

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15475

冬、春季黄海不同粒级浮游生物的脂肪酸组成

彭亮^{1,2}, 左涛^{2,3,4}, 时永强^{2,3,4}, 王俊^{2,3}, 吕末晓^{1,2}

1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;
3. 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 266200;
4. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 比较分析了 2015 年冬季 1 月和春末 5 月黄海不同粒级浮游生物的脂肪酸组成, 旨在对不同粒级网采浮游生物营养价值进行评价, 为海洋鱼类营养补充研究提供基础资料。结果显示, 冬、春两季, $\omega 3$ 多不饱和脂肪酸($\omega 3$ PUFA)、二十碳五稀酸(EPA)、二十二碳六稀酸(DHA)、20:1+22:1 的相对含量以较大粒级浮游生物(500~2000 μm)较高; 而 16:0、18:0 饱和脂肪酸的相对含量以<500 μm 粒级浮游生物较高。冬季各粒级浮游生物的总饱和脂肪酸(SFA)相对含量均高于春季相应值, 但 MUFA、PUFA、16:1 ω 7、EPA、DHA、20:1+22:1 的相对含量却低于春季。多元对应分析显示, 环境因子中海水温度与 100~1000 μm 粒级浮游生物的不饱和脂肪酸 MUFA 和 PUFA 含量呈显著的正相关关系($P<0.05$)。对比冬、春季浮游生物脂肪酸组成与黄海主要经济鱼类的脂肪酸营养组成, 初步认为, 在冬季, 可为鱼类生长提供足够营养的浮游生物的粒级范围相对较窄, 主要是>500 μm 粒级的较大型的浮游生物, 而在春季, 该类浮游生物的粒级范围较广, 100~2000 μm 的浮游动物都可作为鱼类早期生长的有效饵料来源。由此初步推论, 浮游生物食性仔稚鱼食物来源的粒级范围在春季比冬季更为广泛。

关键词: 黄海; 脂肪酸; 粒级; 浮游生物; 营养

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)05-1205-12

脂肪酸是生物体能量代谢的基础营养物质, 其在食物链中的传递具有一定的保守性, 可用于指示不同营养级之间的营养关系^[1-2], 因而脂肪酸已成为研究海洋生态系统复杂食物网的一种有效标志物^[3-5]。

浮游植物和浮游动物是鱼类的重要营养来源和许多重要经济鱼类的开口饵料。海水仔稚鱼的必需脂肪酸必须从外源食物获取^[6], 饵料中脂肪酸的组成及营养质量水平对于海洋鱼类早期生长发育阶段影响重大^[7]。海水鱼类在其生长过程中,

对饵料具有明显的选择性^[8], 饵料的粒级大小即是影响其选择的重要因素之一^[9]。另外, 浮游动物还存在着对浮游植物的摄食。因此研究不同粒级的浮游生物脂肪酸组成, 有助于理解海洋生态系统中生物间的食物关系以及物质传递过程。目前, 国内外已对海洋浮游生物的脂肪酸组成开展了大量研究, 如微藻^[10-12]、海洋桡足类^[13-15, 16]、端足类^[17]和水母^[16, 18]。本研究就黄海不同大小粒级的浮游生物脂肪酸组成开展研究, 比较不同粒级浮游生物的脂肪酸含量、组成特点及季节差异, 探

收稿日期: 2015-12-21; 修订日期: 2016-03-21.

基金项目: 国家基金委-山东省联合基金项目(U1406403); 国家重点基础研究发展规划项目(2011CB403604); 国家自然科学基金项目(40976103); 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室、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开放基金(KLMES201605).

作者简介: 彭亮(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋浮游动物生态学方面研究. E-mail: pengliang6036@163.com

通信作者: 王俊, 研究员. E-mail: wangjun@ysfri.ac.cn

讨不同粒级浮游生物的脂肪酸营养传递及其为上层营养级生物提供营养的潜力。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在 2015 年 1 月 8 日至 2 月 4 日(冬季)和 5 月 7 日至 28 日(春末), 依托农业部“黄渤海渔业资源调查”专项, 搭载渔业科学调查船“北斗号”, 在整个黄海中央水域以及东海北部开展了大面积生物及环境调查。调查航线设计采用系统式预定航线, 航线包含 30° – 39° N 自北而南 19 个平行断面、120 个站位, 站位按 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 设定, 用于脂肪酸测定的浮游生物采样的站位, 冬季为 15 个、春季为 20 个(图 1)。同期海区内表层、底层水温(SST、BST)和表层、底层盐度(SSS、BSS)使用 CTD 温盐探仪(SBE 19plus, 美国 Sea-Bird 公司)采集, 分布见图 2。

为保证获取足量的各粒级浮游生物样品, 在各站位, 用浮游生物网($70\ \mu\text{m}$ 、 $160\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$)从底到表垂直进行多网次采集汇集后, 依次用孔径为 2000、1000、500、300、200、 $100\ \mu\text{m}$ 的筛绢分级(冬季还有 $400\ \mu\text{m}$), 过滤冲洗后, 再反冲至预先煅烧(450°C , 4 h)过的 GF/F 玻璃纤维膜

(Whatman 公司, 英国)上, 做好标记, 液氮内保存。浮游生物粒级的划分和采样方法参考 Huo 等^[19]。本研究还增加了 $300\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 的筛绢细分 $200\sim 500\ \mu\text{m}$ 粒级的浮游生物。根据现场观察, $2000\ \mu\text{m}$ 粒级的浮游生物主要为磷虾、箭虫、细长脚蛾; $1000\ \mu\text{m}$ 粒级的浮游生物主要为箭虫、细长脚蛾、桡足类; $>500\ \mu\text{m}$ 粒级的浮游生物主要为桡足类; 400 、 $300\ \mu\text{m}$ 粒级的浮游生物主要为桡足类及中型桡足类的桡足幼体; 200 、 $100\ \mu\text{m}$ 粒级的浮游生物主要由小型桡足类的桡足幼体和无节幼体组成。为描述方便, 各粒级浮游生物取其粒级组的下限值为代表, 如 $500\ \mu\text{m}$ 粒级代表介于 $500\sim 1000\ \mu\text{m}$ 粒级的浮游生物。

1.2 脂类分析测试

实验室内脂类提取和脂肪酸分析参照 GB/T 17376–2008、GB/T 17377–2008 及 GB/T 22223–2008。脂肪酸的组成和含量分析利用 GCMS-QP2010 Ultra 型气质联用仪进行, 以 37 种脂肪酸混合标准样作为标准, 比对保留时间对脂肪酸进行定性分析, 采用内标标准法对脂肪酸进行定量分析。色谱条件如下:

毛细管色谱柱: Rt-2560 ($100\ \text{m} \times 0.25\ \text{mm} \times 0.2\ \mu\text{m}$)

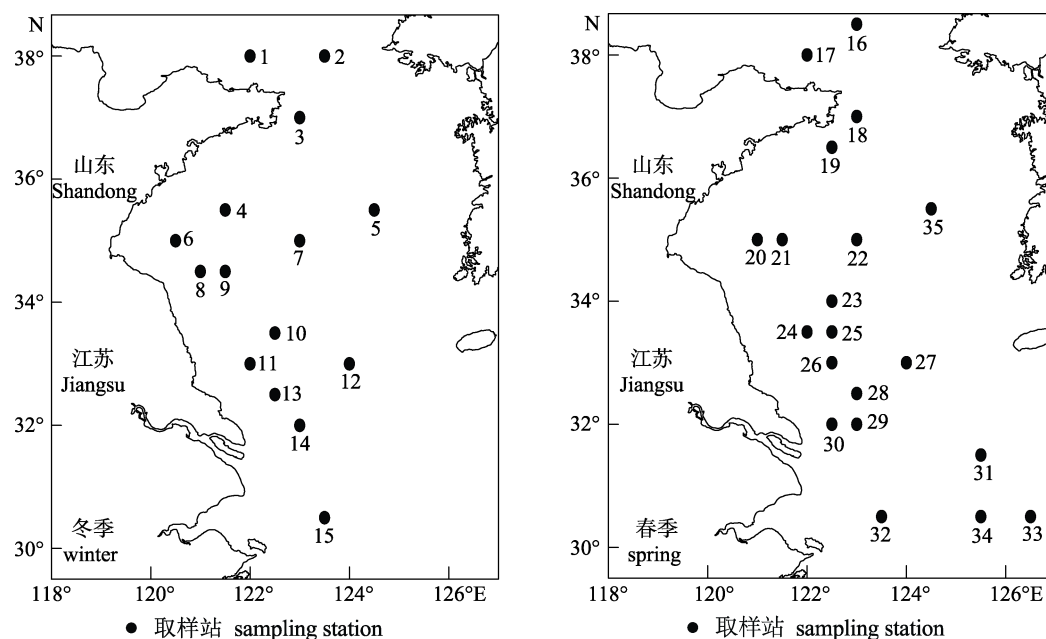


图 1 本研究浮游生物采样站位图

Fig. 1 Sampling stations for plankton in the study

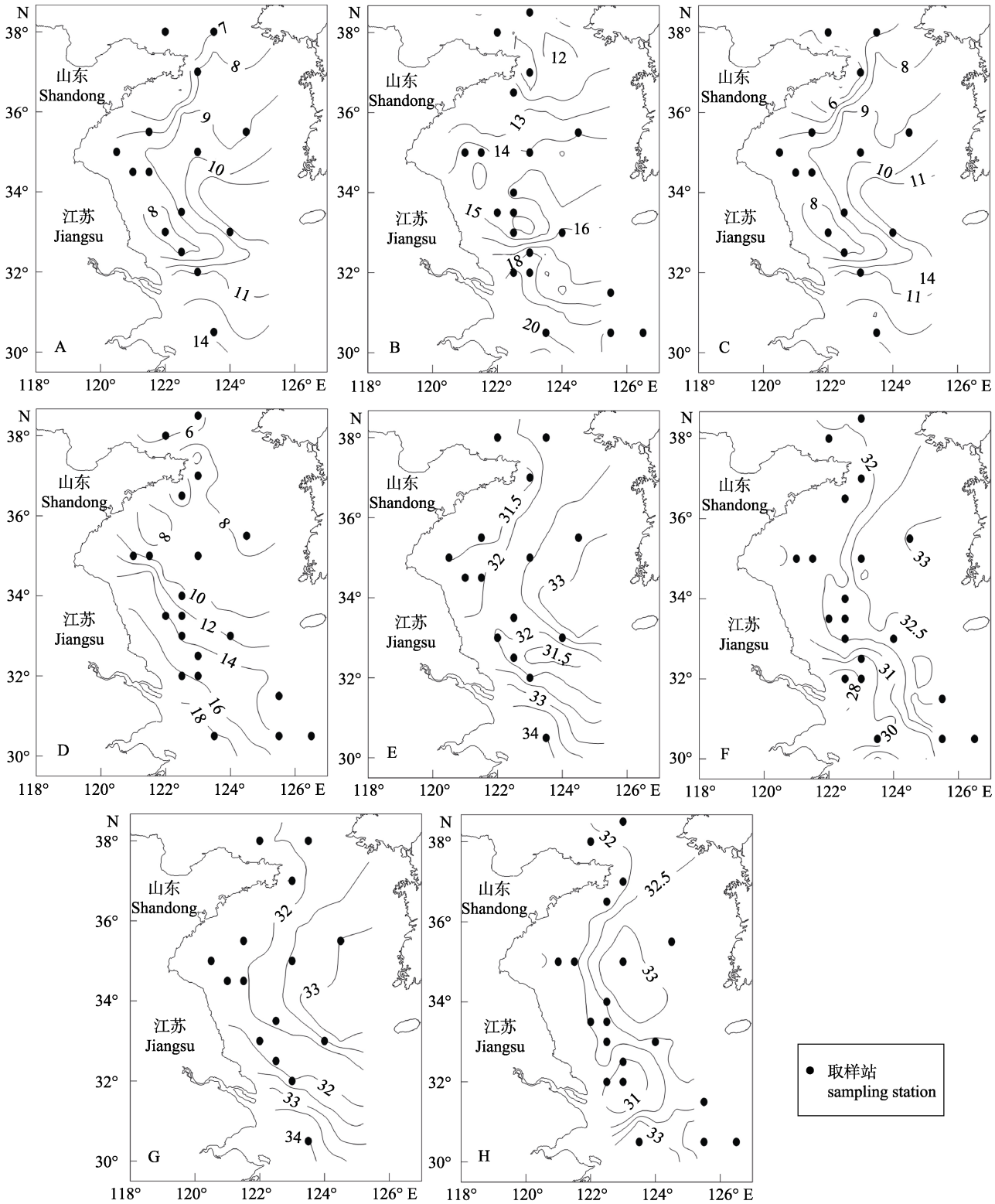


图 2 黄海表、底层海水温度(SST, BST)和表、底层盐度(SSS, BSS)的水平分布

A、C、E、G 分别代表冬季的 SST, BST, SSS, BSS; B、D、F、H 分别代表春季的 SST, BST, SSS, BSS.

Fig. 2 Spatial distribution of surface and bottom seawater temperature (SST, BST) and salinity (SSS, BSS) in the Yellow Sea during the winter and the spring of 2015

A, C, E, G illustrate SST, BST, SSS, BSS in the winter, respectively; B, D, F, H illustrate SST, BST, SSS, BSS in the spring, respectively.

进样口温度: 240℃

柱流量: 1.76 mL/min

柱箱温度: 初始温度 100℃

程序升温: 100℃, 保持 4 min, 3℃/min 升温至 240℃

离子源温度: 230℃。

接口温度: 250℃

脂肪酸的基本命名以 X:Y ω Z 形式来表示, 其中 X 表示碳链的长度, Y 表示双键的数目, Z 表示从甲基末端计第一个双键所在的位置。

1.3 数据处理

脂肪酸测定值全部转换为相对含量, 即相应脂肪酸占总脂肪酸含量的百分比。本研究选取具有生物标志意义^[10, 20-21]以及在鱼类生长发育过程中比较重要的指标^[22], 包括总饱和脂肪酸(SFA)、总单不饱和脂肪酸(MUFA)、总多不饱和脂肪酸(PUFA)、含 18 个碳原子的混合的饱和脂肪酸($\Sigma 18$)、第一个双键在第 3 碳位的混合的多不饱和脂肪酸($\omega 3$ PUFA)、第一个双键在第 6 碳位的混合的多不饱和脂肪酸($\omega 6$ PUFA)、单种饱和脂肪酸 16:0、单种饱和脂肪酸 18:0、单不饱和脂肪酸 15:1+17:1、单不饱和脂肪酸 16:1 $\omega 7$ 、单不饱和脂肪酸 20:1+22:1、多不饱和脂肪酸二十二碳六烯酸 DHA(22:6 $\omega 3$)及多不饱和脂肪酸二十碳五烯酸 EPA(20:5 $\omega 3$)。DHA/EPA、16:1/16:0 及 $\Sigma 16/\Sigma 18$ 比值具有特殊的生物指示意义, 因此也专门进行了分析。

利用主成分分析, 区分两季节中不同粒级生物的各脂肪酸相对含量差异。另外, 采用 Canoco 4.5 软件中梯度分析(gradient analysis)模块分析各环境因子对浮游生物脂肪酸组成影响的相对重要性。分析方法为基于脂肪酸相对组成进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA), 以确定浮游生物脂肪酸相对组成对环境梯度可能的响应模型。本研究数据 DCA 分析计算的梯度特征值<3, 因此可选用线性模型冗余分析(redundancy analysis, RDA)进行分析。根据 RDA 结果, 得到相应脂肪酸相对含量-环境变量之间的矢量关系。矢量距离越小, 表明两者间的相关性越明显。

方差分析采用 SPSS 19.0 完成。采样站位分

布图、海水温度和盐度等值线分布图均使用 Surfer 11.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同季节各粒级浮游生物的脂肪酸相对组成

冬季混合脂肪酸以 $\omega 3$ PUFA 的相对含量随粒级分布趋势最为明显, 在<500 μm 浮游生物相应值仅在 8%~13%, 而在>500 μm 浮游生物相应值均高于 25%(图 3D); 单种脂肪酸中, 16:0、18:0 的相对含量以<500 μm 粒级浮游生物较高, >500 μm 粒级浮游生物略低, EPA、DHA 及 20:1+22:1 相对含量均以 500 μm 和 1000 μm 粒级浮游生物较高(图 4B, 图 4C, 图 4D)。混合脂肪酸中, MUFA、 $\omega 6$ PUFA、 $\Sigma 18$ 的相对含量在不同粒级浮游生物间的差异不显著($P>0.05$), SFA、PUFA、 $\omega 3$ PUFA 粒级间差异达极显著水平($P<0.01$, 表 1)。单种脂肪酸中, 除 16:1 $\omega 7$ 外, 16:0、18:0、DHA、EPA、20:1+22:1 相对含量粒级间的差异均达显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)水平(表 1)。

春季, 混合脂肪酸相对含量随粒级分布情况: $\omega 3$ PUFA 相对含量以 500 μm 粒级最高(38.31%), 1000 μm 次之(35.24%)(图 3D); $\omega 6$ PUFA 相对含量则以 100 μm 最高(12.12%), 200 μm 次之(9.15%)(图 3E)。方差分析显示, 仅有 $\omega 3$ PUFA、 $\omega 6$ PUFA 和 $\Sigma 18$ 粒级间差异达显著水平($P<0.05$, 表 1)。单种脂肪酸相对含量随粒级的分布情况: 16:0 在 2000 μm 粒级浮游生物中相对含量较高(19.66%), 且显著高于其他各粒级浮游生物(ANOVA, $P<0.05$); 18:0 以 100 μm 和 200 μm 粒级浮游生物的相对含量较高(5.52%, 6.00%); EPA、DHA 及 20:1+22:1 的分布趋势与冬季相似, 仍以 500 μm 、1000 μm 粒级浮游生物较高(图 4B, 4C, 4D); 16:1 $\omega 7$ 相对含量的粒级间差异未达显著水平($P>0.05$), 其他单种脂肪酸在粒级间的分布差异均达显著水平($P<0.05$, 表 1)。

两季节相比较, 浮游生物主要的混合脂肪酸和单种脂肪酸相对含量的季节差异均达极显著水平($P<0.01$, 表 2)。总体而言, SFA 相对含量以冬季较高, MUFA 和 PUFA、16:1 $\omega 7$ 、EPA、DHA、20:1+22:1 相对含量以春季较高; 冬、春两季, $\omega 3$

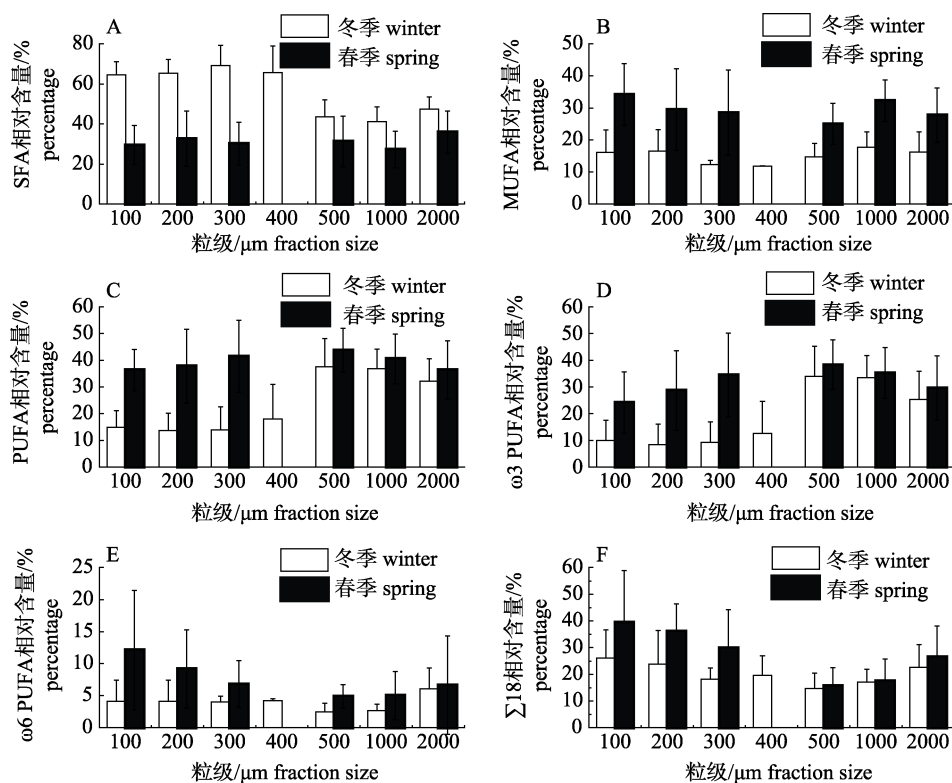


图 3 2015 年冬、春季黄海不同粒级浮游生物几种混合脂肪酸的相对含量

Fig. 3 Percentage of several mixed fatty acids of size-fractionated plankton in the winter and spring of the year 2015 in the Yellow Sea

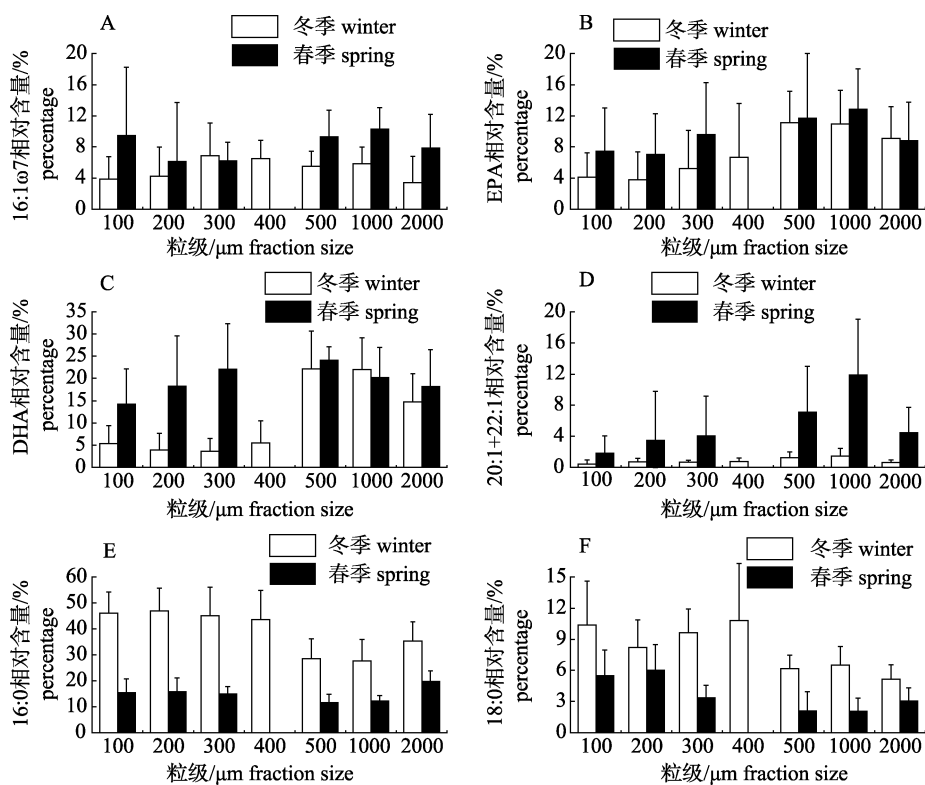


图 4 2015 年冬、春季黄海不同粒级浮游生物几种单种脂肪酸的相对含量

Fig. 4 Percentage of several individual fatty acids in size-fractionated plankton in the winter and the spring of the year 2015 in the Yellow Sea

表 1 冬、春季不同粒级浮游生物间脂肪酸相对含量差异的方差分析

Tab. 1 ANOVA of fatty acids percentages of size-fractionated plankton in winter and spring

脂肪酸 fatty acid	冬季 winter	春季 spring
SFA	0.000**	0.439
MUFA	0.748	0.102
PUFA	0.000**	0.285
ω3 PUFA	0.000**	0.020*
ω6 PUFA	0.073	0.009**
Σ18	0.054	0.000**
16:1ω7	0.333	0.253
EPA	0.000**	0.004**
DHA	0.000**	0.014*
20:1+22:1	0.028*	0.000**
16:0	0.000**	0.000**
18:0	0.000**	0.000*
DHA/EPA	0.000**	0.591
16:1/16:0	0.000**	0.373
Σ16/Σ18	0.004**	0.001**

注：表中数字表示概率值(P)。*表示差异显著(P<0.05)，**表示差异极显著(P<0.01)。

Note: Figures in the table are the values of probability(P). * denotes significant differences(P<0.05), ** denotes extremely significant differences (P<0.01).

PUFA、EPA、DHA、20:1+22:1 的相对含量均以 500 μm 和 1000 μm 浮游生物较高；饱和脂肪酸 Σ18、16:0、18:0 均以<500 μm 粒级的浮游生物相对含量较高(图 4)。

单种脂肪酸的比值中，冬季 500 μm、1000 μm 粒级浮游生物的 DHA/EPA 比值都高于 2，其他各粒级浮游生物相应值均小于 1.5(图 5A)；16:1/16:0 比值在 100 μm 和 200 μm 粒级浮游生物中分别为 0.09 和 0.10，低于其他粒级浮游生物(图 5B)；Σ16/Σ18 值除 300 μm、2000 μm 粒级略低外，其他粒级均大于 2(图 5C)。春季，各粒级浮游生物的 DHA/EPA 和 16:1/16:0 比值无显著差异(P>0.05)，<300 μm 粒级浮游生物的Σ16/Σ18 均小于 1，>500 μm 粒级浮游生物的Σ16/Σ18 均大于 1，但都不大于 1.6(图 5C)。

两季相比较，各粒级浮游生物的 16:1/16:0 比值以春季较高，Σ16/Σ18 值以冬季较高(图 5)，且上述两比值的季节间的差异达极显著水平(P>0.05，表 2)；DHA/EPA 比值在冬、春两季之间差异不显著(P>0.05，表 2)。

表 2 各粒级浮游生物脂肪酸相对含量的冬、春季之间的差异分析

Tab. 2 Student's t-test analysis of fatty acid percentages in size-fractionated plankton between the winter and the spring

脂肪酸 fatty acid	浮游生物粒级 size fraction of plankton					
	2000 μm	1000 μm	500 μm	300 μm	200 μm	100 μm
SFA	0.005**	0.000**	0.015*	0.000**	0.000**	0.000**
MUFA	0.001**	0.000**	0.000**	0.122	0.010*	0.000**
PUFA	0.316	0.277	0.109	0.018*	0.000**	0.000**
ω3 PUFA	0.363	0.630	0.302	0.049*	0.001**	0.000**
ω6 PUFA	0.811	0.047*	0.002**	0.319	0.032	0.004**
Σ18	0.361	0.875	0.721	0.284	0.024*	0.384
16:1ω7	0.011*	0.000**	0.005**	0.759	0.486	0.027
EPA	0.889	0.322	0.854	0.392	0.115	0.052
DHA	0.267	0.527	0.394	0.030*	0.001**	0.001**
20:1+22:1	0.001**	0.000**	0.007**	0.379	0.177	0.026**
16:0	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
18:0	0.001**	0.000**	0.000**	0.000**	0.063	0.000**
DHA/EPA	0.862	0.020*	0.571	0.327	0.155	0.272
16:1/16:0	0.357	0.000**	0.000**	0.084	0.128	0.072
Σ16/Σ18	0.597	0.025*	0.001**	0.035*	0.000**	0.000**

注：表中数字表示 t 检验得到的概率值(P)。*表示差异显著(P<0.05)，**表示差异极显著(P<0.01)。

Note: Figures in the table are significance of difference (P). * denotes significant differences (P<0.05), ** denotes extremely significant differences (P<0.01).

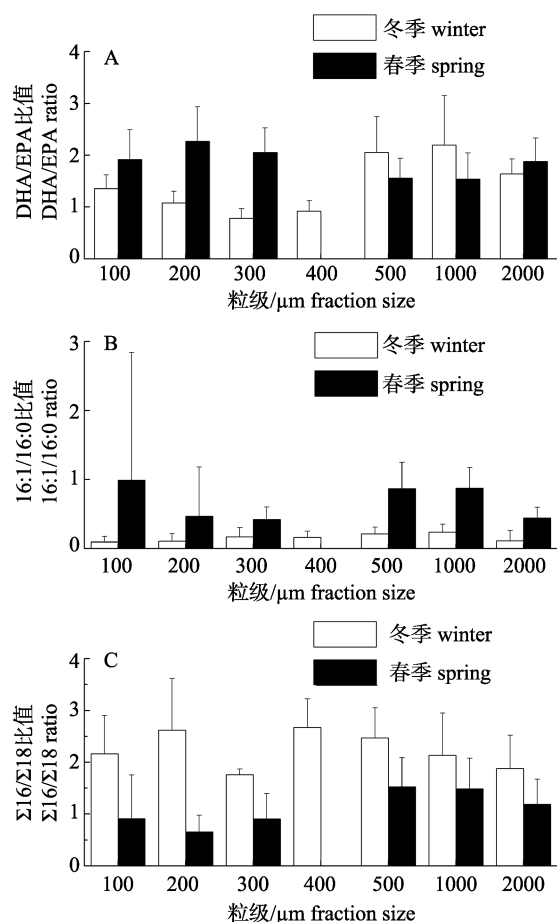


图5 2015年冬、春季黄海不同粒级浮游生物特殊脂肪酸比值
Fig. 5 Ratio of special fatty acids of size-fractionated plankton in the winter and the spring of the year 2015 in the Yellow Sea

2.2 主成分分析

冬季主成分分析结果显示(图 6A)中, 第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)分别可解释浮游生物脂肪酸组成总变异的 64.19%和 22.99%。根据图中各因子排序及相对矢量距离, 可以看到冬季 500 μm、1000 μm 粒级浮游生物与 20:1+22:1、EPA、DHA、 ω 3 PUFA 及 PUFA 矢量距离相对较近; 16:0、18:0 及 SFA、 ω 6 PUFA 与 100 μm、200 μm、300 μm、400 μm 粒级浮游生物矢量距离相对较近; 2000 μm 粒级浮游生物与 15:1+17:1、MUFA 的矢量距离相对较近(图 6A)。

春季主成分分析结果显示(图 6B)中, PC1 和 PC2 分别解释了浮游生物脂肪酸组成总变异的 63.70%和 21.60%。从此图可以看到, 500 μm、1000 μm 粒级浮游生物与 PUFA、 ω 3 PUFA、DHA、16:1 ω 7、

20:1+22:1、EPA 矢量距离相对较近; MUFA、15:0+17:0、18:0、16:0、SFA 与 100 μm、200 μm 粒级浮游生物矢量距离相对较近。

2.3 与温度和盐度分布的关系

DCA 分析结果中各个梯度长度均小于 3(表 3)。RDA 排序图(图 7)中显示的 4 个变量总共解释了 21.7%的脂肪酸相对含量变化信息, 前两个排序轴积累包含了 19.1%的脂肪酸相对含量变化信息和 88.0%的脂肪酸-环境关系。经蒙特卡罗(Monte Carlo)显著性置换检验后发现, 仅 SST 和 BST 两个变量对脂肪酸变化的单独解释量达到了显著水平($P < 0.05$), SSS 和 BSS 两个变量对脂肪酸变化的单独解释量并未达到显著水平($P > 0.05$)。

从图 7 中还可看到, 100 μm、200 μm 和 500 μm 粒级浮游生物的 MUFA 和 PUFA 脂肪酸含量分布与海水表层和底层温度轴向相近, 矢量距离相对较近。由此可见, 温度对黄海各地区不同粒级浮游生物的脂肪酸组成的影响比较明显。

3 讨论

综合本研究结果, 黄海浮游生物的脂肪酸组成和相对含量存在季节间、粒级间的差异。冬季, 各粒级浮游生物的 SFA 相对含量较高; 春季, MUFA 和 PUFA、16:1 ω 7、EPA、DHA、20:1+22:1 相对含量较高。 ω 3 PUFA、EPA、DHA、20:1+22:1 以 500 μm 和 1000 μm 粒级浮游生物相对含量较高, 饱和脂肪酸 Σ 18、16:0、18:0 以 <500 μm 粒级浮游生物的相对含量较高。100 μm、200 μm、500 μm 粒级浮游生物的 MUFA 和 PUFA 受海水温度影响较大。

本研究结果显示, 100 μm 和 200 μm 粒级浮游生物的 16:1/16:0 比值与 Σ 18 相对含量均是春季高于冬季, 而且冬季大多数粒级浮游生物的 Σ 16/ Σ 18 比值均大于 2。 Σ 18 被认为是鞭毛藻的指示物^[23], 18:4 ω 3 和 16:1 ω 7 已被证实可作为甲藻和硅藻的特征脂肪酸^[10], 且硅藻的 Σ 16/ Σ 18 > 2, 16:1/16:0 比值与其生物量呈正相关^[24], 因此推测, 在黄海春季此粒级浮游生物及其食物组成应不仅包括

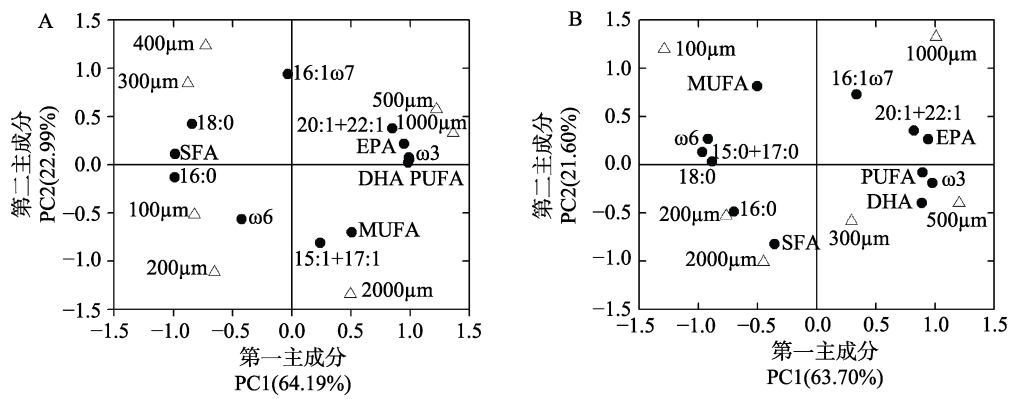


图 6 2015 年冬季(A)、春季(B)黄海各粒级浮游生物基于脂肪酸组成的主成分分析

Fig. 6 PCA plots of fatty acids of size fractionated plankton in the winter (A) and the spring (B) of the year of 2015 in the Yellow Sea

表 3 脂肪酸和环境变量的 DCA 和 RDA 结果

排序轴 axe		变量 variable			
		1	2	3	4
DCA 结果 DCA result					
特征值 eigenvalues		0.125	0.098	0.058	0.018
梯度长度 lengths of gradient		1.892	2.689	1.493	1.482
脂肪酸数据的累积百分比变化率 cumulative percentage variance of fatty acid data		23.0	41.0	51.7	55.1
RDA 结果 RDA result					
特征值 eigenvalue		0.153	0.039	0.022	0.005
脂肪酸-环境相关性 fatty acids-environment correlation		0.887	0.526	0.433	0.275
累积百分比变化率 cumulative percentage variance	脂肪酸数据 fatty acids data	15.3	19.1	21.3	21.7
	脂肪酸-环境关系 fatty acids-environment relation	70.2	88.0	97.9	100

硅藻,可能还有鞭毛藻、甲藻等,而冬季其食物组成包含更多的硅藻。春季浮游生物具有较高的 MUFA 和 PUFA 相对含量,可能由于春季水温高于冬季,而浮游植物中 PUFA 相对含量会随着环境温度的升高而积累^[25]所致。本研究结果中所示粒级>500 μm 的浮游生物中 ω3 PUFA 相对含量较高的现象与南海的相应研究结果^[26]相似, Bergvik 等^[14]在挪威峡湾对 1—6 月份桡足类脂肪酸的分析结果也显示浮游动物具有较强的富集 ω3PUFA 的能力,尤其在温度较高的 3—5 月。粒级>500 μm 的浮游生物主要为较大型的桡足类、端足类和磷虾类,它们较高的 ω3 PUFA 富集水平可能与春季充足的饵料生物来源及其自身积极储存脂类营养以应对生殖产卵有关^[27-28]。冬、春两季, 20:1+ 22:1、EPA、DHA、ω3PUFA 及 PUFA 在 500 μm、1000 μm 粒级浮游生物的脂肪酸组成中比重较大,这可能是由于 500 μm、1000 μm 粒级浮游生物中存

在较多的植食性浮游动物,尤以植食性桡足类较多,这与现场镜检结果也一致。2000 μm 粒级浮游生物在冬季单不饱和脂肪酸以 15:1+17:1 贡献较大,而在春季其不饱和脂肪酸所含 20:1+22:1 的相对含量较冬季增加了 6 倍。已有研究证实, 20:1 和 22:1 是植食性桡足类的特征性脂肪酸^[21], MUFA 和 15:1+17:1 在厌氧细菌中含量较高,被用来指示饵料中细菌及碎屑物质^[20],可以推测, 2000 μm 浮游生物在春季摄食了更多的桡足类,在冬季还可能从碎屑食物中获取营养。

自然环境下,海水仔稚鱼的脂肪酸营养大多来自于浮游生物。ω3 PUFA(DHA、EPA 等)和 ω6 PUFA(如 20:4ω6)是海水仔稚鱼生长的必需脂肪酸^[22, 29],其中以 DHA 和 EPA 尤为重要^[30-34]。仔稚鱼的脂肪酸组成反映了其生长发育对不同脂肪酸的需求^[35-38]。表 4 为收集黄海部分经济鱼类重要脂肪酸组成。从表中可以看出,黄海重要鱼类

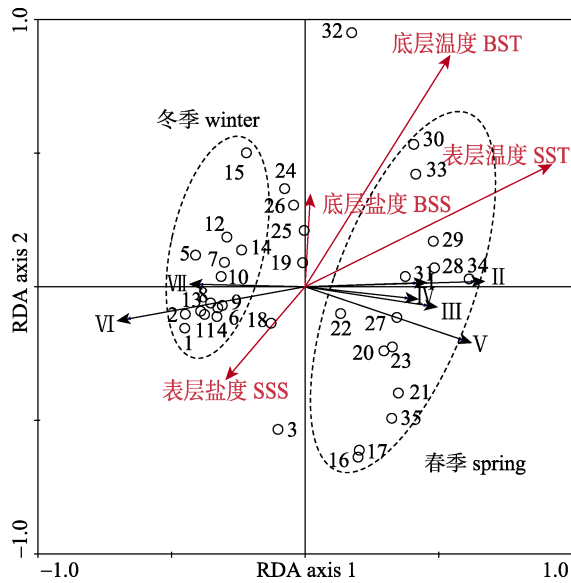


图 7 不同粒级浮游生物的脂肪酸含量和环境变量的 RDA 排序图

I 表示 500~1000 μm 粒级的 PUFA 含量; II 表示 500~1000 μm 粒级的 MUFA 含量; III 表示 200~300 μm 粒级的 PUFA 含量; IV 表示 200~300 μm 粒级的 MUFA 含量; V 表示 70~200 μm 粒级的 PUFA 含量; VI 表示 70~200 μm 粒级的 SFA 含量; VII 表示 1000~2000 μm 粒级的 SFA 含量。1~20 表示春季站位; 21~35 表示冬季站位。

Fig. 7 RDA ordination plot of fatty acids content in size fractionated plankton and environment variable
I represents percentage of PUFA in 500–1000 μm ; II represents percentage of MUFA in 500–1000 μm ; III represents percentage of PUFA in 200–300 μm ; IV represents percentage of MUFA in 200–300 μm ; V represents percentage of PUFA in 70–200 μm ; VI represents percentage of SFA in 70–200 μm ; VII represents percentage of SFA in 1000–2000 μm . 1–20 represent selected sampling sites in the spring; 21–35 represent selected sampling sites in the winter.

在生长早期阶段 PUFA(17%~49%)、 ω 3PUFA (14%~46%)、DHA(8%~31%)比例较高, 且随发育期的推后, 上述脂肪酸的相对含量也随之增加。有研究将 ω 3 PUFA 用作衡量食物营养质量的指标^[44]。综合分析黄海各粒级的浮游生物脂肪酸组成, 500 μm 和 1000 μm 粒级的 ω 3 PUFA 相对含量较高, 冬季该值>25%, 春季可达 35%以上, 且其 DHA>25%, DHA/EPA 比值>2, 更符合仔稚鱼生长所需的要求。相较而言, 更大粒级(2000 μm)浮游生物的 DHA 和 EPA 含量略低于 500 μm 和 1000 μm 粒级, 且其 DHA/EPA 比值小, 作为饵料其营养质量略低于 500 μm 、1000 μm 粒级浮游生物。这可能因为本研究分级过程中, 各粒级样品为混合生物, 2000 μm 粒级浮游生物中含有大量箭虫以及少量其他胶质生物, 胶质性浮游生物营养相对含量较其他甲壳类生物低^[18]。<500 μm 粒级浮游生物在冬季的 ω 3 PUFA 相对含量仅 8%~13%, 低于鱼类早期生长过程中的脂肪酸组成, 因此可以初步认为, 冬季该粒级范围内的浮游生物并不适宜或不足以作为鱼类生长提供足够的营养。而在春季, 这些小型浮游生物的 PUFA、 ω 3 PUFA 和 DHA 的相对含量都有明显的提高, 也适合作为鱼类早期生长的饵料生物。可以认为, 在冬季, 可为鱼类生长提供足够营养的浮游生物的粒级范围相对较窄, 主要是 >500 μm 粒级的较大型浮游生物; 而在春季, 可

表 4 部分黄海经济鱼类的仔稚、幼鱼的脂肪酸相对组成
Tab. 4 Fatty acid compositions in larvae and juveniles of some economic fishes in the Yellow Sea

种类 species	生长阶段 growth stage	PUFA	ω 3 PUFA	ω 6 PUFA	DHA	EPA	DHA/EPA	参考文献 reference
鳀鱼 <i>Engraulis japonicus</i>	晚期仔鱼 late larva	17.9	14.7	3.22	8.61	3.27	2.63	
	稚鱼 larvae fish	44.3	41.3	3.08	28.9	7.05	4.10	[39]
	幼鱼 juvenile	49	46.3	2.73	31.6	8.73	3.62	
鳀鱼 <i>Engraulis japonicus</i>	幼鱼 juvenile	17.58	—	—	10.21	2.22	4.60	[40]
中国鲷 <i>Pampus chinensis</i>	幼鱼 juvenile	26.13	23.67	4.86	16.23	4.86	3.34	[41]
黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	1 日龄 1 day	17.43	15.78	1.65	11.27	2.82	4.00	
	5 日龄 5 day	20.99	18.4	2.59	13.56	3.07	4.42	[42]
	10 日龄 10 day	28.93	24.06	4.93	19.26	3.23	5.96	
大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	晚期仔鱼 late larva	27.33	—	—	18.78	3.41	5.51	[43]
	稚鱼 larvae fish	41.74	—	—	25.36	7.36	3.45	

注: “—”代表暂未收集数据。
Note: “—” stands for missing data.

以提供足够营养的浮游生物粒级范围较广, 100~500 μm 的小型浮游动物也可作为鱼类早期生长的有效饵料来源。

参考文献:

- [1] Auel H, Harjes M, Rocha R D, et al. Lipid biomarkers indicate different ecological niches and trophic relationships of the Arctic hyperiid amphipods *Themisto abyssorum* and *T. libellula*[J]. Polar Biol, 2002, 25(5): 374–383.
- [2] Kirsch P E, Iverson S J, Bowen W D, et al. Dietary effects on the fatty acid signature of whole Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1998, 55: 1378–1386.
- [3] Guan Z F, Jiang B, Wang L. A comparative study of the component of del spray in fish and fish bones[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2003, 5(1): 44–46. [关紫烽, 姜波, 王兰. 鱼肉、鱼骨中脂肪酸组成的比较研究[J]. 大连民族学院学报, 2003, 5(1): 44–46.]
- [4] Howell K L, Pond D W, Billett D S M, et al. Feeding ecology of deep-sea seastars (Echinodermata: Asteroidea): a fatty-acid biomarker approach[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2003, 255: 193–206.
- [5] Ju S, Harvey H R. Lipids as markers of nutritional condition and diet in the Antarctic krill *Euphausia superba* and *Euphausia crystallorophias* during austral winter[J]. Deep-Sea Res II, 2004, 51: 2199–2214.
- [6] Huang L, Wu Y, Zhang J. Studies on nutrient relation of aquatic ecosystem using fatty acids[J]. Marine Sciences, 2009, 33(3): 93–96. [黄亮, 吴莹, 张经. 脂肪酸标志水生生态系统营养关系的研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(3): 93–96.]
- [7] Zhang L, Pu X M, Liang Y J, et al. Roles of the essential fatty acids in marine food chains[J]. Marine Sciences, 2009, 33(4): 66–71. [张乐, 蒲新明, 梁彦娟, 等. 必需脂肪酸在海洋食物链中的作用[J]. 海洋科学, 2009, 33(4): 66–71.]
- [8] Yin M C. Feeding and growth of the larva stage of fish[J]. Journal of Fisheries of China, 1995, 19(4): 335–342. [殷名称. 鱼类仔鱼期的摄食和生长[J]. 水产学报, 1995, 19(4): 335–342.]
- [9] Wang X A, Ma A J, Zhang X M, et al. A review of feeding behavior ecology of early development stage of marine fish[J]. Marine Sciences, 2006, 30(11): 69–74. [王新安, 马爱军, 张秀梅, 等. 海洋鱼类早期摄食行为生态学研究进展[J]. 海洋科学, 2006, 30(11): 69–74.]
- [10] Liu M T, Li C L, Sun S. Comparative study of fatty acid composition of two dinoflagellates and two diatoms[J]. Marine Sciences, 2010, 34(10): 77–82. [刘梦坛, 李超伦, 孙松. 两种甲藻和两种硅藻脂肪酸组成的比较研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(10): 77–82.]
- [11] Patil V, Källqvist T, Olsen E, et al. Fatty acid composition of 12 microalgae for possible use in aquaculture feed[J]. Aquac Int, 2007, 15: 1–9.
- [12] Hua X M, Zhou H Q, Ding Z P. Effect of temperature and illumination on the microalgae's growth, total lipid and fatty acid composition[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1999, 8(4): 309–315. [华雪铭, 周洪琪, 丁卓平. 温度和光照对微藻的生长、总脂肪含量及脂肪酸组成的影响[J]. 上海水产大学学报, 1999, 8(4): 309–315.]
- [13] Hartwich M, Martin-Creuzburg D, Wacker A. Seasonal changes in the accumulation of polyunsaturated fatty acids in zooplankton[J]. J Plankton Res, 2012, 35(1): 121–134.
- [14] Bergvik M, Leiknes Ø, Altin D, et al. Dynamics of the lipid content and biomass of *Calanus finmarchicus* (copepodite V) in a Norwegian Fjord[J]. Lipids, 2012, 47: 881–895.
- [15] Lischka S, Hagen W. Seasonal lipid dynamics of the copepods *Pseudocalanus minutus* (Calanoida) and *Oithona similis* (Cyclopoida) in the Arctic Kongsfjorden (Svalbard)[J]. Mar Biol, 2007, 150: 443–454.
- [16] Liu M T, Li C L, Sun S, et al. Fatty acid composition of *Calanus sinicus* in autumn in Yellow Sea and its implications[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 702–708. [刘梦坛, 李超伦, 孙松, 等. 秋季黄海中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)脂肪酸组成及其指示作用[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 702–708.]
- [17] Mayzaud P, Boutoute M. Dynamics of lipid and fatty acid composition of the hyperiid amphipod *Themisto*: a bipolar comparison with special emphasis on seasonality[J]. Polar Biol, 2015, 38: 1049–1065.
- [18] Jin X, Li C L, Sun S, et al. The diet of the common zooplankton species in Changjiang Estuary adjacent sea revealed by fatty acid analysis[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(6): 1083–1090. [金鑫, 李超伦, 孙松, 等. 基于脂肪酸标记的长江口海区浮游动物常见种食性分析[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1083–1090.]
- [19] Huo Y, Sun S, Zhang F, et al. Biomass and estimated production properties of size-fractionated zooplankton in the Yellow Sea, China[J]. J Marine Syst, 2012, 94: 1–8.
- [20] Edlund A, Nichols P D, Roffey R, et al. Extractable and lipopolysaccharide fatty acid and hydroxy acid profiles from *Desulfovibrio* species[J]. J Lipid Res, 1985, 26(8): 982–988.
- [21] Parrish C. Determination of total lipid, lipid classes, and fatty acids in aquatic samples(ed)[M]. New York: Springer-Verlag, 1999: 5–20.
- [22] Liu J K, Chen X L. A Survey of research on n-3HUFA nutrition for marine fish larvae[J]. Journal of Ocean University of

- Qingdao: Natural Science, 2002, 32(6): 897–902. [刘镜恪, 陈晓琳. 海水仔稚鱼的必需脂肪酸——n-3 系列高度不饱和脂肪酸研究概况[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2002, 32(6): 897–902.]
- [23] Reuss N, Poulsen L K. Evaluation of fatty acids as biomarkers for a natural plankton community. A field study of a spring bloom and a post-bloom period off West Greenland[J]. Mar Biol, 2002, 141: 423–434.
- [24] Parrish C C, Abrajano T A, Budge S M, et al. Lipid and phenolic biomarkers in marine ecosystems: analysis and applications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 193–233.
- [25] Yang Q X. The effect of temperature on fatty acid composition of marine phytoplankton[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(5): 439–446. [杨庆霄. 温度对一些浮游植物中脂肪酸组成的影响[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(5): 439–446.]
- [26] Shamsudin L. Seasonal variation of fatty acid content in natural microplankton from the Tumpat coastal waters of the South China Sea[J]. Arch Physiol Biochem, 1998, 106(3): 253–260.
- [27] Hiltunen M, Strandberg U, Keinänen M, et al. Distinctive lipid composition of the copepod *Limnocalanus macrurus* with a high abundance of polyunsaturated fatty acids[J]. Lipids, 2014, 49: 919–932.
- [28] Lee R F, Hagen W, Kattner G. Lipid storage in marine zooplankton[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2006, 307: 273–306.
- [29] Chen X L, Liu J K, Zhou L. Research outline of n-6 high unsaturated fatty acid for marine fish larvae[J]. Marine Sciences, 2004, 28(11): 61–63. [陈晓琳, 刘镜恪, 周利. 海水仔稚鱼必需脂肪酸——n-6 系列高度不饱和脂肪酸研究概况[J]. 海洋科学, 2004, 28(11): 61–63.]
- [30] Liu J K, Chen X L, Xu S H. Effect of different EPA/AA ratios in experimental microdiets on growth and survival of Japanese flounder larvae[J]. Marine Sciences, 2005, 29(10): 40–43. [刘镜恪, 陈晓琳, 徐世宏. 实验微粒饲料中廿碳五烯酸(EPA)与廿碳四烯酸(AA)的比例对牙鲆仔稚鱼生长、存活的影响[J]. 海洋科学, 2005, 29(10): 40–43.]
- [31] Liu J K, Chen X L, Zhou L, et al. Study on the optimum proportion of DHA and EPA in microdiets for red seabream (*Pagrus major*) larvae[J]. Marine Sciences, 2004, 28(2): 18–20. [刘镜恪, 陈晓琳, 周利, 等. 真鲷仔稚鱼微粒饲料中DHA与EPA最佳比例的研究[J]. 海洋科学, 2004, 28(2): 18–20.]
- [32] Bell J G, Castell J D, Tocher D R, et al. Effects of different dietary arachidonic acid: docosahexaenoic acid ratios on phospholipid fatty acid compositions and prostaglandin production in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Fish Physiol Biochem, 1995, 14(2): 139–151.
- [33] Rodriguez C, Pérez J, Izquierdo M S, et al. The effect of n-3 HUFA proportions in diets for gilthead seabream (*Sparus aurata*) larval culture[J]. Aquaculture, 1994, 124(1–4): 284.
- [34] Koven W M, Tandler A, Kissil G W, et al. The effect of dietary (n-3) polyunsaturated fatty acids on growth, survival and swim bladder development in *Sparus aurata* larvae[J]. Aquaculture, 1990, 91(1–2): 131–141.
- [35] Wu L M, Chen C, Wang L, et al. Comparison of growth performance and nutritional components in muscles of *Centropomus striata* juveniles fed with different diets[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(2): 42–50. [吴雷明, 陈超, 王鲁, 等. 不同饵料对条纹锯鱼旨幼鱼生长与肌肉营养成分的影响[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(2): 42–50.]
- [36] Liu G X, Xu D X, Qiu X C, et al. Study on the growth, survival and fatty acid composition of larvae and juvenile of *Paralichthys olivaceus* raised with *Schmackeria poplesia* (Copepoda: Calanoida)[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2007, 37(2): 259–265. [刘光兴, 徐东晖, 邱旭春, 等. 火腿许水蚤对牙鲆仔稚鱼成活、生长及脂肪酸组成的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(2): 259–265.]
- [37] Ji W J. The influence of different fat sources in feed on the growth rate of juvenile and fatty acid composition of body fat of black sea bream(*Sparus macrocephalus*)[J]. Marine Fisheries Research, 1999, 20(1): 69–74. [季文娟. 饲料中不同脂肪源对黑鲷幼鱼生长和鱼体脂肪酸组成的影响[J]. 海洋水产研究, 1999, 20(1): 69–74.]
- [38] Wang N. Application of fatty acids biomarker in marine food web research: A case in the Yangtze River Estuary sea area[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. [王娜. 脂肪酸等生物标志物在海洋食物网研究中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.]
- [39] Huang L. Carbon, nitrogen, phosphorus and fatty acid composition in major biology of food webs based on anchovy(*Engraulis japonicus*)[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004. [黄亮. 黄海以鳀鱼为基础食物网中主要生物的碳、氮和磷三元素组成及脂肪酸组成特征[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.]
- [40] Liu H Z, Luo L, Cai D L, et al. Analysis and valuation of nutrient components in the muscle of *Engraulis japonicus* at different growth stages[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(11): 2150–2157. [刘海珍, 罗琳, 蔡德陵, 等. 不同生长阶段鳀鱼肌肉营养成分分析与评价[J]. 核农学报, 2015, 29(11): 2150–2157.]
- [41] Zhao F, Zhuang P, Shi Z H, et al. Comparative analysis on biological components of muscles in young and adult *Pampus chinensis*[J]. Marine Fisheries, 2010, 32(1): 102–108. [赵峰, 庄平, 施兆鸿, 等. 中国鲳成鱼和幼鱼肌肉生化成分

- 分的比较分析[J]. 海洋渔业, 2010, 32(1): 102–108.]
- [42] Jin Y H, Xie Z G, Lou B, et al. The vary of amino acid, free amino acid and fatty acid of *Nibeia albiflora* larvae during ontogeny[J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science, 2014, 33(1): 53–58. [金煜华, 谢中国, 楼宝, 等. 黄姑鱼仔稚鱼发育过程中氨基酸和脂肪酸的变化[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2014, 33(1): 53–58.]
- [43] Wang D L, Xu S L, Yan X J, et al. Fatty acid composition and their changes in larvae and juveniles of *Pseudosciaena crocea*[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(2): 241–245. [王丹丽, 徐善良, 严小军, 等. 大黄鱼仔、稚、幼鱼发育阶段的脂肪酸组成及其变化[J]. 水产学报, 2006, 30(2): 241–245.]
- [44] Kainz M, Arts M T, Mazumder A. Essential fatty acids in the planktonic food web and their ecological role for higher trophic levels[J]. Limnol Oceanogr, 2004, 5(49): 1784–1793.

Fatty acid composition of size-fractionated plankton during winter and spring in the Yellow Sea

PENG Liang^{1,2}, ZUO Tao^{2,3,4}, SHI Yongqiang^{2,3,4}, WANG Jun^{2,3}, LÜ Moxiao^{1,2}

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

3. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Sciences, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China;

4. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao 266071, China

Abstract: To understand the nutritional quality of planktonic food for marine fish, the fatty acid composition of plankton collected from the Yellow Sea was investigated and compared between winter and spring. As soon as the plankton were collected at sea, they were size-fractionated into six groups: 100, 200, 300, 500, 1000, and 2000 μm , and then immediately stored in liquid nitrogen. The fatty acid contents of the plankton were determined using capillary column gas chromatography in the laboratory. Compared with the spring-collected plankton, the winter-collected plankton in all size groups had higher total saturated fatty acid (SFA) contents, but lower contents of total monounsaturated fatty acids (MUFA), total polyunsaturated fatty acids (PUFA), and the fatty acids 16:1 ω 7, eicosapentaenoic acid (EPA), docosahexaenoic acid (DHA), and 20:1+22:1. The different size groups of plankton collected in both winter and spring were compared. The contents of ω 3PUFA, EPA, DHA, and 20:1+22:1 were higher in large plankton ($> 500 \mu\text{m}$) than in small plankton ($< 500 \mu\text{m}$). However, the contents of the fatty acids 16:0 and 18:0 were higher in small plankton than in large ones. Among the nutritional quality indicators (DHA/EPA, 16:1/16:0, and $\Sigma 16/\Sigma 18$ ratios), the $\Sigma 16/\Sigma 18$ ratio was higher in winter-collected plankton than in spring-collected plankton, while the DHA/EPA and 16:1/16:0 ratios were higher in spring-collected plankton than in winter-collected plankton. The DHA/EPA ratios reached to 2 in the 500 μm and 1000 μm groups in winter, but were greater than or close to 2 in all size groups in spring. Multiple analyses showed that the seawater temperature had the strongest effect on the fatty acid composition of plankton in the Yellow Sea, especially the MUFA and PUFA contents in plankton of the 100–1000 μm size groups. The results of this study show that winter-collected plankton of $> 500 \mu\text{m}$ could meet the nutritional requirements of marine fish, especially larvae and juveniles. Spring-collected plankton in size groups from 100 μm to 2000 μm , which have higher DHA/EPA ratio and ω 3 PUFA content, are also suitable food sources for marine fish. It may be inferred that the size spectrum of plankton suitable as food for marine fishes is wider in spring than in winter in the Yellow Sea.

Key words: the Yellow Sea; fatty acid; size fraction; plankton; nutrition

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