

基于脂肪酸标记的长江口海区浮游动物 常见种食性分析*

金鑫^{1,2} 李超伦¹ 孙松^{1,3} 刘梦坛³

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049;
3. 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)

提要 脂肪酸不仅是浮游动物的重要组分,也被作为生物标记来指示动物的食物组成及其之间的营养关系。本文运用脂肪酸标记法对长江口附近海区 6 个浮游动物常见种的食性进行了分析。研究表明,中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)雌体和桡足幼体都表现出明显的植食性。但雌体中 16:1 ω 7 的含量要明显高于 18:4 ω 3,表明雌体对硅藻的摄食较多;桡足幼体的 18:4 ω 3 要高于雌体,说明桡足幼体对甲藻的摄食较多。磷虾(*Euphausia* spp.)的多不饱和脂肪酸(PUFA)和 ω 3 系列脂肪酸的含量很高,说明其作为饵料可以给摄食者提供较多的脂类营养物质。中华哲水蚤和磷虾较低的 22:6 ω 3/20:5 ω 3 比值说明他们的营养地位较低。箭虫(*Sagitta* spp.)的 20:1 和 22:1 脂肪酸含量很高,指示了其对植食性桡足类的摄食。蝶水母(*Ocyropsis crystallina*)、瓜水母(*Bero cucumis*)和四叶小舌水母(*Liriope tetraphylla*)的 20:1+22:1 脂肪酸所占比例较高,指示了其对植食性桡足类的摄食,但是水母类的总脂肪酸含量都很低。几种水母和箭虫的 22:6 ω 3 的含量要明显高于 20:5 ω 3 的含量,说明它们在浮游食物网中具有较高的营养地位。

关键词 食性,浮游动物,脂肪酸,长江口海区
中图分类号 Q178

在海洋生态系统中,浮游动物既是初级生产的主要摄食者,又是高营养级鱼类等捕食者的主要饵料,是浮游食物网的中间环节。浮游动物种类间存在食性差异和摄食选择性,即使同种生物不同发育期也存在着饵料组成和大小的差异,另外不同饵料条件下浮游动物的摄食选择也会发生相应的变化,而这些差异和变化也将对海洋中初级产品的种类组成、规模、结构、以及在食物链(网)的流动途径起到重要的调控作用。因此,研究浮游动物的食物组成是明晰海洋浮游食物网结构,了解海洋生态系统物质循环与能量流动途径的基础(Sterner *et al*,1998)。

传统食性分析方法,如肠道内含物分析法,肠道色素分析法,饵料差减分析法都存在一定的局限性,一般都只能反映摄食者短期内的摄食情况(王娜,2008¹⁾; Perissinotto *et al*,1997; 李超伦,2001²⁾)。作为生物体必需组成的脂肪酸,由于具有结构多样性,能够在一定程度上指示其来源,并且能够从较低营养级(初级生产者)向较高营养级进行保守传递,因此能够更为准确地在物种水平上反映动物在一段时期内的摄食情况及其所处的营养级地位(Dalsgaard *et al*,2003; John *et al*,1996; Kirsch *et al*,1998)。目前,脂肪酸标记法已成为研究浮游食物网营养关系的较为有

* 国家重点基础研究规划项目(973)资助,2011CB403604号;国家自然科学基金项目资助,40776092号,40821004号。金鑫, E-mail: jinxin307@gmail.com

1) 王娜,2008. 脂肪酸等生物标志物在海洋食物网研究中的应用-以长江口毗邻海域为例. 华东师范大学硕士论文,15—16
2) 李超伦,2001. 海洋桡足类摄食生态及其对浮游植物的摄食压力. 中国科学院海洋研究所博士论文,9

通讯作者: 李超伦, 博士, 研究员, E-mail: lcl@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-02-31, 收修改稿日期: 2012-02-28

效的技术手段之一。

浮游动物体内的脂类物质绝大部分来源于食物 (Goulden *et al.*, 1990)。而海洋微藻的脂肪酸组成特征在不同门类之间具有显著的差异 (李春颖等, 2008; Volkman *et al.*, 1998), 可以被用来指示海洋微藻的种类组成。如甲藻中的 18:4 ω 3 和硅藻中的 16:1 ω 7 已被广泛证实可作为硅藻和甲藻的特征脂肪酸用于指示自然水体颗粒悬浮物中的硅藻和甲藻成分 (Claustre *et al.*, 1988/1989; Kattner *et al.*, 1983; 吕淑果等, 2009) 以及硅藻和甲藻脂肪酸沿食物链的传递过程 (Fraser *et al.*, 1989)。在摄食者中只有植食性的桡足类能大量合成 20 碳和 22 碳的脂肪酸和脂肪醇类物质 (Dalsgaard *et al.*, 2003)。因此, 20:1 和 22:1 脂肪酸不仅可以作为桡足类摄食浮游植物的指标, 还能作为高营养级摄食植食性桡足类的指标 (Falk-Petersen *et al.*, 1987)。另外, $\Sigma 15$ 和 $\Sigma 17$ 脂肪酸则可以用来指示饵料中的细菌贡献 (Budge *et al.*, 1998, 2001)。关于长江口海区动物食性的分析和研究主要集中在鱼类方面 (李忠义等, 2009; 林龙山, 2007), 本文研究了长江口海区浮游动物常见种的脂肪酸组成情况, 旨在通过脂肪酸标记法分析其食性及营养级地位, 为该海区海洋浮游食物网的能流物流研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

浮游动物样品采集于 2010 年 6 月 8—22 日国家自然科学基金委员会“东海(长江口)海洋科学”共享航次, 具体采集站位见图 1。

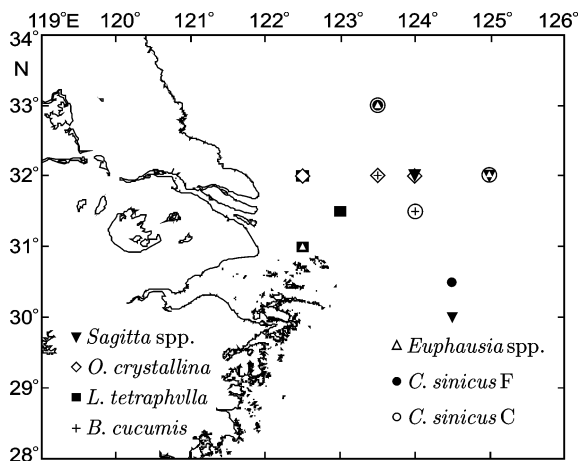


图 1 2010 年 6 月长江口临近海区采样站位图

Fig.1 Sampling stations in waters adjacent to the Changjiang River estuary

浮游动物样品的采集采用标准的大型浮游生物网(网口直径 80 cm, 孔径 500 μ m)从距海底 4 m 处垂直拖网至表层。现场挑选浮游动物常见种个体, 将浮游动物过滤到 Whatman GF/C 玻璃纤维滤膜上(孔径 1.2 μ m, 直径 47 mm; 事先在马弗炉中以 450 $^{\circ}$ C 灼烧 4 h 以去除有机物), 液氮保存。最终获取了以下 6 种(类)长江口海区浮游动物常见种:

蝶水母(*Ocyropsis crystallina*)

瓜水母(*Bero cucumis*)

四叶小舌水母(*Liriope tetraphylla*)

中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)雌体(F), 桡足幼体(C)(主要是 CIV 和 CV)

磷虾(*Euphausia* spp.)

箭虫(*Sagitta* spp.)

1.2 样品前处理与测定

浮游动物样品经 -50 $^{\circ}$ C 冷冻干燥 48 h, 取一定干重的样品(中华哲水蚤、磷虾, 15 mg; 箭虫, 30 mg; 蝶水母、瓜水母和四叶小舌水母, 50 mg)进行脂肪酸提取, 处理过程参照 Kattner 等 (1986)的方法。用 19:0 脂肪酸甲酯(Sigma 公司)作为内标, 0.01%BHT 甲醇溶液(butylhydroxytoluene, BHT)作为抗氧化剂。经二氯甲烷:甲醇(2:1)提取总脂后用高纯氮气吹干, 然后加入 1 ml 3% 浓 H₂SO₄ 甲醇溶液并在氮气保护下于 80 $^{\circ}$ C 水浴中甲酯化 4 h。冷却后用正己烷萃取脂肪酸甲酯, 样品定容至 0.5 ml 后上机测定。所用有机试剂均为 Merck 公司生产的色谱纯。

脂肪酸的组成和含量利用 Agilent 7890A 型气相色谱仪进行。以 37 种脂肪酸混标(Sigma 公司)作为标准, 通过比对保留时间对脂肪酸进行定性分析, 采用内标标准曲线法对脂肪酸进行定量分析。色谱条件如下:

毛细管色谱柱: DB-FFAP(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m);

进样口温度: 220 $^{\circ}$ C;

检测器温度: 280 $^{\circ}$ C;

柱温: 程序升温 150 $^{\circ}$ C (1 min) $\xrightarrow{3^{\circ}\text{C min}^{-1}}$ 220 $^{\circ}$ C (33 min)。

1.3 脂肪酸含量计算及其主成分分析

脂肪酸含量的计算先采用内标标准曲线法计算绝对含量, 以单位干重的浮游动物体内每种脂肪酸的含量表示(mg/g)。再将脂肪酸绝对含量换算成百分比含量, 对 6 种浮游动物常见种脂肪酸组成进行主成分分析, 以研究其脂肪酸组成的特征。所有统计分析

均采用 SPSS16.0。

2 结果

2.1 浮游动物脂肪酸组成

从实验生物的脂肪酸含量分析结果(表 1)可以看出, 中华哲水蚤幼体的总脂肪酸含量(TFA)最高, 平

均值达到 81.40 mg/g; 磷虾和中华哲水蚤雌体的 TFA 相近, 分别为 51.45 mg/g 和 49.32 mg/g; 箭虫的 TFA 也较高, 达 38.76 mg/g; 几种水母的 TFA 均较低, 分别为蝶水母 4.52 mg/g, 瓜水母 5.29 mg/g, 四叶小舌水母 4.06 mg/g。

6 种浮游动物的多不饱和脂肪酸(PUFA)含量都

表 1 浮游动物常见种的脂肪酸含量(以单位干重的浮游动物体内每种脂肪酸的含量表示(mg/g)
(SFA: 饱和脂肪酸; MUFA: 单不饱和脂肪酸; PUFA: 多不饱和脂肪酸; TFA: 总脂肪酸)

Tab.1 Fatty acid content (mg/g) of the common zooplankton species(SFA: Straight-chain saturated fatty acid; MUFA: Monounsaturated fatty acid; PUFA: Polyunsaturated fatty acid; TFA: Total fatty acid)

FA 脂肪酸	蝶水母 <i>O. rystallina</i> (n=3)	瓜水母 <i>B.cucumis</i> (n=2)	四叶小舌 <i>L.tetraphylla</i> (n=3)	中华哲水蚤 雌体 <i>C. sinicus</i> Female (n=2)	中华哲水蚤 桡足幼体 <i>C. sinicus</i> Copepodid (n=3)	磷虾 <i>Euphausia</i> spp. (n=3)	箭虫 <i>Sagitta</i> spp. (n=3)
14:0	0.20	0.14	0.23	4.51	9.49	4.03	1.56
15:0	0.03	0.03	0.04	0.43	0.72	0.46	0.27
16:0	1.15	1.07	0.91	7.82	10.06	5.98	7.59
16:1 ω 7	0.06	0.15	0.12	3.80	6.08	2.27	1.97
16:2 ω 4	0.01	0.04	0.07	0.40	0.60	0.17	0.06
17:0	0.08	0.08	0.07	0.43	0.39	0.64	0.35
17:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.05	0.00
16:4 ω 3	0.00	0.00	0.02	0.20	0.44	0.13	0.00
18:0	0.34	0.32	0.51	1.57	1.23	1.23	1.84
18:1 ω 9	0.13	0.28	0.16	2.55	4.21	6.00	2.38
18:1 ω 7	0.03	0.04	0.03	0.30	0.36	2.39	0.31
18:2 ω 6	0.09	0.09	0.08	0.85	1.68	1.98	0.72
18:2 ω 4	0.00	0.01	0.00	0.07	0.16	0.06	0.03
18:3 ω 3	0.04	0.05	0.03	0.71	2.30	1.99	0.54
18:4 ω 3	0.09	0.11	0.02	1.25	7.12	3.27	0.49
20:0	0.01	0.05	0.03	0.25	0.19	0.24	0.29
20:1 ω 11	0.00	0.00	0.01	0.18	0.11	0.10	0.07
20:1 ω 9	0.12	0.16	0.05	2.43	4.50	0.63	1.88
20:1 ω 7	0.04	0.05	0.03	0.32	0.89	0.08	0.07
20:2 ω 6	0.03	0.03	0.02	0.03	0.09	0.15	0.08
20:3 ω 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20:4 ω 6	0.03	0.07	0.14	0.11	0.19	0.63	0.33
20:4 ω 3	0.05	0.06	0.02	0.69	1.22	0.31	0.30
20:5 ω 3EPA	0.53	0.47	0.26	5.61	7.78	8.16	3.00
22:1 ω 11	0.12	0.21	0.07	4.11	8.40	0.18	2.00
22:1 ω 9	0.06	0.19	0.07	0.30	0.55	0.06	0.16
24:0	0.01	0.01	0.00	0.00	0.56	0.27	0.07
22:6 ω 3DHA	1.31	1.55	1.12	10.29	10.97	9.24	12.10
SFA	1.80	1.75	1.78	15.00	22.78	13.23	11.98
MUFA	0.57	1.07	0.52	14.14	25.62	11.94	9.02
PUFA	2.16	2.47	1.76	20.18	33.00	26.28	18.88
$\Sigma\omega$ 3	2.02	2.25	1.46	18.74	30.30	23.31	17.66
Σ 16	1.23	1.26	1.11	12.37	17.61	8.73	9.82
Σ 18	0.71	0.89	0.83	7.28	17.04	16.90	6.29
Bacteria FA	0.10	0.11	0.11	0.86	1.10	1.10	0.62
20: 1+22:1	0.34	0.61	0.22	7.33	14.44	1.05	4.17
TFA	4.52	5.29	4.06	49.32	81.40	51.45	38.76

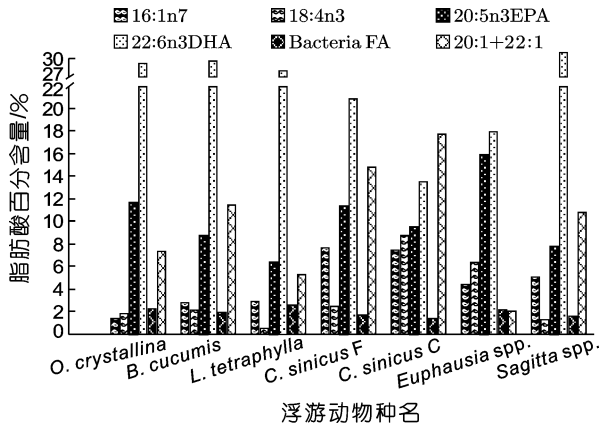


图 2 浮游动物常见种几种特征脂肪酸的百分含量(特征脂肪酸绝对含量占总脂肪酸含量的比重)

Fig.2 Fatty acid compositions of the common zooplankton species in waters adjacent to the Changjiang River estuary(%)

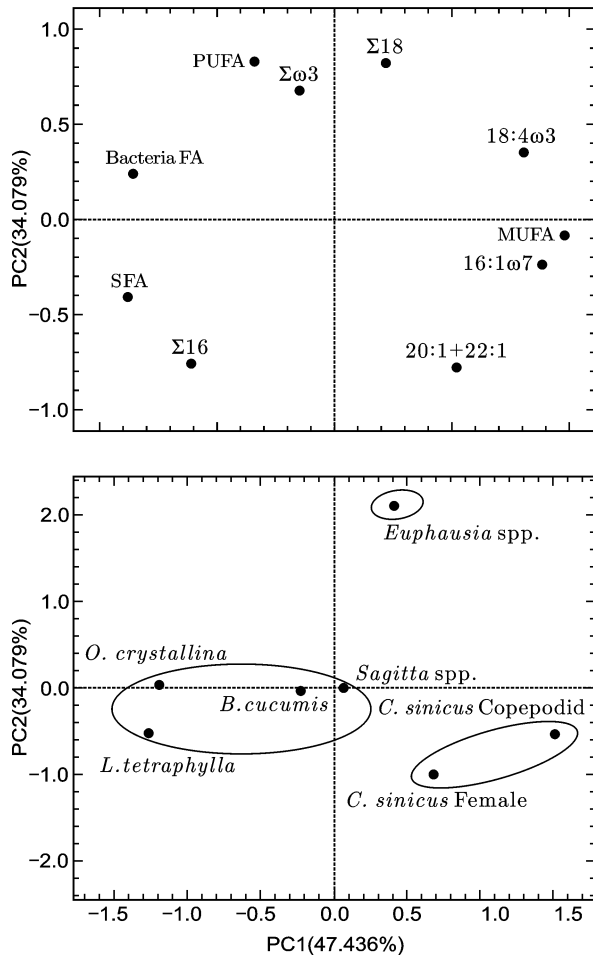


图 3 2010 年 6 月长江口毗邻水域浮游动物常见种基于脂肪酸组成的主成分分析

Fig.3 PCA plot of the common zooplankton species in waters adjacent to the Changjiang River estuary in June, 2010

很高, 都占其自身总脂肪酸含量的 40%以上, 其中磷虾的 PUFA 的含量更是占到了 TFA 的一半以上。中华哲水蚤幼体的 $\omega 3$ 系列脂肪酸含量较高, 达到 30.30 mg/g; 磷虾次之, 为 23.31 mg/g; 中华哲水蚤雌体和箭虫的含量相差不多, 分别为 18.74 mg/g 和 17.66 mg/g; 蝶水母、瓜水母和四叶小舌水母的含量较低, 分别为 2.02 mg/g, 2.25 mg/g 和 1.46 mg/g。中华哲水蚤的 16:1 $\omega 7$ 含量最高, 且幼体(6.08 mg/g)含量是雌体(3.80 mg/g)含量的 1.6 倍; 磷虾和箭虫的含量相差不多, 分别为 2.27 mg/g 和 1.97 mg/g; 3 种水母的 16:1 $\omega 7$ 含量很低, 其中蝶水母的仅有 0.06 mg/g。中华哲水蚤幼体 18:4 $\omega 3$ 的含量最高, 达到 7.12 mg/g; 磷虾 18:4 $\omega 3$ 的含量为 3.27 mg/g; 四叶小舌水母的 18:4 $\omega 3$ 的含量最低, 仅有 0.02 mg/g。另外, 中华哲水蚤 20:1+22:1 的含量显著高于其他种类, 且幼体(14.44 mg/g)几乎是雌体(7.33 mg/g)含量的 2 倍; 箭虫的 20:1+22:1 的含量也很高, 达到 4.17 mg/g。

分别比较 6 种浮游动物的 16:1 $\omega 7$ 、18:4 $\omega 3$ 、20:5 $\omega 3$ EPA、22:6 $\omega 3$ DHA、15:0+17:0(细菌 FA)、20:1+22:1 等几个重要的脂肪酸百分含量(图 2)发现, 22:6 $\omega 3$ 和 20:5 $\omega 3$ 在各浮游动物常见种的总脂肪酸中所占百分比都比较高, 且 22:6 $\omega 3$ 要高于 20:5 $\omega 3$ 。20:1+22:1 在中华哲水蚤中所占比重最大, 其次是箭虫、瓜水母、蝶水母、四叶小舌水母, 20:1+22:1 在磷虾中所占比重最低。16:1 $\omega 7$ 、18:4 $\omega 3$ 在中华哲水蚤和磷虾中所占比重较大。细菌 FA 在 3 种水母中所占比重相对较高。

2.2 浮游动物脂肪酸组成主成分分析

对实验生物脂肪酸组成进行了主成分分析(图 3)。主成分 1 和主成分 2 分别解释了浮游动物脂肪酸组成总变异的 47.44%和 34.08%, 从因子载荷图上可以看出(图 3: 上图), 主成分 1 维度正向上有 16:1 $\omega 7$ 、18:4 $\omega 3$ 、MUFA 和 20:1+22:1, 代表了浮游动物对浮游植物的摄食(Claustre *et al*, 1988/1989; Kattner *et al*, 1983; Falk-Petersen *et al*, 1987); 负向上有 SFA 和细菌脂肪酸, 代表了碎屑物质对浮游动物摄食的贡献(刘梦坛, 2010¹⁾)。主成分 2 的维度的正向上有 $\Sigma \omega 3$ 、 $\Sigma 18$ 和 PUFA, 说明浮游动物体内这三类脂肪酸所占的比重较大。

从因子得分图上来看(图 3: 下图), 中华哲水蚤主要分布在主成分 1 的正向维度上, 说明跟其他的浮游

1)刘梦坛, 2010.中国科学院研究生院博士论文, 脂肪酸标记在黄海生态系统营养关系研究中的指示作用.中国科学院研究生院博士论文, 86

动物相比, 浮游植物(主要是硅藻和甲藻)在中华哲水蚤的食物组成中所占的比重要更大一些; 与雌体相比, 中华哲水蚤幼体更靠近主成分 1 维度的正向, 说明浮游植物对食物的贡献要高于雌体。3 种水母和箭虫主要分布在主成分 1 维度的负向上, 说明 SFA 和细菌脂肪酸对其脂肪酸组成的贡献较大; 磷虾分布在主成分 2 维度的正向上, 说明 $\Sigma 18$ 和 $\Sigma \omega 3$ 系列脂肪酸在其体内所占比重较大。从图 3 中还可以看出, 几种胶质浮游动物的距离较近, 说明其脂肪酸组成较为相似, 反映出其近似的饵料组成和营养地位。

2.3 浮游动物 22:6 ω 3/20:5 ω 3(DHA/EPA)比值

用 DHA/EPA 对浮游动物做散点图(图 4)。磷虾、中华哲水蚤幼体和雌体具有较低的 DHA/EPA 比值, 分别为 1.13, 1.41, 1.83, 且中华哲水蚤雌体(1.83)要稍高于幼体(1.41); 蝶水母、箭虫、瓜水母和四叶小舌水母, 具有较高的 DHA/EPA 比值, 分别为 2.48, 2.94, 3.35, 4.28。

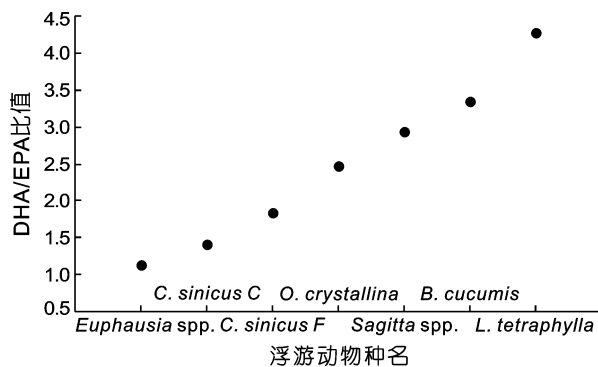


图 4 长江口毗邻水域浮游动物常见种的 DHA/EPA 比值
Fig.4 DHA/EPA of the common zooplankton species in waters adjacent to the Changjiang River estuary

3 讨论

主成分分析的结果表明 6 种实验生物, 从食物的组成来看可以分为三类: 中华哲水蚤主要摄食浮游植物(主要是硅藻和甲藻), 并且桡足幼体的植食性水平要高于雌体; 磷虾对 $\Sigma 18$ 和 $\omega 3$ 系列脂肪酸的积累较多; 蝶水母、瓜水母、四叶小舌水母和箭虫, 表现出相似的食性, 碎屑物质对其食物的贡献较高(刘梦坛, 2010¹⁾。

中华哲水蚤的脂肪酸组成具有明显的特征。其单

不饱和脂肪酸(MUFA)的含量较高, 达到 28%, 特别是 20:1 和 22:1 占到了总脂肪酸含量的 14%(图 2)以上。20:1 和 22:1 是植食性桡足类的特征性脂肪酸(Parrish, 1999)。可见, 中华哲水蚤具有很高的植食性。另外两种浮游植物特征脂肪酸 16:1 ω 7 和 18:4 ω 3 所占比重也比较高, 其中, 16:1 ω 7 指示硅藻, 18:4 ω 3 指示甲藻(李荷芳等, 1999; 李春颖等, 2008)。中华哲水蚤桡足幼体(主要是 C 和 C')的 18:4 ω 3 含量高于其 16:1 ω 7 的含量, 说明与雌体相比, 幼体(主要是 C 和 C')对甲藻的摄食较多。这可能是因为春季长江口海区的甲藻丰度要大于硅藻(王丹等, 2008)。也有研究表明, 中华哲水蚤桡足幼体对甲藻有一定的摄食偏好(刘梦坛, 2010¹⁾)。雌体的 16:1 ω 7 是 18:4 ω 3 的 3 倍, 说明中华哲水蚤雌体摄食硅藻较多, 对长江口 6 月浮游植物优势种的粒径进行分析发现, 硅藻的粒径要大于甲藻, 这可能是雌体摄食硅藻较多的原因。

箭虫脂肪酸最大的特点是 22:6 ω 3 含量很高, 并且显著高于 20:5 ω 3($P < 0.05$)。22:6 ω 3 随着营养级的升高, 它的含量也会越高(Dalsgaard *et al*, 2003)且比 20:5 ω 3 积累得多, 说明箭虫在浮游食物网中具有较高的营养级。箭虫体内 20:1 和 22:1 的含量也很高, 指示了其摄食植食性桡足类的摄食, 这与肠道胃含物分析的结果相一致, 即箭虫主要摄食桡足类(Tonnesson *et al*, 2005; 杨纪明等, 1995; 刘青等, 2006)。另外, 箭虫体内也具有微量的 16:1 ω 7 和 18:4 ω 3, 这与杨纪明等(1995)在强壮箭虫肠道胃含物中发现微量的藻类结果相一致。

磷虾的肠道超微结构(Dalley *et al*, 1989)和胃含物分析(Atkinson *et al*, 1997; Pakhomov *et al*, 1997)表明其主要摄食浮游植物。另外小型浮游动物和有机碎屑在其食物中也占有一定的比例, 并且有些种类具有一定的同性相食的特性(Dalley *et al*, 1989), 可以说磷虾是偏植食性的杂食性动物。本次研究中磷虾的 18:4 ω 3 和 16:1 ω 7 含量都相对较高, 18:4 ω 3 的含量要高于 16:1 ω 7, 这说明磷虾摄食甲藻要多于硅藻。春季长江口海区甲藻较多(王丹等, 2008)可能是磷虾体内 18:4 ω 3 稍高于 16:1 ω 7 的原因, 也有学者认为磷虾对甲藻有一定的摄食偏好(刘梦坛, 2010¹⁾)。另外, 磷虾的 15:0+17:0 的含量也相对较高, 说明了碎屑物质在

1)刘梦坛, 2010.中国科学院研究生院博士论文, 脂肪酸标记在黄海生态系统营养关系研究中的指示作用.中国科学院研究生院博士论文, 86

其食物中也具有一定的贡献,这与 Dalley 等(1989)对磷虾肠道胃含物分析的结果相一致。从磷虾的脂肪酸组成来看,其 PUFA 和 ω 3 系列脂肪酸的含量很高,达到其总脂肪酸含量的 45%以上。 ω 3 系列脂肪酸可以用来表征食物脂类营养物质的高低(Kainz *et al.*, 2004)。很多鱼类以磷虾作为主要饵料(孟田湘, 2003; 李振华, 2010)是因为磷虾能够为它们提供较多的脂类物质。

一些传统的摄食研究方法表明,水母类属肉食性,其摄食范围比较广,包括桡足类、枝角类、一些无脊椎动物的浮游幼虫(Purcell, 1981,1988,1997; Mills, 1995; Arai, 1997; 陈丽华, 2003)、鱼卵、仔、稚鱼(Purcell *et al.*, 2001)。本研究结果显示,蝶水母、瓜水母和四叶小舌水母的脂肪酸组成较为相似,总脂肪酸的含量都比较低;体内 22:6 ω 3 的含量要显著高于 20:5 ω 3($P < 0.05$),说明水母类具有较高的营养级,这与传统方法的研究结果相一致。另外,这几种水母体内 20:1 和 22:1 所占比重也比较高(图 2),指示了其对于植食性桡足类的摄食。

通常来说, DHA/EPA 会随着营养级的升高而升高(Dalsgaard *et al.*, 2003; Napolitano, 1999),所以 DHA/EPA 可以间接的作为指示生物营养级的指标。本研究的实验生物的 DHA/EPA,反映了实验生物在长江口海区的营养地位,中华哲水蚤、磷虾主要摄食浮游植物,在浮游食物网中处于较低的营养级,而蝶水母、瓜水母、四叶小舌水母和箭虫这几种胶质浮游动物主要摄食桡足类等浮游动物,箭虫还具有明显的同性相食的特性,水母类还摄食鱼卵和仔、稚鱼,所以其营养地位相对较高。但由于样本量和个体差异以及不同生物对脂肪酸吸收和转化效率不同等原因,有些物种的营养级可能和实际的营养级地位有细微差别。

4 结语

与传统食性分析方法相比,脂肪酸标记法能够更为准确的在物种水平上反映动物在一段时期内的摄食情况及其所处的营养级地位(Dalsgaard *et al.*, 2003; John *et al.*, 1996; Kirsch *et al.*, 1998)。本研究采用脂肪酸标记法对长江口邻近海域浮游动物食性进行了分析,生物体内脂肪酸组成特征较好地指示了实验生物的食性特征以及相对营养级地位,为长江口邻近海域浮游食物网研究提供了重要基础资料。当然,仅仅利用脂肪酸标记,对于定量地分析食物网不同

生物类群之间的营养关系尚存在一定的缺陷。今后与稳定同位素比值分析法等方法相结合(Lau *et al.*, 2009; Leduc *et al.*, 2009; Petursdottir *et al.*, 2008; Van den Meersche *et al.*, 2009),对于海洋生态系统营养结构的进一步研究将提供重要的支撑。

参 考 文 献

- 王 丹, 孙 军, 周 锋等, 2008. 2006 年 6 月长江口低氧区及邻近水域浮游植物. 海洋与湖沼, 39(6): 619—627
- 吕淑果, 韩博平, 孙 松等, 2009. 藻华发生过程中胶州湾水体颗粒有机物脂肪酸的组成与动态. 生态学报, 5: 2391—2399
- 刘 青, 曲 晗, 张 硕等, 2006. 强壮箭虫摄食生态的实验研究. 水产学报, 30(6): 767—772
- 李忠义, 左 涛, 戴芳群等, 2009. 长江口及南黄海海域春季生物摄食生态的稳定同位素研究. 水产学报, 33(5): 784—789
- 李春颖, 仇雪梅, 2008. 海洋微藻脂肪酸组成的研究进展. 生物技术通报, 4: 63—65
- 李振华, 蒋日进, 徐开达等, 2010. 东海中北部小眼绿鳍鱼的摄食习性分析. 福建水产, 125: 33—37
- 李荷芳, 周汉秋, 1999. 海洋微藻脂肪酸组成的比较研究. 海洋与湖沼, 30(1): 34—40
- 杨纪明, 李 军, 1995. 渤海强壮箭虫摄食的初步研究. 海洋科学, 6: 38—42
- 陈丽华, 陈 钢, 李少菁等, 2003. 厦门港球型侧腕水母 (*Pleurobrachia globosa*)的摄食研究. 厦门大学学报(自然科学版), 42(2): 228—232
- 林龙山, 2007. 长江口近海小黄鱼食性及营养级分析. 海洋渔业, 29(1): 44—48
- 孟田湘, 2003. 黄海中南部鳀鱼各发育阶段对浮游动物的摄食. 海洋水产研究, 24(3): 1—9
- Atkinson A, Snyder R, 1997. Krill-copepod interactions at South Georgia, Antarctica, I. Omnivory by *Euphausia superba*. Marine Ecology-Progress Series, 160: 63—76
- Arai M N, 1997. A Functional Biology of Scyphozoa. Chapman & Hall, London, 1—316
- Budge S M, Parrish C C, 1998. Lipid biogeochemistry of plankton, settling matter and sediments in Trinity Bay, Newfoundland. II. Fatty acids. Organic Geochemistry, 29: 1547—1559
- Budge S M, Parrish C C, Mckenzie C H, 2001. Fatty acid composition of phytoplankton, settling particulate matter and sediments at a sheltered bivalve aquaculture site. Marine Chemistry, 76: 285—303
- Claustre H, Marty J C, Cassiani L *et al.*, 1988/1989. Fatty acid dynamics in phytoplankton and microzooplankton communities during a spring bloom in the coastal Ligurian Sea: ecological implications. Marine Microbial Food Webs, 3(2): 51—66
- Dalley D D, McClatchie S, 1989. Functional feeding morphology

- of the euphausiid *nyctiphanes-australis*. *Marine Biology*, 101(2): 195—203
- Dalsgaard J, St John M, Kattner G *et al*, 2003. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment. *Advances in Marine Biology*, 46: 225—340
- Falk-Petersen S, Sargent J R, Tande K S, 1987. Lipid composition of zooplankton in relation to the sub-Arctic food web. *Polar Biology*, 8: 115—120
- Fraser A J, Sargent J R, 1989. Formation and transfer of fatty acids in an enclosed marine food chain comprising phytoplankton, zooplankton and herring (*Clupea harengus* L.) larvae. *Marine Chemistry*, 27: 1—18
- Goulden C E, Plaeae A R, 1990. Fatty acid synthesis and accumulation rates in daphnids. *J Exp Zool*, 256: 168—178
- Kainz M, Arts MT, Mazumder A, 2004. Essential fatty acids in the planktonic food web and their ecological role for higher trophic levels. *Limnology and Oceanography*, 49(5): 1784—1793
- Kattner G, Gercken G, Eberlein K, 1983. Development of lipids during a spring plankton bloom in the northern North Sea. Particulate fatty acids. *Marine Chemistry*, 14: 149—162
- Kattner G, Fricke H S G, 1986. Simple gas-liquid-chromatographic method for the simultaneous determination of fatty-acids and alcohols in wax esters of marine organisms. *Journal of Chromatography*, 361: 263—268
- Kirsch P E, Iverson S J, Don Bowen W *et al*, 1998. Dietary effects on the fatty acid signature of whole Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55: 1378—1386
- Lau D C P, Leung K M Y, Dudgeon D, 2009. Are autochthonous foods more important than allochthonous resources to benthic consumers in tropical headwater streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 28(2): 426—439
- Leduc D, Probert P K, 2009. The effect of bacterivorous nematodes on detritus incorporation by macrofaunal detritivores: A study using stable isotope and fatty acid analyses. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 371(2): 130—139
- Mills C E, 1995. Medusae, siphonophores and ctenophores as planktivorous predators in changing global ecosystems. *ICES J mar Sci*, 52: 575—581
- Napolitano G E, 1999. Fatty acids as trophic and chemical markers in freshwater ecosystem. In Arts MT & BC Wainman (Eds). *Lipids in freshwater ecosystem*, Springer-Verlag, New York, 1—319
- Parrish C C, 1999. Determination of total lipid, lipid classes, and fatty acids in aquatic samples. Arts MT, Wainman BC. *Lipids in Freshwater Ecosystems* (C). New York: Springer-Verlag, 5—20
- Perissinotto R, Pakhomov E A, McQuaid C D *et al*, 1997. In situ grazing rates and daily ration of Antarctic krill *Euphausia superba* feeding on phytoplankton at the Antarctic Polar Front and the Marginal Ice Zone. *Marine Ecology-Progress Series*, 160: 77—91
- Petursdottir H, Gislason A, Falk-Petersen S *et al*, 2008. Trophic interactions of the pelagic ecosystem over the Reykjanes Ridge as evaluated by fatty acid and stable isotope analyses. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 55(1—2): 83—93
- Purcell J E, 1981. Dietary composition and diel feeding patterns of epipelagic siphonophores. *Mar Biol*, 65: 83—90
- Purcell J E, 1988. Quantification of *Mnemiopsis leidyi* (*Ctenophora*, *Lobata*) from formalin-preserved plankton samples. *Marine Ecology Progress Series*, 45: 197—200
- Purcell J E, 1997. Pelagic cnidarians and ctenophores as predators: Selective predation, feeding rates and effects on prey populations. *Ann Inst Oceanogr Paris*, 73: 125—137
- Purcell J E, Arai M N, 2001. Interactions of pelagic cnidarians and ctenophores with fish: a review. *Hydrobiologia*, 451(1—3): 27—44
- Spector A A, 1999. Essentiality of fatty acids. *Lipids*, 34(supplement): S1—S3
- John St MA, Lund T, 1996. Lipid biomarkers: linking the utilization of frontal plankton biomass to enhanced condition of juvenile North Sea cod. *Marine Ecology Progress Series*, 131: 75—85
- Sterner R W, Schulz K, 1998. Zooplankton nutrition: recent progress and a reality check. *Aquatic Ecology*, 32: 261—279
- Tonnesson K, Tiselius P, 2005. Diet of the chaetognaths *Sagitta setosa* and *S. elegans* in relation to prey abundance and vertical distribution. *Marine Ecology-Progress Series*, 289: 177—190
- Van den Meersche, Van Rijswijk K P, Soetaert K *et al*, 2009. Autochthonous and allochthonous contributions to mesozooplankton diet in a tidal river and estuary: Integrating carbon isotope and fatty acid constraints. *Limnology and Oceanography*, 54(1): 62—74
- Volkman J K, Barrett S M, Blackburn S I *et al*, 1998. Microalgal biomarkers: a review of recent research developments. *Organic Geochemistry*, 29: 1163—1179

THE DIET OF THE COMMON ZOOPLANKTON SPECIES IN CHANGJIANG ESTUARY ADJACENT SEA REVEALED BY FATTY ACID ANALYSIS

JIN Xin^{1,2}, LI Chao-Lun^{1,3}, SUN Song^{1,3}, LIU Meng-Tan^{1,3}

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049; 3. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Qingdao, 266071)

Abstract Fatty acids can be used as markers of food composition. Fatty acid compositions were used to identify the diet of 6 common zooplankton species in Changjiang River Estuary adjacent sea, which included one copepod (*Calanus sinicus*), one krill (*Euphausia* spp.), one chaetognath (*Sagitta* spp.) and three medusae (*Ocyropsis crystalline*, *Bero cucumis*, *Liriope tetraphylla*). The copepod, *C. sinicus* manifested a typical herbivorous feeding. Females had a higher content of 16:1 ω 7 than 18:4 ω 3, indicating feeding more on diatoms. Copepodites fed more on dinoflagellates in view of the fatty acid 18:4 ω 3. *Sagitta* had high contents of 20:1+22:1, reflecting a feeding on herbivorous copepod. The higher 22:6 ω 3/20:5 ω 3 contents also indicated that *Sagitta* located at relatively high trophic level among studying animals. *Euphausia* had high contents of PUFA and $\Sigma\omega$ 3 which reflecting their higher lipid nutritional values. In addition, it had low 22:6 ω 3/20:5 ω 3, indicating lower trophic level in the food web. The total fatty acids of 3 medusae were low, but the higher contents of 20:1+22:1 reflected herbivorous copepods are parts of their food components. High 22:6 ω 3/20:5 ω 3 contents also indicated their higher trophic levels.

Key words Diet, Zooplankton, Fatty Acid, Waters adjacent to the Changjiang River Estuary