

秋季黄海中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)脂肪酸组成及其指示作用*

刘梦坛¹ 李超伦² 孙松^{1,2} 金鑫²

(1. 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 采用气相色谱法对秋季黄海颗粒悬浮物和中华哲水蚤的脂肪酸组成及其指示作用进行了研究。结果表明, 黄海表层海水中硅藻所占比例要大于甲藻。硅藻在黄海南部浮游植物中所占比重高于黄海北部, 甲藻在黄海南北部的差别不大。从脂肪酸组成来看, 中华哲水蚤雌体、雄体和桡足幼体都摄食硅藻和甲藻, 雌体和雄体摄食的硅藻远多于甲藻, 而桡足幼体摄食的甲藻则比雌体和雄体多。雄体和桡足幼体植食性的程度高于雌体, 而雌体则可能由于繁殖活动的需要, 还摄食了原生动物等其它一些营养丰富的食物。对冷水团内外中华哲水蚤脂肪酸组成研究发现, 桡足幼体比雌体积累了更多的脂肪酸以满足度夏过程中的能量需求和后期繁殖的需要。

关键词 中华哲水蚤; 黄海; 脂肪酸

中图分类号 Q958

脂肪酸是海洋生物体内重要的生物大分子, 对于海洋生物的能量储存、激素调节、个体发育(特别是幼体阶段的发育)、桡足类滞育的启动和终止以及浮游生物垂直移动等生理活动具有重要作用(Lee *et al.*, 2006)。此外, 脂肪酸还具有重要的生理特性, 一些脂肪酸由于结构的稳定性而具有相对的保守性, 在被摄食之后或被修饰之后仍然是可以被识别和标记的(Dalsgaard *et al.*, 2003)。因此, 可以以这些脂肪酸作为标记来研究捕食者对饵料的摄食。以脂肪酸作为标记对浮游动物摄食的研究起源于 20 世纪 70 年代(Lee *et al.*, 1971)。此后的大量研究也证明, 硅藻的特征脂肪酸 16:1 ω 7 和甲藻的特征脂肪酸 18:4 ω 3 可以分别用来指示浮游动物对硅藻和甲藻的摄食(Graeve *et al.*, 1994; 刘梦坛等, 2011)。20:1+22:1 不仅可以用作植食性桡足类的标记, 还可以用来指示上层捕食者对植食性桡足类的摄食(Sargent *et al.*, 1988; Kattner *et al.*, 1995)。此外, 20:5 ω 3 和 22:6 ω 3 等必需脂肪酸不仅

在生物体的发育、繁殖和激素调节等生理过程中发挥了重要的调节作用(Spector, 1999), 还能反映生物体的营养状况和生理活动(Persson *et al.*, 2006)。

中华哲水蚤是我国近海生态系统动力学研究的关键种之一(张芳等, 2001)。黄海中华哲水蚤在其生活史过程中的显著特征是度夏过程, 夏、秋季节黄海中华哲水蚤通过黄海冷水团的庇护得以度过高温(Wang *et al.*, 2003)。在度夏过程中, 中华哲水蚤种群 C5 期为主, 种群摄食率、代谢率、产卵率都很低, 整个种群呈现出休眠状态(Pu *et al.*, 2004a; Zhang *et al.*, 2007)。Liu 等(2011)对胶州湾中华哲水蚤雌体脂肪酸组成及其对摄食的指示作用进行了研究, 但关于中华哲水蚤雌体、雄体、桡足幼体脂肪酸组成差异及其与黄海冷水团相互关系的研究还未有报道。

本文通过分析 2007 年 9 月黄海颗粒悬浮物、中华哲水蚤雌体、雄体和桡足幼体的脂肪酸组成, 研究其脂肪酸组成差异及其对摄食和生理状况的指示作

* 国家自然科学基金重点项目, 41076099 号, 40776092 号; 国家重点基础研究发展计划(973 项目), 2011CB403604 号。刘梦坛, 博士, 助理研究员, E-mail: liumengt@163.com

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

收稿日期: 2012-04-24, 收修改稿日期: 2012-06-29

用,在此基础上分析了中华哲水蚤脂肪酸组成与黄海冷水团的关系。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2007 年 9 月乘“科学一号”科研考察船在黄海进行了 1 个航次的断面调查,采样站位如图 1 所示。温度资料通过 Sea Bird SBE9 型 CTD 获得。测定叶绿素的海水样品按标准层采集,海水经 $0.45\mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤后将滤膜置于 -20°C 保存。回到实验室后将滤膜置于 90% 丙酮水溶液中萃取 24h 后采用 Turner Design 荧光计(7200)测定 Chl *a* 的浓度。用于测定颗粒悬浮物脂肪酸组成的海水样品采自表层,经 GF/F 玻璃纤维滤膜(直径 150mm,孔径 $0.7\mu\text{m}$,经马弗炉 450°C 灼烧 4h)过滤后用锡箔纸将滤膜包好保存于液氮中。浮游动物采用大型浮游生物网(网口面积 0.5m^2 ,孔径 $500\mu\text{m}$)从底上 4 米拖网至表层获得。分别挑取中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)雌体、雄体和桡足幼体(主要为 C4—C5 期,下文同)过滤于 GF/C 滤膜(直径 47mm,孔径 $1.2\mu\text{m}$,经马弗炉 450°C 灼烧 4h)上,将滤膜装在冻存管中置于液氮中保存。

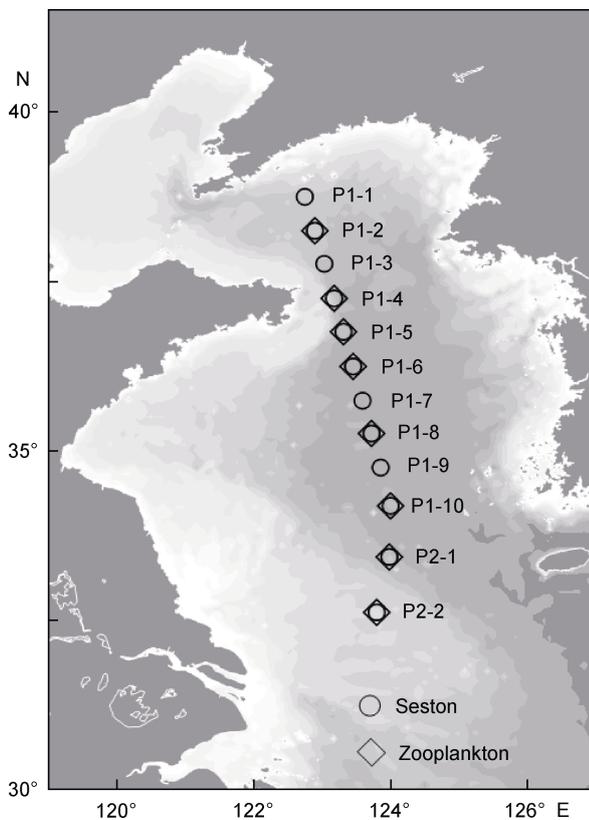


图 1 黄海采样站位图

Fig.1 Sampling stations in Yellow Sea

1.2 脂肪酸分析

将颗粒悬浮物样品和浮游动物样品经 48h 冷冻干燥,向样品中加入 19:0 脂肪酸甲酯作为内标,0.01% BHT (butylhydroxytoluene)甲醇溶液作为抗氧化剂。样品的处理过程采用改进的 Parrish(1999)和 Folch 等(1957)的方法。样品经过二氯甲烷:甲醇(体积比 2:1)提取总脂后用高纯氮气吹干,加入 1mL 0.5mol/L KOH 甲醇溶液后在高纯氮气的保护下于 80°C 水浴中皂化反应 2h。待样品冷却后再加入 1mL 13% BF₃ 甲醇溶液并在高纯氮气的保护下于 80°C 水浴中甲酯化反应 1h。脂肪酸甲酯经正己烷萃取后定容至 0.4mL,用 Agilent 7890A 型气相色谱仪分析测定脂肪酸的组成和含量测定。

具体的色谱条件如下:

毛细管色谱柱型号: DB-FFAP ($30\text{m} \times 0.25\text{mm} \times 0.25\mu\text{m}$);

进样口温度: 220°C ;

检测器温度: 280°C ;

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

甲醇、二氯甲烷和正己烷均为 Merck 公司生产的色谱纯。BF₃ 甲醇溶液、脂肪酸标准样品、BHT 均为 Sigma 公司生产。

1.3 数据处理

脂肪酸含量的计算采用内标标准曲线法计算绝对含量,然后再换算成百分比含量。脂肪酸百分比含量的数据在进行方差分析前先进行反正旋转换。以 16:1 ω 7、18:4 ω 3、20:5 ω 3、22:6 ω 3、20:1+22:1 等脂肪酸标记对中华哲水蚤雌体、雄体、桡足幼体进行主成分分析。

2 结果

2.1 温度与 Chl *a*

12 个站位温度的垂直分布如图 2 所示。P2-1 和 P2-2 与其它站位不在同一断面,在这里为了表述的方便,作图时将它们视为同一断面。从温度的垂直分布情况来看,该断面恰好穿过黄海冷水团所在区域。P1-1 和 P1-2 温跃层以下水温分别为 12.5°C 和 14.8°C 左右,从 P1-3 开始,温跃层以下水温降到了 9°C 以下。到 P2-1 站时,温跃层以下水温在 11°C 左右。P2-2 站海水表底层水温基本一致,表明该区域表底混合比较均匀。

12 个站位 Chl *a* 浓度的垂直分布情况如图 3 所

示。从整个海区来看,黄海南部的 Chl *a* 浓度要大于黄海北部。黄海南部的 Chl *a* 最大层都出现在 30—40m 的水层。靠近长江口的 P2-1 和 P2-2 的叶绿素浓度最大。

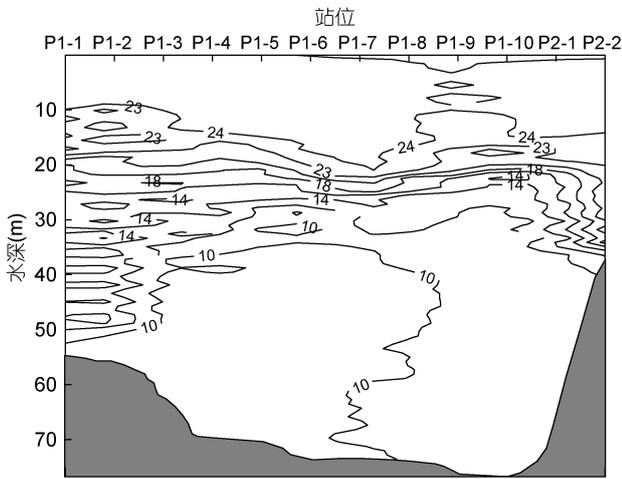


图2 温度垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of temperature

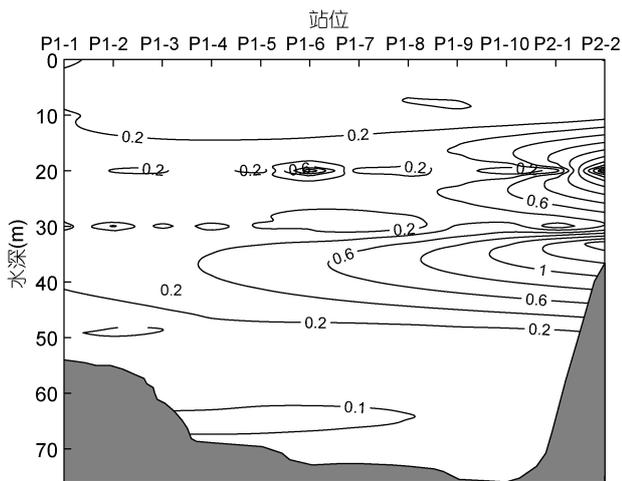


图3 Chl *a* 浓度的垂直分布(µg/L)

Fig.3 Vertical distribution of Chl *a* (µg/L)

2.2 颗粒悬浮物脂肪酸组成

14:0、16:0、18:0 是颗粒悬浮物脂肪酸的主要组分,这三种脂肪酸占总脂肪酸的 44.37%—62.46%。此外,16:1 ω 7、18:1 ω 9、18:2 ω 6、22:6 ω 3 等几种脂肪酸的含量也相对较高。

16:1 ω 7、18:4 ω 3、20:5 ω 3、22:6 ω 3、PUFA 和 ω 3 的绝对含量如图 4 所示。总的来看,16:1 ω 7、18:4 ω 3、20:5 ω 3、22:6 ω 3 四种脂肪酸表现出比较相似的变化趋势。16:1 ω 7 的含量明显高于 18:4 ω 3(图 4a),16:1 ω 7 从 P1-2 到 P2-2 表现出逐渐上升的趋势,在

P1-10 和 P2-2 分别达到了 1.94 和 1.85 μ g/L。22:6 ω 3 的含量也要高于 20:5 ω 3(图 4a)。相对于 20:5 ω 3,22:6 ω 3 的波动较大,在 P1-4、P1-10 和 P2-2 的含量分别达到了 0.63、0.82 和 0.94 μ g/L,但在 P1-8 和 P2-1 却分别只有 0.12 和 0.24 μ g/L。PUFA 和 ω 3 的变化趋势也很相似(图 4b),二者都在 P1-4、P1-10 和 P2-2 出现三个峰值,在 P1-8 和 P2-1 则都出现低值。

2.3 中华哲水蚤雌体、雄体、桡足幼体主成分分析

中华哲水蚤的主要脂肪酸组分为饱和脂肪酸 14:0、16:0,单不饱和脂肪酸 16:1 ω 7、18:1 ω 9、20:1 ω 9、22:1 ω 11 和多不饱和脂肪酸 20:5 ω 3、22:6 ω 3。这 8 种脂肪酸占中华哲水蚤总脂肪酸的 65%左右。

以 16:1 ω 7、18:4 ω 3、20:5 ω 3、22:6 ω 3、20:1+22:1、 ω 3、PUFA、MUFA 等 11 个脂肪酸标记对中华哲水蚤雌体、雄体和桡足幼体的脂肪酸组成进行主成分分析,结果见图 5。这 11 个脂肪酸标记转化为主成分 1(63.431%)和主成分 2(23.730%),解释了中华哲水蚤雌体、雄体和桡足幼体脂肪酸组成差异的 87.161%。从主成分分析图上可以看出,桡足幼体位于因子得

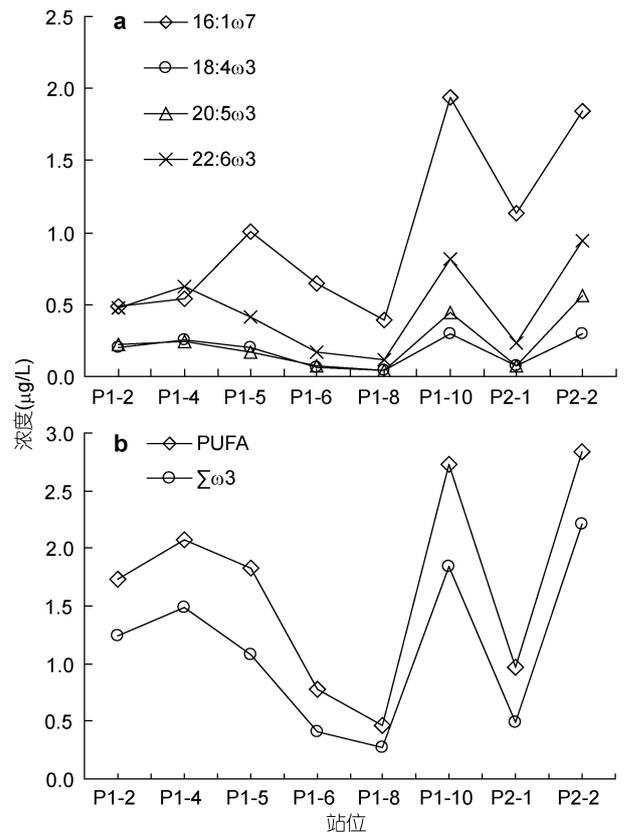


图4 颗粒悬浮物中几种特征脂肪酸的含量(µg/L)

Fig.4 Content of selected fatty acid markers in seston (µg/L)

注: PUFA 表示多不饱和脂肪酸

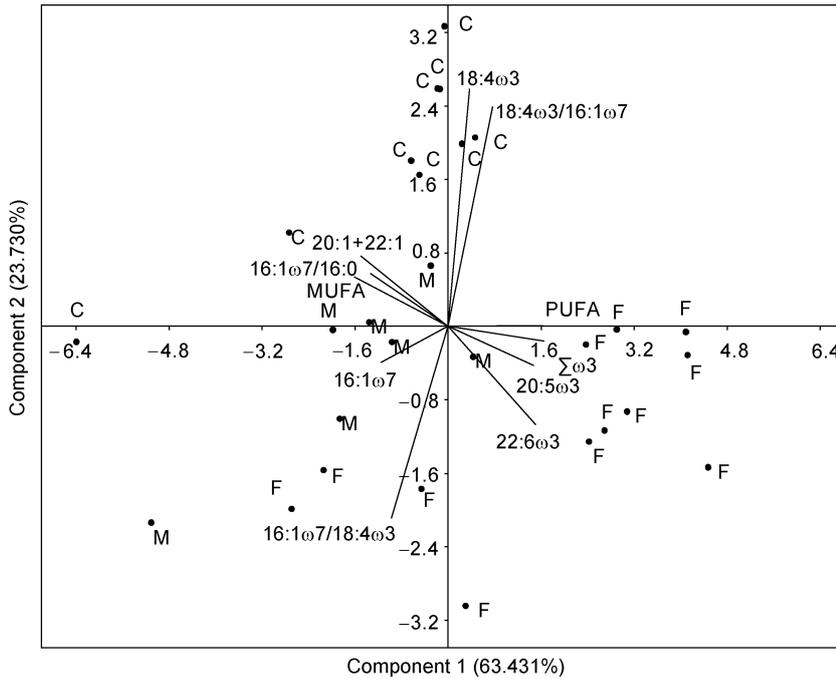


图5 中华哲水蚤雌体、雄体和桡足幼体脂肪酸组成主成分分析

Fig.5 PCA scatter diagrams of *C. sinicus* with fatty acid markers and female, male and copepodite

注: F 表示雌体, M 表示雄体, C 表示桡足幼体, MUFA 表示单不饱和脂肪酸、PUFA 表示多不饱和脂肪酸

分图的左上部, 雌体位于因子得分图的右下部, 而雄体则位于两者之间。桡足幼体的分布与雌体、雄体均没有交集, 雌体与雄体也基本能够分开, 说明三者的脂肪酸组成具有明显的差异。具体的来看, 雌体具有较高含量的 PUFA、EPA、DHA、 ω_3 和 16:1 ω_7 /18:4 ω_3 , 而桡足幼体则具有较高含量的 18:4 ω_3 、18:4 ω_3 /16:1 ω_7 、MUFA、20:1+22:1 和 16:1 ω_7 /16:0。

中华哲水蚤雌体、雄体、桡足幼体几个脂肪酸标记的含量如表 1 所示。统计分析发现, 雌体、雄体和桡足幼体 16:1 ω_7 的含量无明显差异。桡足幼体 18:4 ω_3 的含量显著高于雌体和雄体($P < 0.005$), 而雌体和雄体 18:4 ω_3 的含量没有明显的差异。雌体 20:5 ω_3 和 22:6 ω_3 的含量显著高于桡足幼体($P < 0.05$), 雄体和桡足幼体这两种脂肪酸的含量无显著差异。雌体 20:1+22:1、MUFA 的含量显低于雄体和桡足幼体($P < 0.05$), ω_3 、PUFA 的含量显著高于雄体和桡足幼体($P < 0.05$)。

2.4 黄海冷水团内外中华哲水蚤脂肪酸组成

根据温度的垂直分布图, P1-1 和 P1-2 底层水温分别高于 12.5 $^{\circ}\text{C}$ 和 14 $^{\circ}\text{C}$, 可能位于冷水团的边界位置, P2-2 表底层水温相差不大, 位于冷水团的外部。据此

将 P1-1、P1-2 和 P2-2 归为冷水团外站位, 将其余的站位归为冷水团内站位。冷水团内外中华哲水蚤主要脂肪酸标记的含量如表 2 所示。

中华哲水蚤雄体冷水团外仅有一个样品, 在这里不做比较。对冷水团内外雌体和桡足幼体的脂肪酸含量进行统计分析, 结果表明冷水团内雌体的总脂肪酸含量显著高于冷水团外的雌体($P < 0.05$), 而雌体其余几个脂肪酸标记在冷水团内外含量无显著差异。冷水团内外桡足幼体 16:1 ω_7 和 18:4 ω_3 的含量无显著差异, 冷水团内桡足幼体 20:1+22:1 的含量显著高于冷水团外的桡足幼体($P < 0.05$), 而冷水团内桡足幼体 20:5 ω_3 、22:6 ω_3 、MUFA、PUFA、 ω_3 和 TFA 均极显著高于冷水团外的桡足幼体($P < 0.01$)。

表 1 中华哲水蚤雌体、雄体、桡足幼体脂肪酸含量(%)
Tab.1 *C. sinicus*. Fatty acid content of female, male and copepodite (%)

脂肪酸	雌体(n=12)	雄体(n=7)	桡足幼体(n=9)
16:1 ω_7	6.06 \pm 2.85	7.16 \pm 1.47	7.17 \pm 1.26
18:4 ω_3	1.76 \pm 0.88	1.79 \pm 0.79	5.25 \pm 1.97
20:5 ω_3	12.55 \pm 2.02	10.59 \pm 2.04	9.79 \pm 1.96
22:6 ω_3	25.91 \pm 4.61	16.57 \pm 2.73	14.51 \pm 3.08
20:1+22:1	8.15 \pm 6.34	19.51 \pm 4.98	18.77 \pm 6.32
ω_3	42.41 \pm 6.84	31.79 \pm 5.20	32.78 \pm 6.98
MUFA	20.62 \pm 7.36	33.19 \pm 5.01	32.65 \pm 6.88
PUFA	46.22 \pm 7.01	35.56 \pm 6.13	37.64 \pm 7.26

注: MUFA 表示单不饱和脂肪酸, PUFA 表示多不饱和脂肪酸

3 讨论

3.1 颗粒悬浮物的脂肪酸组成

一个海区生态系统的脂肪酸组成特征是由该海区的浮游植物组成决定的(Jeffries, 1970)。浮游植物各个门类有其特征性的脂肪酸组成, 纯培养的硅藻 14:0、16:0、16:1 ω_7 、20:5 ω_3 的含量较高, 而甲藻则 16:0、18:4 ω_3 、18:5 ω_3 、22:6 ω_3 的含量较高(刘梦坛等, 2010)。与浮游植物的脂肪酸组成相比, 本研究

表 2 冷水团内外中华哲水蚤主要脂肪酸标记含量($\mu\text{g}/\text{ind}$)
Tab.2 Content of selected fatty acid markers in *C. sinicus* in/out of Yellow Sea Cold Bottem Water ($\mu\text{g}/\text{ind}$)

脂肪酸	雌体		雄体		桡足幼体	
	冷水团内($n=9$)	冷水团外($n=3$)	冷水团内($n=6$)	冷水团外($n=1$)	冷水团内($n=7$)	冷水团外($n=2$)
16:1 ω 7	0.6 \pm 0.22	0.53 \pm 0.25	0.73 \pm 0.19	1.14	1.6 \pm 0.39	0.98 \pm 0.26
18:4 ω 3	0.21 \pm 0.13	0.11 \pm 0.05	0.18 \pm 0.09	0.28	1.12 \pm 0.47	0.74 \pm 0.07
20:5 ω 3	1.29 \pm 0.35	1.09 \pm 0.14	1.11 \pm 0.14	1.24	2.1 \pm 0.4	1.4 \pm 0.09
22:6 ω 3	2.71 \pm 0.74	2.2 \pm 0.75	1.78 \pm 0.24	1.69	3.18 \pm 0.7	1.93 \pm 0.1
20:1+22:1	0.99 \pm 0.71	0.3 \pm 0.16	2.2 \pm 0.88	1.83	4.56 \pm 1.82	1.84 \pm 0.16
MUFA	2.32 \pm 0.83	1.24 \pm 0.22	3.64 \pm 1.11	3.68	7.67 \pm 2.2	3.65 \pm 0.42
PUFA	4.84 \pm 1.36	3.87 \pm 0.87	3.75 \pm 0.55	4.06	8.16 \pm 1.52	5.2 \pm 0.39
ω 3	4.44 \pm 1.26	3.57 \pm 0.92	3.37 \pm 0.44	3.56	7.11 \pm 1.51	4.5 \pm 0.28
TFA	10.63 \pm 1.61	7.78 \pm 1.48	10.71 \pm 1.59	11.61	22.47 \pm 1.48	12.72 \pm 1.13

注: MUFA 表示单不饱和脂肪酸, PUFA 表示多不饱和脂肪酸, TFA 表示总脂肪酸

颗粒悬浮物 14:0、16:0 和 18:0 的含量均较高, ω 3、PUFA 的含量则较低, 表现出不同于浮游植物的脂肪酸组成特征, 这与 Kattner 等(1983)的研究结果一致。这可能是因为自然海区颗粒悬浮物组成比较复杂, 不仅包括浮游植物, 还包括原生动物、有机碎屑等其它一些有机物质(Dalsgaard *et al*, 2003)。

硅藻和甲藻的特征脂肪酸 16:1 ω 7 和 18:4 ω 3 可以作为标记用于指示颗粒悬浮物中的硅藻和甲藻组分(Kattner *et al*, 1983; Dalsgaard *et al*, 2003)。本研究中 16:1 ω 7 的含量明显高于 18:4 ω 3, 说明黄海表层海水浮游植物中硅藻所占比例要大于甲藻。从空间上来看, 表层海水中硅藻在黄海南部浮游植物中所占比例要高于黄海北部, 甲藻在黄海南北部的差别不大。从 PUFA 和 ω 3 的含量变化趋势可以看出, 二者与 16:1 ω 7 和 18:4 ω 3 的变化相似, 说明浮游植物对颗粒悬浮物 PUFA 和 ω 3 的贡献较大。以 PUFA 和 ω 3 作为衡量食物营养质量的指标(Kainz *et al*, 2004), 说明浮游植物的大量增殖能有效提高颗粒悬浮物的营养质量。

3.2 中华哲水蚤雌体、雄体、桡足幼体脂肪酸组成差异及其指示作用

海洋中捕食者体内大部分的脂肪酸都是通过摄食从食物中获得的, 因此可以通过捕食者脂类中的食物脂肪酸信息来反应捕食者在较长一段时间内的摄食情况(St John *et al*, 1996)。对中华哲水蚤雌体、雄体和桡足幼体的主成分分析可以看出三者的脂肪酸组成存在差异。这种差异一方面是因为桡足类在发育过程的不同阶段摄食活动存在差异(Sargent *et al*, 1988), 另一方面则可能是因为代谢活动的差异导致

不同的脂肪酸具有不同的代谢效率(Lee *et al*, 1974)。传统的摄食研究方法认为, 中华哲水蚤主要摄食浮游植物, 此外还会摄食有机碎屑、原生动物以及其它一些有机颗粒物(Zhang *et al*, 2006)。从脂肪酸组成来看, 雌体、雄体和桡足幼体对甲藻和硅藻的摄食偏好不尽相同。雌体和雄体 16:1 ω 7 的含量显著高于 18:4 ω 3, 说明二者摄食的硅藻远远多于甲藻, 这与杨纪明(1997, 1998)通过肠道内含物分析的结果一致。桡足幼体 16:1 ω 7 的含量和雌体、雄体相差不大, 但其 18:4 ω 3 的含量显著高于雌体和雄体, 说明桡足幼体对甲藻的摄食要多于雌体和雄体。这一方面可能是因为中华哲水蚤不同发育阶段的营养需求不同(Lee *et al*, 2006), 另一方面可能是因为部分甲藻粒径较小, 更适合桡足幼体摄食。

20:1 和 22:1 是植食性桡足类的特征性脂肪酸(Parrish, 1999), 植食性桡足类能通过特有的途径将 18:1 和 20:1 通过碳链延长合成 20:1 和 22:1 (Parrish, 1999; Dalsgaard *et al*, 2003)。近年来越来越多的研究表明, 中华哲水蚤除了摄食浮游植物, 还会摄食原生动物、有机碎屑等其它一些有机颗粒物(Zhang *et al*, 2006)。从 20:1 + 22:1 的含量来看, 雄体和桡足幼体植食性的程度似乎要高于雌体, 而雌体则可能由于繁殖活动的需要, 还会摄入原生动物等一些营养更丰富的食物(Sargent *et al*, 1988; Lee *et al*, 2006)。

20:5 ω 3 和 22:6 ω 3 是许多生物的必需脂肪酸, 对于雌性性腺的发育、卵的形成及发育等繁殖活动密切相关(Lee *et al*, 2006)。本研究中 20:5 ω 3 和 22:6 ω 3 占中华哲水蚤雌体总脂肪酸的 38.5%左右, 占雄体和桡足幼体总脂肪酸的比例只有 27%和 24%。雌体和雄

体、桡足幼体这两种脂肪酸组成的差异可能是因为相对于雄体和桡足幼体, 雌体的繁殖活动不仅需要大量的脂类物质作为能量来源, 还需要有一部分脂类物质则直接储存于卵中, 用于无节幼体和桡足幼体开口摄食之前的发育(Sargent *et al*, 1988; Lee *et al*, 2006)。

3.3 黄海冷水团对中华哲水蚤脂肪酸组成的影响

夏、秋季节, 黄海中华哲水蚤通过黄海冷水团的庇护得以度过高温(Wang *et al*, 2003)。在黄海冷水团内部, 种群代谢率、摄食率、蜕皮率、产卵率都很低, 整个种群呈现出休眠状态(Pu *et al*, 2004a; Zhang *et al*, 2007)。由于冷水团内部饵料浓度很低, 中华哲水蚤低的摄食率难以维持其代谢率(Pu *et al*, 2004b), 在这种情况下, 中华哲水蚤的油脂积累可能是 C5 期主要的能量来源(孙松等, 2011)。本研究中虽然冷水团内外雌体的几个特征脂肪酸含量差别不大, 但这几种脂肪酸在冷水团内雌体体内的含量都大于冷水团外的雌体。冷水团内雌体的总脂肪酸则显著大于冷水团外的雌体。说明夏、秋季节中华哲水蚤雌体也需要积累脂类物质以应对冷水团内饵料稀少的环境。研究中冷水团内桡足幼体几种脂肪酸的含量均高于冷水团外的桡足幼体, 其中 20:5 ω 3、22:6 ω 3、MUFA、PUFA、 ω 3 和 TFA 几种脂肪酸的含量均极显著高于冷水团外。另外, 虽然 C5 期个体较雌体小, 但几种脂肪酸特别是总脂肪酸的含量均极显著高于雌体的含量。由于 C5 期是中华哲水蚤休眠度夏的主要群体(Pu *et al*, 2004a), 桡足幼体高含量的脂肪酸显然更有利于更长时间的应对冷水团中饵料稀少的环境和满足度夏过程中的能量需求。随着冷水团的发育, 桡足幼体体内的脂肪酸逐渐被代谢消耗, 当冷水团消退时, 桡足幼体逐渐发育为成熟的个体, 中华哲水蚤种群得以延续。

综上所述, 脂肪酸不仅是海洋生物体重要的结构成分, 还对生物体的生长、繁殖、代谢、发育等生理活动至关重要。本文以脂肪酸作为标记, 对中华哲水蚤雌体、雄体和桡足幼体的研究表明, 雄体和桡足幼体可能具有更专一的植食性特征, 雌体体内的脂肪酸组成则可能与其繁殖活动相关。另外, 脂肪酸可能是中华哲水蚤特别是桡足幼体度夏过程中非常重要的能量来源。

参 考 文 献

刘梦坛, 李超伦, 孙 松, 2010. 两种甲藻和两种硅藻脂肪酸组成的比较研究. 海洋科学, 34(10): 77—82

- 刘梦坛, 李超伦, 孙 松, 2011. 脂肪酸对中华哲水蚤摄食两种海洋微藻的指示作用. 生态学报, 31(4): 0933—0942
- 孙 松, 王世伟, 李超伦, 2011. 黄海中华哲水蚤 C5 发育期油脂积累初步研究. 海洋与湖沼, 42(2): 165—169
- 杨纪明, 1997. 渤海中华哲水蚤摄食的初步研究. 海洋与湖沼, 28(4): 376—382
- 杨纪明, 1998. 渤海中华哲水蚤桡足幼体摄食的初步研究. 海洋水产研究, 19(2): 1—4
- 张 芳, 孙 松, 2001. 中华哲水蚤生态学研究进展. 海洋科学, 25(11): 16—19
- Dalsgaard J, St John M, Kattner G *et al*, 2003. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment. *Adv Mar Biol*, 46: 225—340
- Folch J, Lees M, Sloane Stanley G H, 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J Bio Chem*, 226(1): 497—509
- Graeve M, Kattner G, Hagen W, 1994. Diet-induced changes in the fatty-acid composition of Arctic herbivorous copepods-experimental-evidence of trophic markers. *J Exp Mar Biol Ecol*, 182(1): 97—110
- Jeffries H P, 1970. Seasonal composition of temperate plankton communities: Fatty acids. *Limnol Oceanogr*, 15: 419—426
- Kainz M, Arts M T, Mazumder A, 2004. Essential fatty acids in the planktonic food web and their ecological role for higher trophic levels. *Limnol Oceanogr*, 49(5): 1784—1793
- Kattner G, Gercken G, Eberlein K, 1983. Development of lipids during a spring plankton bloom in the northern North Sea: I. Particulate fatty acids. *Mar Chem*, 14(2): 149—162
- Kattner G, Hagen W, 1995. Polar herbivorous copepods-different pathways in lipid biosynthesis. *ICES J Mar Sci*, 52(3—4): 329—335
- Lee R F, Hagen W, Kattner G, 2006. Lipid storage in marine zooplankton. *Mar Ecol-Prog Ser*, 307: 273—306
- Lee R F, Nevenzel J C, Lewis A G, 1974. Lipid changes during life cycle of marine copepod, *Euchaeta japonica marukawa*. *Lipids*, 9(11): 891—898
- Lee R F, Nevenzel J C, Paffenhofer G A, 1971. Importance of wax esters and other lipids in the marine food chain: phytoplankton and copepods. *Mar Biol*, 9: 99—108
- Liu M T, Li C L, Sun S, 2011. Seasonal variation in fatty acid composition of seston and the copepod *Calanus sinicus* (Brotsky, 1962) in Jiaozhou Bay and its trophic implications. *Chin J Oceanol Limnol*, 29(6): 1164—1173
- Parrish C C, 1999. Determination of total lipid, lipid classes and fatty acids in aquatic samples. *Lipids in Freshwater Ecosystem*. M T Arts, Wainman B C. New York, Springer-Verlag: 4—20
- Persson J, Vrede T, 2006. Polyunsaturated fatty acids in zooplankton: variation due to taxonomy and trophic position. *Freshw Biol*, 51(5): 887—900
- Pu X M, Sun S, Yang B *et al*, 2004a. Life history strategies of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. *J*

- Plankton Res, 26(9): 1059—1068
- Pu X M, Sun S, Yang B *et al*, 2004b. The combined effects of temperature and food supply on *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. J Plankton Res, 26(9): 1049—1057
- Sargent J R, Falkpetersen S, 1988. The lipid biochemistry of calanoid copepods. Hydrobiologia, 167: 101—114
- Spector A A, 1999. Essentiality of fatty acids. Lipids, 34: S1—S3
- St John M A, Lund T, 1996. Lipid biomarkers: Linking the utilization of frontal plankton biomass to enhanced condition of juvenile North Sea cod. Mar Ecol-Prog Ser, 131(1—3): 75—85
- Wang R, Zuo T, Wang K, 2003. The Yellow Sea Cold Bottom Water—an overwintering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea). J Plankton Res, 25(2): 169—183
- Zhang G T, Li C L, Sun S *et al*, 2006. Feeding habit of *Calanus sinicus* (Crustacea: Copepoda) during spring and autumn in the Bohai Sea studied with herbivore index. Sci Mar, 70(3): 381—388
- Zhang G T, Sun S, Yang B, 2007. Summer reproduction of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Yellow Sea: influences of high surface temperature. J Plankton Res, 29(2): 179—186

FATTY ACID COMPOSITION OF *CALANUS SINICUS* IN AUTUMN IN YELLOW SEA AND ITS IMPLICATIONS

LIU Meng-Tan¹, LI Chao-Lun², SUN Song^{1,2}, JIN Xin²

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

Abstract The fatty acid composition in seston and *Calanus sinicus* were studied in autumn in Yellow Sea. The results showed that diatoms occupied a larger part in phytoplankton in the surface layer in Yellow Sea. Compared to the northern part, diatoms were more concentrated in the southern Yellow Sea. Diatom accounted for a major part in the diet of *C. sinicus* according to the fatty acid compositions. Copepodite showed a preferential feeding on dinoflagellates compared to female and male. With 20:1 + 22:1 as a herbivorous marker, female seemed to be less herbivorous than male and copepodite. We inferred that female may have a wider range of food particles including some animal baits such as protozoan and other organic detritus which is more nutritious. The fatty acid compositions of *C. sinicus* in and out of Yellow Sea Cold Bottom Water (YSCBW) were analyzed. The content of fatty acid in copepodite was significantly higher than in female. The large bodies of fatty acid might be the most important energy source for copepodite in overwintering and may also benefit the development from copepodite to adult along with the recession of YSCBW.

Key words *Calanus sinicus*; Yellow Sea; Fatty acid