 mg/m^3 和小于 1 mg/m^3 两部分,分别讨论不同水层浮游植物粒级结构的变化。在冬季 30 m 层所有站点的 Chl a 浓度均小于 1 mg/m^3 ,在秋季 30 m 层只有 2 个站点的 Chl a 浓度超过 1 mg/m^3 (浓度分别为 1.04 和 1.02 mg/m^3),因此对秋冬季 30 m 水层均按 Chl a 浓度小于 1 mg/m^3 的区域进行讨论。

在冬季航次中浮游植物垂直分布较均匀,不同

粒级浮游植物在不同水层的比例差异不大。在 Chl a 浓度大于 1 mg/m^3 的区域,小型占明显优势,其在表层和 10 m 层的贡献率分别为 51.38% 和 62.22%,在 Chl a 浓度小于 1 mg/m^3 的区域,微微型占明显优势,贡献率超过 50%(见图 4d)。在秋季航次浮游植物粒级结构的垂直分布与冬季的相似,在 Chl a 浓度小于 1 mg/m^3 的区域,微微型的优势更明显,贡献率均高于 65%(见图 4c)。

在春季航次在 Chl a 浓度大于 1 mg/m^3 的区域,浮游植物粒级结构中小型占优势,各个水层贡献率差别不大,约为 41.5%;在 Chl a 浓度小于

1 mg/m³的区域,在表层和10 m层微微型的贡献率最高,分别为50.83%和46.53%,在30 m层微微型的贡献率(39.66%)略大于微微型的(35.35%),小型在各水层的贡献率都是最低的(图4a)。与其他季节相比,在30 m水层Chl a浓度小于1 mg/m³的区域,春季航次微微型的贡献率相对较小,反映在春季黄海冷水团水域浮游植物粒径相对较大。

在夏季航次浮游植物粒级结构有别于其他季节的,不论在Chl a浓度小于1 mg/m³的区域还是大于1 mg/m³的区域,小粒径浮游植物始终占优势,在

Chl a浓度大于1 mg/m³的区域,微型的贡献率最大(43.22%~50.23%),小型的贡献率最小(12.27%~16.07%),在Chl a浓度小于1 mg/m³的区域,小型所占比例进一步降低(5.59%~6.58%),而微微型占有明显的优势(55.42%~68.88%)(图4b)。相比之下,夏季的平均粒级指数最小。另外,在夏季,总Chl a平均浓度随深度表现出略有增加的趋势,这可能与叶绿素浓度在次表层最大有关。

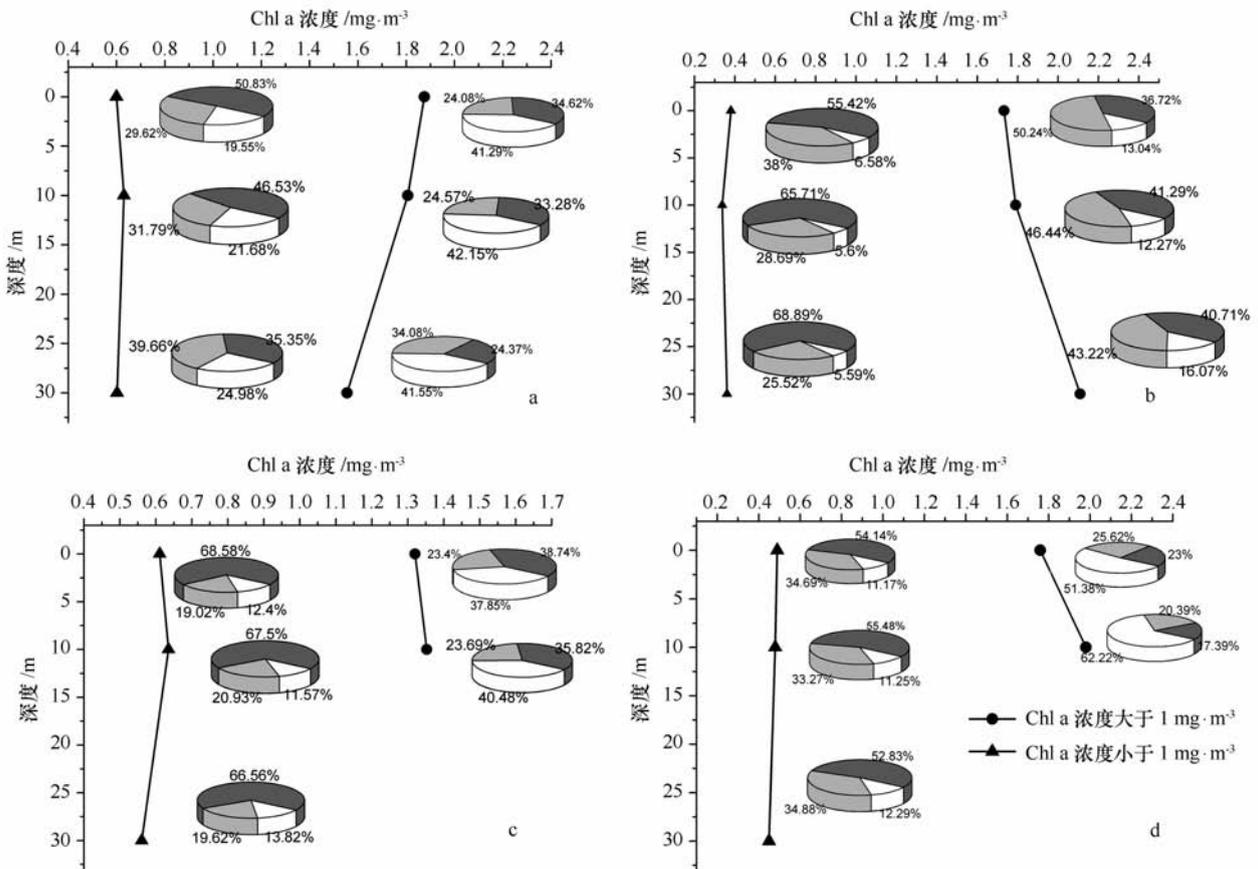


图4 不同水层叶绿素浓度平均值与不同粒级组分的贡献率

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季。白色代表小型, 灰色代表微型, 黑色代表微微型

4 讨论

4.1 环境因子对浮游植物生物量的影响

在水生生态系统中,浮游植物生物量和初级生产的时空变化是许多环境因子如光照、温度、营养盐、摄食和输运过程等相互作用的结果。

黄海冷水团水域受陆地径流和人类活动的影响

较小,浮游植物的分布主要受海区自然环境季节变化的影响。在同一季节水平上,由于研究海域水文和化学要素水平分布较均匀,叶绿素与各环境因子均未表现出明显的相关性,但在季节尺度上,随海区环境条件的变化叶绿素平均浓度表现出一定的波动性(见图5)。以表层为例,黄海冷水团海域春季叶绿素的平均浓度明显高于其他季节的(1.02 mg/

m^3), 在夏季、秋季和冬季叶绿素平均浓度相近, 约为 $0.75 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。温度与叶绿素含量的季节变化没有明显的相关性。在夏季由于受到温跃层的阻隔, 表层水体营养盐低于或接近营养盐限制的起始浓度 DIN 浓度为 $1 \mu\text{mol} / \text{dm}^3$, 磷的浓度为 $0.1 \mu\text{mol} / \text{dm}^3$ ^[25]。尽管该季节水温较高, 但叶绿素浓度仍处于较低水平, 浮游植物的生长很可能受到营养盐来源的限制。在秋季随着水温下降温跃层被打破, 底层海水累积的营养盐被输送至上层水体, $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ 和 SiO_3 的浓度与夏季的相比有显著上升, 但磷酸盐浓度却进一步下降至全年最低水平, 浮游植物生长可能受到营养盐结构性磷的限制。在冬季南黄海水体垂直混合剧烈, 根据胡好国等^[26]的数值模拟研究, 黄海中央海域冬季水体垂直涡动混合系数为 $10^{-1} \text{ m}^2 / \text{s}$, 而在其他季节仅为 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$ 。垂直混合作用会将浮游植物带离真光层, 减少浮游植物在真光层中的停留时间以及浮游植物的累积,

因此水体混合所引起的光限制可能是冬季浮游植物生长的主要限制因素。在春季黄海冷水团水域浮游植物水华的发生使该季节叶绿素浓度明显高于其他季节。黄邦钦等^[22]认为黄海浮游植物在春季发生水华是丰富营养盐与水体升温共同作用的结果, 而胡好国等^[26]对南黄海浮游植物季节变化的数值模拟研究表明, 春季水华的发生显著依赖于水体的稳定度。在本文的研究中, 春季黄海冷水团水域水温与冬季水平相似, 而由于冬季风的停止水体稳定度显著增加, 因此本文的结果更倾向于支持胡好国等(2004)^[26]的结论。

综上所述, 在对黄海冷水团水域浮游植物生物量的影响因素中, 与温度相比, 营养盐具有更重要的作用, 然而营养盐的来源又主要受控于水动力条件的变化, 因此水动力条件被认为是浮游植物生物量变化的最终决定因素^[27]。

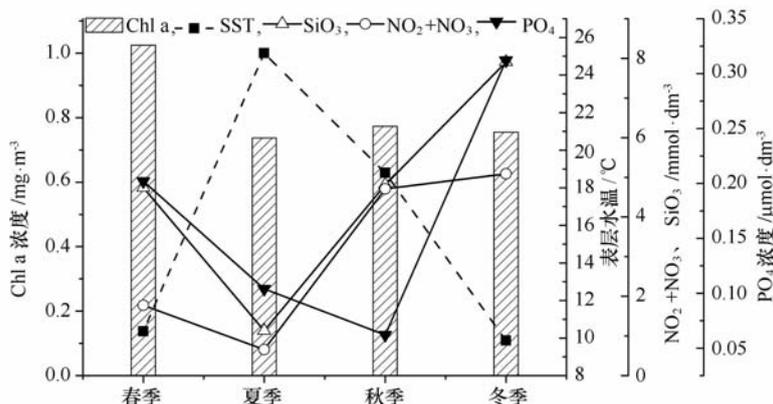


图5 表层水体叶绿素平均浓度与其他环境参数的季节变化(SST代表海表温度)

4.2 环境因子对浮游植物粒级结构的影响

环境因子的变化不仅能影响浮游植物生物量, 也会对其粒级结构产生重要影响。目前已经有很多关于浮游植物粒级结构在海区分布的研究, 这些研究多侧重于单个季节航次的研究, 而且研究海域以开阔大洋地区为主, 对于特定海域季节变化的研究相对较少。已有的研究表明, 温度、营养盐、浮游动物的摄食以及水动力条件都会影响浮游植物的粒级结构。

如图6所示, 小粒径浮游植物所占生物量的比例随温度升高表现出略有升高的趋势。Noiri等^[28]在太平洋亚北极海域的船基实验表明, 随温度升高

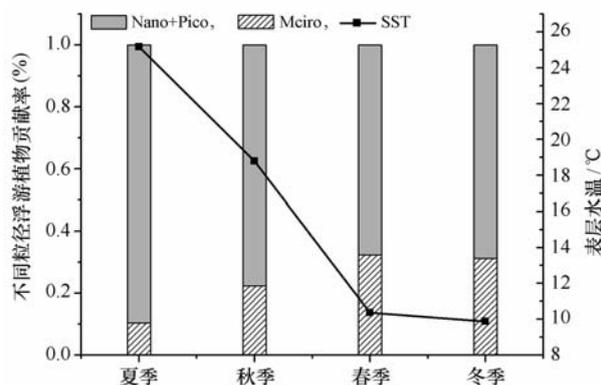


图6 表层水体不同粒径浮游植物贡献率随水温的季节变化

浮游植物群落优势种会由粒径较大的硅藻向粒径较小的颗石藻转化。Hare 等^[29]在白令海海域的甲板实验中也证明随温度升高,浮游植物群落会由硅藻占优势转化为由体积较小的微微型浮游植物占优势。另外,海洋沉积物化石记录显示在过去的 65 Ma 中海洋硅藻的细胞膜尺寸随温度上升有变小的趋势^[30]。虽然本文的分析结果符合浮游植物群落粒径随温度升高而下降的趋势,但是海区温度的升高伴随着营养盐浓度的降低,而低营养盐环境由于小粒径浮游植物的竞争优势^[9],因此不能认为浮游植物粒级结构的季节变化只是温度的直接效应。

本文的分析结果显示,浮游植物粒级指数在营养盐贫乏的夏季最小,其次为磷酸盐平均浓度最低的秋季,在春季浮游植物水华期粒级指数最大(见图 2)。很多理论和观测实验研究表明营养盐对浮游植物粒级结构具有重要影响。根据 Fick 第一定律,假定藻体形状为球形,则单位体积藻体对营养盐的吸收速率与其半径的二次方成反比^[11,30],因此大粒径藻类比小粒径藻类更易受到营养盐扩散的限制。模型研究结果也表明营养盐限制的起始浓度随细胞粒径呈指数增加^[11]。Agawin 等^[31]在水温较高的夏季所进行的围隔实验结果表明,微微型的贡献率随营养盐浓度的增加而降低。在开阔外海所进行的调查结果也表明,微微型在大西洋、太平洋以及印度洋的寡营养海域占主导地位,在近岸和上升流区域小型和微型的比例有所增加^[14,31-32]。另外,对湖泊中的研究表明,低磷环境有利于微微型浮游植物^[33]。本文所得的浮游植物粒级指数在夏季和秋季较小的结果,与小粒径浮游植物在低营养盐环境中具有资源竞争优势的研究结果是一致的。

除了温度和营养盐外,浮游植物对光的获取能力也与粒径密切相关。由于小粒径浮游植物受到色素的包裹效应(package effect)较小,对光量子的利用效率较高^[34],这种优势在弱光条件下表现得更明

显^[11]。在受北风影响较强的秋冬季节,强烈的水体混合会将浮游植物强制带出真光层,使浮游植物有较长的时间处于弱光或无光的环境中,而光限制条件有利于小粒径浮游植物的竞争优势。因此,虽然在冬季黄海冷水团水域营养盐浓度很高,但是小型所占总生物量的比例仍然较小。

4.3 浮游植物粒级结构的季节变化趋势

在黄海冷水团水域 2006—2007 年度 4 个季节航次的调查中,浮游植物群落始终由粒径较小的微型和微微型浮游植物占主导(两者贡献率之和大于 65%),这主要是由上文提到的小粒径浮游植物在不同环境中的资源竞争优势决定的。本研究中另一个明显的规律,即为各粒级组分浮游植物的贡献率随总生物量的变化趋势在 4 个季节中是一致的(见图 3),这说明不同粒径浮游植物对环境因子的响应趋势是一致的,其贡献率随总生物量变化的差异是由不同粒径响应速率的差异造成的^[31]。类似的相关性也在其他海域不同的空间尺度上被观测到(如文献[11,15,35]),因此不同粒径浮游植物贡献率与总生物量的相关性很可能是一个普遍的规律。

在春季水华发生时期,大粒径浮游植物所占总生物量的比例有所增加(见表 2),在部分站点甚至处于主导地位。关于浮游植物在水华期主要由体积较大的浮游植物占主导的现象有两种解释:一是由于世代周期的差异,大粒径浮游植物受到的摄食压力要小于小粒径浮游植物;另外一方面,是由于在适宜的营养盐和光照条件下,大粒径浮游植物能够达到更高的生长速率和光合作用效率^[12,36]。

由上述分析可知,虽然黄海冷水团海域的浮游植物群落粒级结构有一定的季节变化,但是小粒径的微型和微微型浮游植物一直占主导,这是一个相对比较稳定的生态区域。这意味着微食物环在研究海域的食物网结构中占有重要地位,浮游生态系统对真光层中碳的输出潜力可能较弱。

参考文献:

- [1] CLOERN J E, DUFFORD R. Phytoplankton community ecology: principles applied in San Francisco Bay [J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 285: 11—28.
- [2] BUTR N A, IRIARTE A, MADARIAGA I. Size-fractionated phytoplankton biomass, primary production and respiration in the Nervión—Ibaizabal estuary: a comparison with other nearshore coastal and estuarine ecosystems from the Bay of Biscay [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29: 1088—1102.
- [3] CUSHING D H. A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified [J]. Journal of Plankton Research, 1989, 11: 1—13.

- [4] LEGENDRE L, RASSOULZADEGAN F. Food-web mediated export of biogenic carbon in oceans: hydrodynamic control [J]. Marine Ecology Progressive Series, 1996, 145: 179—193.
- [5] FRONEMAN P W, PAKHOMOV E A, BALARIN M G. Size-fractionated phytoplankton biomass, production and biogenic carbon flux in the eastern Atlantic sector of the Southern Ocean in late austral summer 1997—1998 [J]. Deep-Sea Research;II, 2004, 51: 2715—2729.
- [6] CERMEÑO P, MARAÑÓN E, PÉREZ V, et al. Phytoplankton size structure and primary production in a highly dynamic coastal ecosystem (Ría de Vigo, NW-Spain): seasonal and short-time scale variability [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67: 251—266.
- [7] IRWIN A J, FINKEL Z V, SCHOFIELD O M E, et al. Scaling up from nutrient physiology to the size-structure of phytoplankton communities [J]. Journal of Plankton Research, 2006, 28: 459—471.
- [8] TREMBLAY J E, KLEIN B, LEGENDRE L. Estimation of f-ratio in oceans based on phytoplankton size structure [J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(3): 595—601.
- [9] RAVEN J A. The twelfth Transley Lecture. Small is beautiful: the picophytoplankton [J]. Functional Ecology, 1998, 12: 503—513.
- [10] FINKEL Z V. Light absorption and size scaling of light-limited metabolism in marine diatoms [J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46: 86—94.
- [11] MARAÑÓN E. Phytoplankton size structure [M]//STEELE J H, TUREKIAN K K, THORPE S A. Encyclopedia of Ocean Sciences. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2009: 4249—4256.
- [12] CERMEÑO P, MARAÑÓN E, RODRÍGUEZ J, FERNÁNDEZ. Large-sized phytoplankton sustain higher carbon-specific photosynthesis than smaller cells in a coastal eutrophic ecosystem [J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 297: 51—60.
- [13] CHISHOLM S W. Phytoplankton size [C]//FALKOWSKI P G, WOODHEAD A D. Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea. New York: Plenum, 1992: 213—237.
- [14] MARAÑÓN E, HOLLIGAN P M, BARCIELA R, et al. Patterns of phytoplankton size-structure and productivity in contrasting open ocean environments [J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 216: 43—56.
- [15] ARIN L, ESTRADA M, SALAT J, et al. Spatio-temporal variability of size fractionated phytoplankton on the shelf adjacent to the Ebro River (NW Mediterranean) [J]. Continental Shelf Research, 2005, 25: 1081—1095.
- [16] 张波, 唐启升, 金显仕. 黄海生态系统高营养层次生物群落功能群及其主要种类 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1099—1111.
- [17] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系 [J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 47—54.
- [18] 张书文, 夏长水, 袁业立. 黄海冷水团水域物理—生态耦合数值模式研究 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(3): 315—319.
- [19] 李洪波, 肖天, 丁涛, 等. 浮游细菌在黄海冷水团中的分布 [J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1012—1020.
- [20] PU X M, SUN S, YANG B, et al. The combined effects of temperature and food supply on *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer [J]. Journal of Plankton Research, 2004, 26(9): 1049—1057.
- [21] 孙松, 王荣, 张光涛, 等. 黄海中华哲水蚤度夏机制 [J]. 海洋与湖沼: 浮游动物研究专辑, 2002, 92—99.
- [22] 黄邦钦, 刘媛, 陈纪新, 等. 东海、黄海浮游植物生物量的粒级结构及时空分布 [J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 156—164.
- [23] 邓春梅, 于志刚, 姚鹏, 等. 东海、南黄海浮游植物粒级结构及环境影响因素分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(5): 791—798.
- [24] BRICAUD A, CLAUSTRE H, RAS J, et al. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: influence of the size structure of algal populations [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: C11010.
- [25] JUST C D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40: 339—356.
- [26] 胡好国, 万振文, 袁业立. 南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析 [J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 74—88.
- [27] RIEGMAN R, KUIPERS B R, NOORDELOOS A A M, et al. Size-differential control of phytoplankton and the structure of plankton communities [J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1993, 31: 255—265.
- [28] NOIRI Y, KUDO I, KIYOSAWA H, et al. Influence of iron and temperature on growth, nutrient utilization ratios and phytoplankton species composition in the western subarctic Pacific Ocean during the SEEDS experiment [J]. Prog Oceanogr, 2005, 64: 149—166.
- [29] HARE C E, LEBLANC K, DITULLIO G R, et al. Consequences of increased temperature and CO₂ for phytoplankton community structure in the Bering Sea [J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 352: 9—16.
- [30] FALKOWSKI P G, OLIVER M J. Mix and match: how climate selects phytoplankton [J]. Nature, 2007, 5: 813—819.
- [31] AGAWIN N R S, DUARTE C M, AGUST S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production [J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45: 591—600.
- [32] SAVIDGE G, GIOPIN L. Seasonal influences on size-fractionated chlorophyll a concentrations and primary production in the north-west Indian Ocean [J]. Deep-Sea Research, 1999, 46: 701—723.
- [33] DRAKARE S, BLOMQUIST P, BERGSTR M A K, et al. Relationships between picophytoplankton and environmental variables in lakes along a gradient of water colour and nutrient content [J]. Freshwater Biology, 2003, 48: 729—740

- [34] FINKEL Z V, IRWIN A J, SCHOFIELD O. Resource limitation alters the 3/4 size scaling of metabolic rates in phytoplankton [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 273:269—279.
- [35] LI W K W. Macroecological patterns of phytoplankton in the northwestern North Atlantic Ocean [J]. *Nature*, 2002, 149:154—157.
- [36] ZARAUZ L, IRIGOIEN X, FERNANDES J A. Changes in plankton size structure and composition, during the generation of a phytoplankton bloom, in the central Cantabrian sea [J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31:193—207.

Seasonal variations of phytoplankton community size structures in the Huanghai (Yellow) Sea Cold Water Mass area

FU Ming-zhu^{1,2,3}, SUN Ping^{1,2}, WANG Zong-ling^{1,2}, LI Yan^{1,2}, LI Rui-xiang^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 2. *Key Laboratory of State Oceanic Administration for Science and Engineering for Marine Ecological Environment, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 3. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

Abstract: The spatio-temporal distributions and seasonal variations of phytoplankton chlorophyll biomass and its size structure in the Huanghai (Yellow) Sea Cold Water Mass were studied based on the four cruises during 2006—2007. The results show that the average chlorophyll concentration in the upper 30 m layer is in the order of spring (1.01 mg/m^3) greater than summer (0.81 mg/m^3) greater than autumn (0.72 mg/m^3) greater than winter (0.68 mg/m^3). The phytoplankton size structures are significantly different between the area where Chl a concentration is greater than 1 mg/m^3 and less than 1 mg/m^3 . In the whole region, smaller-sized nanophytoplankton and picophytoplankton dominated the biomass ($>65\%$), while the contribution of microphytoplankton was relatively higher in winter and spring cruises. The average size index of phytoplankton is in the order of spring ($15.47 \mu\text{m}$) greater than winter ($11.08 \mu\text{m}$) greater than autumn ($8.61 \mu\text{m}$) greater than summer ($6.52 \mu\text{m}$). The relationships between the total biomass and the contributions of different size fractions show consistent trend in the four cruises in spite of the contrasting physical and chemical environments. The analysis of the relationships between the environmental factors and the chlorophyll concentrations shows that the growth of phytoplankton is limited by the nutrients availability in summer and by the weak light conditions caused by vertical mixing in winter. Phosphorus limitation and vertical mixing might be collectively responsible for the low chlorophyll level in autumn. The distribution patterns of phytoplankton size structures were mainly determined by their relatively competition advantages in different environments.

Key words: Huanghai (Yellow) Sea Cold Water Mass; chlorophyll; phytoplankton size structure