

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 4 期
Vol.31 No.4
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 4 期 2011 年 2 月 (半月刊)

目 次

短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响	李 娜,王根绪,杨 燕,等 (895)
三峡库区 9 种植物种子萌发特性及其在植被恢复中的意义	陶 敏,鲍大川,江明喜 (906)
白蜡虫及其 3 种优势寄生蜂的时空生态位	王自力,陈 勇,陈晓鸣,等 (914)
宁夏盐池荒漠草原步甲物种多样性	贺 奇,王新谱,杨贵军 (923)
脂肪酸对中华哲水蚤摄食两种海洋微藻的指示作用	刘梦坛,李超伦,孙 松 (933)
安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征	徐小雨,周立志,朱文中,等 (943)
乐清湾潮间带大型底栖动物群落分布格局及其对人类活动的响应	彭 欣,谢起浪,陈少波,等 (954)
海蜇养殖对池塘底泥营养盐和大型底栖动物群落结构的影响	冯建祥,董双林,高勤峰,等 (964)
竹巴笼矮岩羊 (<i>Pseudois schaeferi</i>) 昼间行为节律和时间分配	刘国库,周材权,杨志松,等 (972)
干热河谷植物叶片,树高和种子功能性状比较	郑志兴,孙振华,张志明,等 (982)
石羊河中游沙漠化逆转过程土壤种子库的动态变化	马全林,张德魁,刘有军,等 (989)
基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟	汪少华,张茂震,赵平安,等 (998)
山地视觉景观的 GIS 评价——以广东南昆山国家森林公园为例	裘亦书,高 峻,詹起林 (1009)
基于功能分类的城市湿地公园景观格局——以西溪湿地公园为例	李玉凤,刘红玉,郑 因,等 (1021)
水分胁迫下丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响	贺学礼,高 露,赵丽莉 (1029)
农田灌溉对印度区域气候的影响模拟	毛慧琴,延晓冬,熊 喆,等 (1038)
高大气 CO ₂ 浓度下小麦旗叶光合能量利用对氮素和光强的响应	张绪成,于显枫,马一凡,等 (1046)
豌豆过氧化氢酶在烟草叶绿体中的过量表达提高了植物的抗逆性	王凤德,衣艳君,王海庆,等 (1058)
不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价	王树刚,王振林,王 平,等 (1064)
基于遥感与模型耦合的冬小麦生长预测	黄 彦,朱 艳,王 航,等 (1073)
喷施 ABA 对两个穗型不同小麦穗颈节伤流、穗部性状及产量的影响	崔志青,尹燕枰,田奇卓,等 (1085)
“稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环	张 帆,隋 鹏,陈源泉,等 (1093)
红壤丘陵区粮食生产的生态成本	李 晓,谢永生,张应龙,等 (1101)
甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策	梁天刚,冯琦胜,夏文韬,等 (1111)
黄龙钙化滩流地物种-面积关系	黄宝强,罗毅波,安德军,等 (1124)
杉木人工林细根寿命的影响因素	凌 华,袁一丁,杨智杰,等 (1130)
长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律	巨文珍,王新杰,孙玉军 (1139)
生物肥与甲壳素和恶霉灵配施对香蕉枯萎病的防治效果	张志红,彭桂香,李华兴,等 (1149)
北京城区不同水质水体可培养细菌数量的季节动态变化	高 程,黄满荣,陶 爽,等 (1157)
专论与综述	
整树水力导度协同冠层气孔导度调节森林蒸腾	赵 平 (1164)
植物寄生对生态系统结构和功能的影响	李钧敏,董 鸣 (1174)
加拿大一枝黄花的入侵机理研究进展	杨如意,答树婷,唐建军,等 (1185)

脂肪酸对中华哲水蚤摄食两种海洋微藻的指示作用

刘梦坛^{1,2}, 李超伦^{1,3,*}, 孙松^{1,3}

(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. 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)

摘要: 在室内以饥饿培养为对照, 以海洋原甲藻 (*Prorocentrum micans*) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 培养中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*), 研究了各脂肪酸标记对中华哲水蚤摄食不同饵料的指示作用。结果显示, 海洋原甲藻中 18:4 ω 3、22:6 ω 3 含量较高, 中肋骨条藻中 16:1 ω 7、20:5 ω 3 的含量较高。二者分别表现出典型的甲藻门和硅藻门的脂肪酸组成特征。中华哲水蚤的脂肪酸组成有两个特点: (1) 20:5 ω 3 和 22:6 ω 3 的含量均较高; (2) 其体内表征桡足类浮游植物食性、由桡足类自身合成的 20:1 和 22:1 脂肪酸占有相当的比例。虽然中华哲水蚤对不同脂肪酸的吸收和转化效率不同, 但以脂肪酸作为标记还是成功的指示了中华哲水蚤对微藻的摄食。在饥饿培养中, 首先消耗的是那些浮游动物自身不能合成的多不饱和脂肪酸, 而结构脂肪酸都表现出了较高的保守性。结合各脂肪酸标记变化趋势和 Pearson 相关性分析的结果认为, 18:4 ω 3、18:4 ω 3/16:1 ω 7、 Σ 18/ Σ 16 能较好的指示中华哲水蚤对海洋原甲藻的摄食, 仅 16:1 ω 7/18:4 ω 3 能指示中华哲水蚤对中肋骨条藻的摄食。

关键词: 中华哲水蚤; 海洋原甲藻; 中肋骨条藻; 脂肪酸; 标记

Identification of trophic relationships between marine algae and the copepod *Calanus sinicus* in a fatty acid approach

LIU Mengtan^{1,2}, LI Chaolun^{1,3,*}, SUN Song^{1,3}

1 Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Jiaozhou Bay Ecosystem Research Station, Qingdao 266071, China

Abstract: The concept of fatty acid trophic marker is based on the fact that the fatty acids of primary producers may be transferred conservatively to, and can be identified in, primary consumers. Recently, fatty acid markers have been widely used to trace or confirm predator-prey relationships so as to illustrate the key trophic linkages in the marine ecosystem. To verify the validity of fatty acid as markers in the trophic relationships between marine algae and the copepod *Calanus sinicus*, feeding experiment was carried out with this dominant herbivorous copepod from Jiaozhou Bay. During the experiment, *Prorocentrum micans* and *Skeletonema costatum* were offered as diets, and starvation was preceded as control. The fatty acid compositions of both the algae and the copepods before and after the experiment were analyzed. Over all, *P. micans* and *S. costatum* exhibited different fatty acid patterns. *P. micans* was characteristic of 18:4 ω 3 and 22:6 ω 3, indicating a typical feature of dinoflagellate. *S. costatum* was characterized by high amounts of 16:1 ω 7 and 20:5 ω 3, suggesting a systematic status in Bacillariophyceae. Additional, *P. micans* was found to be much more abundant in the content of total fatty acid than *S. costatum*. The fatty acid composition of *C. sinicus* was significantly different from the two algae. Firstly, *C. sinicus* was rich in both 20:5 ω 3 and 22:6 ω 3, while only one of them was found in large amount in *P. micans* and *S. costatum*. Secondly, 20:1 and 22:1 were identified in *C. sinicus*, demonstrating an herbivorous feeding of this copepod. Although the incorporation and turnover rates of dietary fatty acids were different from each other, the feeding experiment could still provide clear evidence for the potential of specific fatty acids as trophic markers. Polyunsaturated fatty

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40776092, 40631008, 40821004); IPY 中国行动计划

收稿日期: 2009-12-30; 修订日期: 2010-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lcl@qdio.ac.cn

acids which cannot be synthesized by copepods decreased obviously during the starvation experiment, while structural fatty acids with more conservative chemical properties were consumed in a lesser degree. It could be inferred that in the process of starvation, fatty acids related to the process of energy metabolism were consumed first. 18:4 ω 3, 22:6 ω 3, 18:4 ω 3/16:1 ω 7, Σ 18/ Σ 16 and 22:6 ω 3/20:5 ω 3 increased in different degrees at the end of the feeding experiment when *C. sinicus* was offered with *P. micans*. However, 22:6 ω 3 was widely accepted as an important structural fatty acid, the stable chemical properties of which made it unsuitable as a marker to indicate the ingestion of dinoflagellate. When the copepod was fed with *S. costatum*, only 22:6 ω 3 and 16:1 ω 7/18:4 ω 3 increased at the end of the experiment. Considering the special properties and the low content of 22:6 ω 3 in *S. costatum*, the increase of 22:6 ω 3 might not be a result of the ingestion of this alga. Based on overall considerations of the variations of these fatty acid markers and the Pearson correlation analysis, we deemed that 18:4 ω 3, 18:4 ω 3/16:1 ω 7 and Σ 18/ Σ 16 were useful markers to reflect the ingestion of *P. micans* by *C. sinicus*, and only 16:1 ω 7/18:4 ω 3 could be used as marker for the ingestion of *S. costatum*.

Key Words: *Calanus sinicus*; *Prorocentrum micans*; *Skeletonema costatum*; fatty acid; trophic marker

脂肪酸是生物体内一种重要的生物大分子,它不仅是生物体的基本结构成分,还具有重要的生理作用^[1-2]。海洋中捕食者体内的脂肪酸主要有两个来源:食物和自身合成。一方面,来自食物的某些脂肪酸能够不经修饰或经过很少的修饰就被捕食者吸收而成为其自身的组成成分^[3]。另一方面,一些捕食者能利用自身体内或食物中的有机大分子代谢产生的二碳单元经过碳链的延长、缩短、饱和或去饱和的过程合成新的脂肪酸^[3-4]。在这两个过程中,一些脂肪酸由于其结构的稳定性而具有相对的保守性,它们在摄食之后或被修饰之后仍然是可以被识别和标记的^[3]。因此,可以用这些脂肪酸来示踪食物沿食物链的传递过程。

1971年Lee^[5]等人用中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)等海洋微藻饲喂海岛哲水蚤(*Calanus helgolandicus*),发现海岛哲水蚤体内会逐渐积累饵料的脂肪酸。此后大量的研究结合野外的脂肪酸数据也证实了用脂肪酸作为标记指示捕食者摄食某种饵料的可靠性^[6-7]。目前,国际上关于海洋生物脂肪酸的研究在微观上已经发展到对脂肪酸代谢的分子机制的探讨^[8-9],宏观上主要是用脂肪酸作为标记研究生态系统食物链^[10]和食物网^[11]的物质流动。国内关于海洋生物脂肪酸的研究主要集中在对浮游植物^[12-13]、饵料浮游动物^[14]以及一些鱼类^[15]脂肪酸组成及营养价值的研究上。关于脂肪酸沿食物链传递的研究仅见刘光兴等^[16],他们在研究脂肪酸从单胞藻向火腿许水蚤(*Schmackeria poplesia*)传递的基础上,分析了火腿许水蚤对牙鲆仔稚鱼脂肪酸组成的影响^[17],从水产养殖饵料营养的角度探讨了脂肪酸从浮游植物通过浮游动物向鱼类传递的过程。

中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)是中国近海海洋生态系统动力学研究(China-GLOBEC)选定的关键种之一,它在中国近海海洋生态系统中起着至关重要的作用。20世纪60年代,陈清潮、章淑珍等对中华哲水蚤的形态和繁殖进行了深入的研究^[18-19]。随后几十年中,国内外的学者从生理、繁殖、代谢、行为和时空分布等方面对中华哲水蚤进行了系统的探索和研究^[19-20]。近年来,对中华哲水蚤的研究已经深入到生化机理^[21]和种群遗传学^[22]等领域。虽然中华哲水蚤通常被归为植食性桡足类,但是实际上自然环境中中华哲水蚤的饵料构成有很大一部分是来自其他有机颗粒^[23]。目前,对于自然环境中中华哲水蚤食物构成的研究一直缺乏合适的分析手段。本文通过两种饵料培养中华哲水蚤,分析其体内脂肪酸对不同饵料的响应。初步探讨利用脂肪酸这一生物标志物研究中华哲水蚤食物组成的可行性。通过分析脂肪酸从微藻向浮游动物传递过程中的动态变化,为利用脂肪酸研究中国近海海洋食物网营养结构提供基础资料。

1 实验方法

1.1 藻类的培养

实验用海水取自青岛第三海水浴场,海水经过砂滤后先后又经过38 μ m的筛绢和0.45 μ m的混合纤维滤膜过滤。培养浮游动物的海水还经过充分的曝气和预冷。实验用饵料为海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)

(ESD:30 μm)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*) (ESD:10.1 μm)。培养条件为:室温 18—22 $^{\circ}\text{C}$,光暗比(L:D)为 12h:12h。两种藻均以 f/2 培养液培养至对数生长期,每种微藻取约 200—500mL 藻液经过 2400 r/min 离心 5min 后收集藻细胞沉淀,样品经冷冻干燥 48h 后称重。每种微藻取 3 个平行样。

1.2 浮游动物样品的采集和培养试验

本实验所用中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)是 2008 年 3 月于青岛中苑码头(36 $^{\circ}$ 04'N;120 $^{\circ}$ 29'E)通过垂直拖网(浅水 I 型浮游生物网:筛绢孔径为 500 μm)获得。采样后,将底管内的浮游动物转移至保温桶,并于两小时内转移至实验室。通过肉眼挑取健康、活泼的中华哲水蚤雌体(具有完整的附肢、无可见损伤、游动敏捷)置于预冷的过滤海水中暂养。

实验设置海洋原甲藻(PM)、中肋骨条藻(SC)两个实验组,以饥饿(S)培养为对照。每组 3 个重复,每个重复 200 只左右的个体。根据所采样品海区的水温,温度控制在(5.5 \pm 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 。黑暗条件下培养。

经过 48h 的驯化和排空后,取约 60 个个体液氮固定,作为中华哲水蚤的脂肪酸背景值。PM 培养组和 SC 培养组分别加入海洋原甲藻和中肋骨条藻。每 2d 投 1 次饵,并从箱底吸出粪便和死亡的浮游动物个体。两种藻的浓度都维持在 1.0 $\mu\text{gC}/\text{mL}$ (海洋原甲藻 8.6 $\times 10^2$ 个细胞/mL;中肋骨条藻 3.3 $\times 10^4$ 个细胞/mL)。每 2d 换 1 次海水,培养持续 24d。第 8、16、24 天时分别从每个重复取约 50 个个体液氮固定。

1.3 脂肪酸分析

向浮游植物和浮游动物样品中加入 C19:0 脂肪酸甲酯作为内标,0.01% BHT 甲醇溶液作为抗氧化剂。样品经过二氯甲烷:甲醇(2:1)提取总脂后加入 1mL 0.5mol/L KOH 甲醇溶液于 80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中皂化 2h。再加入 1mL 13% BF₃甲醇溶液在 80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中甲酯化反应 1h。脂肪酸甲酯经正己烷萃取后上机测定。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、脂肪酸标样、BHT 均为 Sigma 公司生产。

使用 Agilent 7890A 型气相色谱仪分析测定脂肪酸的组成和含量。具体的色谱条件如下:

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

进样口温度为 220 $^{\circ}\text{C}$;

检测器温度为 280 $^{\circ}\text{C}$;

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

2 结果

2.1 浮游植物脂肪酸组成

海洋原甲藻和中肋骨条藻的脂肪酸组成如表 1 所示。海洋原甲藻和中肋骨条藻单位干重的总脂肪酸含量分别为(69.72 \pm 3.54) $\mu\text{g}/\text{mg}$ 和(23.93 \pm 0.47) $\mu\text{g}/\text{mg}$,前者显著高于后者($P < 0.005$)。海洋原甲藻的主要脂肪酸有 5 种:16:0、18:4 ω 3、18:5 ω 3、20:3 ω 6、22:6 ω 3,占总脂肪酸的 90.5%。中肋骨条藻的主要脂肪酸也有 5 种:14:0、16:0、16:1 ω 7、16:3 ω 4、20:5 ω 3,占总脂肪酸的 77.17%。

不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)在海洋原甲藻和中肋骨条藻总脂肪酸中分别占到了 81.12% 和 73.69%,前者显著高于后者($P < 0.05$)。中肋骨条藻的单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)含量要高于海洋原甲藻($P < 0.05$),二者分别为 12.47% 和 2.84%。而多不饱和脂肪酸在海洋原甲藻中占到了 78.29%,在中肋骨条藻中只占到了 61.22%。

海洋原甲藻 ω 3 和 ω 6 脂肪酸的含量也要高于中肋骨条藻($P < 0.05$)。海洋原甲藻的 ω 3 和 ω 6 脂肪酸的含量分别是 68.64% 和 9.61%,中肋骨条藻则为 40.83% 和 2.09%。

2.2 中华哲水蚤脂肪酸组成

中华哲水蚤含有 30 多种脂肪酸,要远多于上述的两种浮游植物。从表 2 中 FA_i(FA_i为实验开始时的中华哲水蚤脂肪酸背景值。)可以看出,中华哲水蚤的脂肪酸组成具有两个明显特征:(1)20:5 ω 3 和 22:6 ω 3 的含量均较高,分别达到 25.67% 和 24.43%,而在硅藻或甲藻中通常只有其中的一种含量较高;(2)单不饱和脂肪酸(MUFA)的含量较高,达到 18.98%。其中 20:1 和 22:1 是浮游植物中所没有的。

表 1 海洋原甲藻和中肋骨条藻脂肪酸组成/%

Table 1 Fatty acid composition of *P. micans* and *S. costatum*/%

脂肪酸 Fatty acid	海洋原甲藻 <i>P. micans</i>	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	脂肪酸 Fatty acid	海洋原甲藻 <i>P. micans</i>	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	脂肪酸 Fatty acid	海洋原甲藻 <i>P. micans</i>	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>
14:0	0.83 ± 0.05	14.60 ± 1.13	15:0i	1.23 ± 0.64	2.46 ± 1.25	15:0ai	—	0.09 ± 0.16
15:0	—	0.72 ± 0.18	16:0	15.28 ± 0.22	7.48 ± 3.27	16:1ω9	—	0.32 ± 0.10
16:1ω7	0.35 ± 0.07	7.72 ± 3.23	16:1ω5	0.62 ± 0.03	0.83 ± 0.12	17:0i	0.39 ± 0.02	0.64 ± 0.31
16:2ω4	0.05 ± 0.08	1.47 ± 0.09	17:0	0.08 ± 0.07	—	16:3ω4	—	16.84 ± 2.22
16:4ω3	—	1.34 ± 0.26	18:0	0.52 ± 0.06	0.31 ± 0.01	18:1ω9	0.76 ± 0.01	1.43 ± 0.48
18:1ω7	1.10 ± 0.07	2.17 ± 0.80	18:2ω6	0.46 ± 0.02	1.73 ± 0.08	18:3ω3	2.00 ± 0.01	0.53 ± 0.12
18:4ω3	18.88 ± 0.27	5.65 ± 2.19	18:5ω3	26.51 ± 0.63	—	20:0	0.54 ± 0.04	—
20:3ω6	9.15 ± 0.30	—	20:4ω6	—	0.36 ± 0.07	20:4ω3	—	0.57 ± 0.08
20:5ω3	0.59 ± 0.04	30.53 ± 3.24	22:6ω3	20.66 ± 0.16	2.20 ± 0.28	USI	81.12 ± 0.97	73.69 ± 2.77
SFA	18.88 ± 0.97	26.31 ± 2.77	MUFA	2.84 ± 0.17	12.47 ± 4.42	PUFA	78.29 ± 1.14	61.22 ± 7.18
Σω3	68.64 ± 0.94	40.83 ± 5.08	Σω6	9.61 ± 0.32	2.09 ± 0.14			

USI: 不饱和指数; SFA: 饱和脂肪酸; MUFA: 单不饱和脂肪酸; PUFA: 多不饱和脂肪酸

2.3 不同饵料条件下中华哲水蚤总脂肪酸的变化

不同饵料条件下, 中华哲水蚤总脂肪酸含量的变化趋势差别较大(图 1)。在饥饿条件下, 中华哲水蚤的总脂肪酸在实验过程中始终处于下降的趋势。PM 实验组 8d 时中华哲水蚤总脂肪酸含量显著高于实验开始时 ($P < 0.005$), 随着实验的进行, 总脂肪酸含量逐渐下降。SC 实验组 8d 时中华哲水蚤总脂肪酸含量略高于实验开始时, 随后也一直处于下降的趋势, 第 16 天和第 24 天时总脂肪酸含量均低于实验初始时刻的含量。与饥饿培养相比, PM 实验组在 8d、16d、24d 时的总脂肪酸含量都高于饥饿实验组 ($P < 0.05$)。SC 实验组与饥饿实验组的总脂肪酸含量在实验过程中差别都不是很显著。PM 实验组与 SC 实验组相比, 前者的总脂肪酸含量在 8d、24d 时是显著高于后者的 ($P < 0.05$), 16d 时二者的差别不显著。

2.3.1 饥饿培养下中华哲水蚤脂肪酸的变化

表 2 给出了中华哲水蚤在不同培养条件下各脂肪酸含量的变化情况。由于浮游动物的脂肪酸组成很复杂, 对于饥饿培养我们只关注各脂肪酸在培养过程中的含量变化, 对于投喂饵料的两个实验组只关注几种特征脂肪酸的变化情况。

饥饿培养前后中华哲水蚤各脂肪酸下降幅度在 50%—100% 之间。含量降低小于 70% 的脂肪酸有 15:0i、15:0ai、16:1ω5、17:0、18:1ω9、18:1ω7、20:1ω9、20:1ω7、22:1ω9、22:6ω3。其中有 3 种奇数碳脂肪酸、6 种单不饱和脂肪酸 (MUFA)。多不饱和脂肪酸 (PUFA) 中只有 22:6ω3 在饥饿试验中消耗较少, 其余的多不饱和脂肪酸在饥饿实验中消耗都较多。

2.3.2 中华哲水蚤脂肪酸对海洋原甲藻的响应

在投喂海洋原甲藻时, 中华哲水蚤体内表征硅藻的 16:1ω7 和 20:5ω3 始终处于下降的趋势。而表征甲藻的 18:4ω3 的百分比含量从 1.02% 上升到 12.23%, 22:6ω3 上升的幅度相对较小(图 2PM 实验组)。在有些情况下, 单纯的依靠某种脂肪酸的变化不足以得出正确的结论, 这时脂肪酸之间的比值往往能提供有用的信

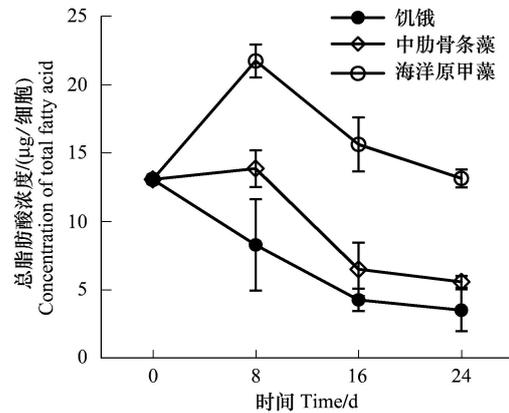


图 1 中华哲水蚤在不同饵料条件下总脂肪酸浓度的变化
Fig. 1 Total fatty acid of *C. sinicus* fed on different diets
S: 饥饿; S: 中肋骨条藻; PM: 海洋原甲藻

息^[3]。图 2 中还给出了 PM 实验组 3 种表征甲藻的脂肪酸比值在培养过程中的变化情况。可以看出,3 种标记都处于不同程度的上升趋势。

表 2 不同饵料培养下中华哲水蚤脂肪酸组成变化/%
Table 2 Fatty acid compositions of *C. sinicus* fed on different diets/%

脂肪酸 Fatty acid	脂肪酸背景值 FAi-0d	饥饿-8d S-8d	饥饿-16d S-16d	饥饿-24d S-24d	海洋原甲藻 -8d PM-8d	海洋原甲藻 -16d PM-16d	海洋原甲藻 -24d PM-24d	中肋骨条藻 -8d SC-8d	中肋骨条藻 -16d SC-16d	中肋骨条藻 -24d SC-24d
14:0	3.21±0.00	2.54±0.51	2.13±0.46	3.12±0.76	2.82±0.20	2.04±0.13	2.17±0.12	3.43±0.86	3.37±0.53	2.21±0.23
15:0i	0.20±0.01	0.24±0.02	0.08±0.13	0.30±0.04	0.19±0.01	0.27±0.03	0.31±0.00	0.24±0.02	0.26±0.01	0.27±0.00
15:0ai	0.14±0.01	0.05±0.09	—	0.26±0.03	0.10±0.00	0.08±0.07	0.13±0.01	0.15±0.02	0.18±0.02	0.22±0.02
15:0	0.43±0.00	0.40±0.05	0.44±0.01	0.47±0.04	0.30±0.03	0.26±0.01	0.25±0.02	0.46±0.04	0.46±0.01	0.42±0.00
16:0	14.92±0.51	16.1±2.37	16.00±1.41	13.71±0.50	14.11±0.37	15.66±1.31	14.17±0.30	15.86±2.00	16.42±1.12	18.04±1.34
16:1ω9	0.18±0.00	0.18±0.16	0.09±0.16	0.10±0.18	0.19±0.00	0.19±0.01	0.22±0.02	0.10±0.09	0.07±0.12	—
16:1ω7	7.63±0.35	5.69±1.78	4.39±0.95	7.16±1.12	7.41±0.22	5.08±0.61	5.46±0.68	7.38±0.45	7.24±1.12	5.00±0.66
16:1ω5	0.29±0.02	0.29±0.03	0.27±0.24	0.40±0.08	0.34±0.01	0.39±0.01	0.39±0.01	0.35±0.01	0.44±0.00	0.40±0.01
17:0i	0.09±0.01	0.04±0.07	—	0.07±0.12	0.05±0.04	0.09±0.03	0.08±0.00	0.16±0.03	0.20±0.02	0.29±0.02
16:2ω4	2.03±0.01	1.74±0.40	1.28±0.30	1.94±0.05	1.91±0.07	1.39±0.25	1.61±0.14	1.84±0.27	1.79±0.27	1.25±0.17
17:0	0.32±0.02	0.47±0.08	0.67±0.12	0.56±0.05	0.24±0.00	0.24±0.02	0.23±0.02	0.38±0.05	0.43±0.06	0.57±0.07
16:3ω4	1.22±0.13	0.60±0.19	0.52±0.10	0.42±0.21	0.90±0.03	0.63±0.14	0.51±0.14	1.05±0.13	0.77±0.23	0.67±0.26
16:4ω3	0.65±0.13	0.89±1.37	—	—	0.46±0.06	0.12±0.11	0.04±0.07	0.27±0.13	0.09±0.15	0.09±0.16
18:0	1.94±0.04	3.90±1.96	3.76±0.53	2.32±1.63	1.70±0.02	1.99±0.19	1.63±0.05	2.10±0.32	2.40±0.29	2.66±0.22
18:1ω9	2.13±0.11	2.38±0.37	2.59±0.14	2.67±0.06	2.38±0.03	2.16±0.07	2.23±0.21	2.18±0.20	2.13±0.13	1.92±0.09
18:1ω7	1.44±0.16	1.63±0.27	2.14±0.21	2.10±0.34	1.38±0.02	1.50±0.03	1.51±0.01	1.68±0.15	1.87±0.14	2.13±0.26
18:2ω6	0.72±0.01	0.64±0.11	0.63±0.11	0.73±0.04	0.87±0.11	0.73±0.04	0.82±0.07	1.16±0.42	0.67±0.02	0.55±0.03
18:2ω4	0.37±0.07	0.29±0.02	0.20±0.18	0.26±0.06	0.30±0.09	0.17±0.02	0.18±0.02	0.31±0.31	0.33±0.07	0.26±0.03
18:3ω3	0.35±0.03	0.33±0.03	0.11±0.19	0.29±0.26	0.67±0.01	0.81±0.07	0.81±0.05	0.32±0.07	0.35±0.02	0.26±0.02
18:4ω3	1.03±0.02	0.45±0.21	0.53±0.13	0.47±0.47	7.35±0.87	12.86±2.22	12.23±1.27	0.92±0.30	0.68±0.24	0.38±0.08
20:0	0.94±0.07	0.61±0.28	0.10±0.17	0.47±0.18	0.70±0.48	0.60±0.29	1.06±0.04	0.58±0.08	0.61±0.24	0.29±0.25
20:1ω9	2.97±0.87	2.97±0.93	2.68±0.99	3.26±0.48	3.34±0.16	2.73±0.34	3.58±0.18	3.17±1.24	2.69±0.68	2.00±0.81
20:1ω7	0.21±0.01	0.24±0.03	0.34±0.09	0.27±0.03	0.22±0.03	0.18±0.05	0.23±0.02	0.26±0.11	0.21±0.04	0.13±0.12
20:2ω6	0.21±0.02	0.17±0.17	0.09±0.16	—	0.19±0.01	0.23±0.01	0.25±0.01	0.18±0.02	0.16±0.14	0.13±0.11
20:4ω6	0.65±0.04	0.66±0.20	0.34±0.29	0.65±0.09	0.60±0.04	0.43±0.07	0.47±0.04	0.62±0.14	0.54±0.02	0.38±0.01
20:4ω3	0.98±0.00	0.72±0.13	0.64±0.07	0.78±0.25	2.69±0.33	4.90±0.86	5.37±0.52	0.87±0.10	0.74±0.07	0.41±0.35
20:5ω3	25.67±1.72	22.16±2.78	18.69±2.18	20.54±1.53	21.01±1.65	13.87±3.64	13.27±1.23	25.29±2.61	24.61±1.04	22.10±1.16
22:1ω11	3.50±0.77	2.78±0.86	2.87±0.89	3.04±0.93	3.59±0.34	2.79±0.72	3.10±0.28	3.37±0.99	2.75±0.77	2.11±0.91
22:1ω9	0.63±0.04	0.61±0.25	0.69±0.07	0.70±0.10	0.67±0.08	0.54±0.08	0.63±0.05	0.56±0.20	0.47±0.11	0.44±0.12
24:0	0.52±0.13	0.22±0.38	—	—	—	—	—	0.15±0.25	—	—
22:6ω3	24.43±0.88	29.98±7.25	37.71±4.91	32.94±1.22	23.32±0.17	27.07±1.56	27.06±1.01	24.61±2.68	27.08±3.76	34.44±3.00

FAi 为实验开始时的中华哲水蚤脂肪酸背景值;S、PM、SC 分别代表饥饿、海洋原甲藻和中肋骨条藻培养下中华哲水蚤的脂肪酸含量

将 7 种甲藻的脂肪酸标记进行 Pearson 相关性分析(表 3)。18:4ω3 和 18:4ω3/16:1ω7、 $\Sigma 18/\Sigma 16$ 显著正相关,18:4ω3/16:1ω7 和 $\Sigma 18/\Sigma 16$ 、DHA/EPA 显著正相关。表征硅藻的 16:1ω7、20:5ω3 均与表征甲藻的标记存在较好的负相关关系。

3.3.3 中华哲水蚤脂肪酸对中肋骨条藻的响应

在投喂中肋骨条藻时,中华哲水蚤体内的脂肪酸变化情况较为复杂。表征硅藻的 16:1ω7 和 20:5ω3 始终处于下降的趋势,但比 PM 实验组下降趋势较为缓和。18:4ω3 始终处于下降的趋势,22:6ω3 却上升了近 10% (图 2SC 实验组)。图 2 中 SC 实验组表征硅藻的脂肪酸比值只有 16:1ω7/18:4ω3 处于上升的趋势,20:5ω3/22:6ω3、 $\Sigma 16/\Sigma 18$ 则呈平缓下降的趋势。

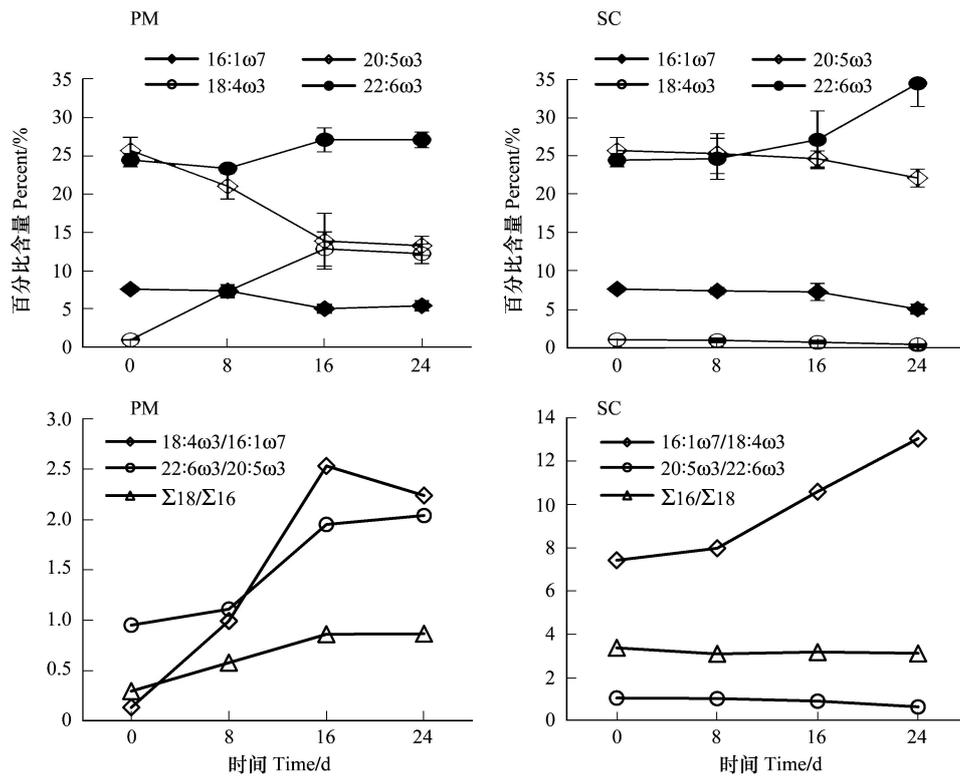


图 2 不同饵料条件下中华哲水蚤体内几种特征脂肪酸标记的变化趋势

Fig. 2 Variations of selected fatty acid markers of *C. sinicus* fed on different diets

PM 为投喂海洋原甲藻实验组;SC 为投喂中肋骨条藻实验组

表 3 海洋原甲藻培养下中华哲水蚤几种重要脂肪酸标记的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis of fatty acid markers of *C. sinicus* fed on *P. micans*

PM	16:1ω7	18:4ω3	20:5ω3	22:6ω3	18:4ω3/16:1ω7	22:6ω3/20:5ω3	Σ18/Σ16
16:1ω7	1						
18:4ω3	-0.909	1					
20:5ω3	0.954 *	-0.982 *	1				
22:6ω3	-0.946	0.743	-0.843	1			
18:4ω3/16:1ω7	-0.968 *	0.984 *	-0.989 *	0.842	1		
22:6ω3/20:5ω3	-0.982 *	0.924	-0.978 *	0.935	0.964 *	1	
Σ18/Σ16	-0.924	0.997 **	-0.993 **	0.778	0.987 *	0.947	1

* 表示在 0.05 的水平上显著相关 (双尾); ** 表示在 0.01 的水平上显著相关 (双尾)

同 PM 实验组,也将 7 种脂肪酸标记进行 Pearson 相关性分析(表 4)。发现各脂肪酸标记之间的相关关系无明显规律。16:1ω7、20:5ω3、18:4ω3 和 20:5ω3/22:6ω3 之间具有较好的相关关系,16:1ω7/18:4ω3 则与 22:6ω3 具有较好的正相关关系。

表 4 中肋骨条藻培养下中华哲水蚤几种重要脂肪酸标记的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlation analysis of fatty acid markers of *C. sinicus* fed on *S. costatum*

SC	16:1ω7	18:4ω3	20:5ω3	22:6ω3	16:1ω7/18:4ω3	20:5ω3/22:6ω3	Σ16/Σ18
16:1ω7	1						
18:4ω3	0.918	1					
20:5ω3	0.987 *	0.969 *	1				
22:6ω3	-0.985 *	-0.961 *	-0.997 **	1			
16:1ω7/18:4ω3	-0.899	-0.997 **	-0.957 *	0.954 *	1		
20:5ω3/22:6ω3	0.972 *	0.981 *	0.996 **	-0.997 **	-0.975 *	1	
Σ16/Σ18	0.477	0.564	0.512	-0.440	-0.514	0.478	1

* 表示在 0.05 的水平上显著相关 (双尾); ** 表示在 0.01 的水平上显著相关 (双尾)

3 讨论与结论

3.1 两种微藻的脂肪酸组成

关于海洋微藻脂肪酸的研究从 20 世纪 50—60 年代开始就有很多的报道^[24]。海洋微藻各个门的脂肪酸组成有明显的特征^[12,25],因此可以将脂肪酸用于藻类化学分类学的研究^[26]。另外,由于培养条件^[24,27]和生长期^[24]的不同,藻类脂肪酸组成也往往不同。本研究中海洋原甲藻的主要脂肪酸有 16:0、18:4 ω 3、18:5 ω 3、20:3 ω 6、22:6 ω 3,中肋骨条藻的主要脂肪酸有 14:0、16:0、16:1 ω 7、16:3 ω 4、20:5 ω 3,二者分别表现出显著的甲藻门特征和硅藻门特征^[12-13]。在相同培养条件下海洋原甲藻的总脂肪酸含量显著高于中肋骨条藻,表征饵料质量的 PUFA、 ω 3 和 ω 6 脂肪酸^[1,28]的含量也显著高于中肋骨条藻。因此,单位干重的海洋原甲藻能够比中肋骨条藻提供更多的脂肪酸类营养物质。从这个角度来说,海洋原甲藻可能是更好的饵料。

3.2 中华哲水蚤脂肪酸组成

中华哲水蚤的脂肪酸组成具有明显的特征。首先,其体内 20:5 ω 3、22:6 ω 3 的含量都较高,二者占总脂肪酸含量的 50% 以上。作为必需脂肪酸,20:5 ω 3、22:6 ω 3 在生物体内不仅要参与一些激素的代谢过程,22:6 ω 3 还要参与膜的构建、基因表达调控等过程^[2]。可见,二者在生物体内具有非常重要的作用。中华哲水蚤脂肪酸的另一个重要特征是单不饱和脂肪酸(MUFA)的含量较高,特别是 20:1 和 22:1 占到了总脂肪酸含量的 7% 以上。20:1 和 22:1 是植食性桡足类的特征性脂肪酸^[4],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^[3-4]。可见,在中华哲水蚤的食物组成中浮游植物占了相当一部分。作为硅藻和甲藻标记的 16:1 ω 7 和 18:4 ω 3^[12-13]分别占到了总脂肪酸的 8% 和 1%,说明其摄食的浮游植物主要是硅藻,甲藻则较少。奇数碳的 15:0 和 17:0 占总脂肪酸的 1.2% 左右,这类脂肪酸通常被认为是自然界中细菌的特征脂肪酸^[29-30]。从粒径上来说,中华哲水蚤的摄食范围在 5—50 μ m 之内^[31],而海洋细菌通常粒径在 1 μ m 以下,因此中华哲水蚤主动摄食的细菌肯定是很少的,15 和 17 碳的脂肪酸可能主要来自于有机碎屑以及中华哲水蚤的肠道。另外,24:0 脂肪酸的出现则说明中华哲水蚤摄食了陆源碎屑物质^[30]。从各脂肪酸的含量来看,20:1 + 22:1、16:1 ω 7 的含量较高,说明中华哲水蚤以植食特别是以摄食硅藻为主,15:0、17:0 和 24:0 的含量较低,说明中华哲水蚤的食物组成中有少量的细菌和碎屑物质。可以说中华哲水蚤是一个偏植食的杂食性种。

3.3 中华哲水蚤脂肪酸对不同饵料的响应

从总脂肪酸的变化情况来看,投喂饵料的中华哲水蚤在前 8d 摄食了大量的浮游植物。随着实验的进行,总脂肪酸含量和某些脂肪酸都出现了降低的趋势,这与 Graeve^[32]等人用强壮前沟藻(*Amphidinium carterae*)、南极海链藻(*Thalassiosira antarctica*)培养飞马哲水蚤(*Calanus finmarchicus*)等桡足类时得出的结果是相似的。这是因为长期的单种饵料培养会造成营养成分缺失^[27],导致捕食者生长状况的下降,并最终表现出对浮游植物摄食的减少和对脂肪酸吸收能力的下降。

从各脂肪酸在饥饿培养前后的含量变化来看,饥饿过程中首先消耗的是那些浮游动物自身没有合成能力的多不饱和脂肪酸。但 22:6 ω 3 是个例外,这种重要的多不饱和脂肪酸主要分布在细胞膜^[32],是一种结构脂肪酸^[2]。而且 22:6 ω 3 在沿食物链传递过程中也具有较高的保守性^[33]。因此,在浮游动物受到饥饿胁迫时,会首先消耗其他脂肪酸。而 22:6 ω 3 含量必须保持基本稳定才能维持生物体的基本功能。另外还有几种单不饱和脂肪酸也都消耗的相对较少,这一方面可能是因为这些单不饱和脂肪酸也是生物膜的基本结构成分^[2],另一方面则是可能是因为浮游动物具有合成或通过转化合成某些单不饱和脂肪酸的能力^[4],从而在一定程度上对这类脂肪酸进行了补充。

研究中,投喂海洋原甲藻的中华哲水蚤体内 18:4 ω 3 增加的幅度要远大于 22:6 ω 3。而 16:1 ω 7、20:5 ω 3 则表现出不同程度的降低,说明浮游动物对不同脂肪酸的吸收和转化能力存在差异。这与 Graeve^[32]等人用强壮前沟藻(*Amphidinium carterae*)培养极北哲水蚤(*Calanus hyperboreus*)和北极哲水蚤(*Calanus glacialis*)得出的结果相似。22:6 ω 3 的含量虽然有一定的增加,但其变化趋势和 18:4 ω 3、18:4 ω 3/16:1 ω 7、22:6 ω 3/20:5 ω 3、 Σ 18/ Σ 16 均无明显相关性。综合各脂肪酸标记的变化趋势和 Pearson 相关性分析的结果认为 18:4 ω 3、

18:4 ω 3/16:1 ω 7、 Σ 18/ Σ 16 能较好的指示中华哲水蚤对海洋原甲藻的摄食。而作为结构脂肪酸的 22:6 ω 3 由于其保守性对食物的响应不明显,因此不适合作为生物标记。

投喂中肋骨条藻的中华哲水蚤体内几种脂肪酸标记的变化没有明显规律。这时若单纯的依靠图 2 中 SC 实验组各脂肪酸标记的变化趋势或 Pearson 相关性分析的结果均不足以得出可靠的结论。因此需要将两种分析的结果综合加以考虑。在中肋骨条藻培养过程中总脂肪酸和各脂肪酸绝对含量都是降低的。但降低的程度要小于饥饿培养组。从总脂肪酸的变化来看,中华哲水蚤存在对中肋骨条藻的摄食,但可能对中肋骨条藻的摄食或吸收很少。这一方面可能是因为中肋骨条藻粒径(10.1 μ m)比海洋原甲藻(30 μ m)小,二者虽然都处于中华哲水蚤 5—50 μ m 的主要摄食范围之内^[31],但摄食较小粒径的中肋骨条藻可能需要付出更多的努力,这导致了浮游动物对饵料的摄食效率较低^[32]。另一方面则可能是因为每毫克干重的中肋骨条藻脂肪酸含量较低(仅为(23.93 \pm 0.47) μ g/mg),远低于海洋原甲藻的(69.72 \pm 3.54) μ g/mg。因此,即使中华哲水蚤摄入了一定数量的中肋骨条藻,实际获得的脂肪酸可能仍不足以满足其脂类代谢的需求。在这种情况下,中华哲水蚤自身的脂肪酸会被消耗,而 22:6 ω 3 由于其保守性较高而消耗较少^[33],因此其百分比含量反而增加了。所以,22:6 ω 3 百分比含量的变化不足以证明浮游动物对 22:6 ω 3 的积累。结合各脂肪酸标记的变化趋势和 Pearson 相关性分析的结果来看,16:1 ω 7、20:5 ω 3、20:5 ω 3/22:6 ω 3、 Σ 16/ Σ 18 也不能反应中华哲水蚤对中肋骨条藻的摄食。16:1 ω 7/18:4 ω 3 则不同,虽然中华哲水蚤对中肋骨条藻的摄食较少,但实际仍积累了一定量的 16:1 ω 7。当然实际上在实验过程中消耗的 16:1 ω 7 可能远比积累的多。但在投喂硅藻的情况下由于硅藻中 18:4 ω 3 很低,因此随着实验的进行 18:4 ω 3 因得不到补充而几乎消耗殆尽。因此,图 2SC 实验组中仅 16:1 ω 7/18:4 ω 3 能够在一定程度上反映中华哲水蚤对中肋骨条藻的摄食。

3.4 结论

研究表明,甲藻(海洋原甲藻)和硅藻(中肋骨条藻)脂肪酸组成均具有各自明显的特征,证明了利用脂肪酸对藻类进行化学分类的可行性,也为利用脂肪酸作为生物标志物研究不同饵料沿食物链传递过程提供了基础证据。通过中华哲水蚤培养实验证实,不同脂肪酸在其体内的代谢具有不同的效率。在饥饿培养中,首先消耗的是那些浮游动物没有合成能力的多不饱和脂肪酸,而结构脂肪酸都表现出较好的保守性。培养试验中 18:4 ω 3、18:4 ω 3/16:1 ω 7、 Σ 18/ Σ 16 和 16:1 ω 7/18:4 ω 3 能较好的指示中华哲水蚤对饵料的摄食。这不仅证明了这一定性指标用于研究食物链营养传递是可行、可靠的,也为利用脂肪酸标记研究中国近海海洋食物网食物过程提供了基础资料。

References:

- [1] Mourente G, Lubián L M, Odriozola J M. Total fatty acid composition as a taxonomic index of some marine microalgae used as food in marine aquaculture. *Hydrobiologia*, 1990, 203(3): 147-154.
- [2] Spector A A. Essentiality of fatty acids. *Lipids*, 1999, 34(Supplement): S1-S3.
- [3] Dalsgaard J, St John M, Kattner G, Müller-Navarra D, Hagen W. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment. *Advances in Marine Biology*, 2003, 46: 225-340.
- [4] Parrish C C. Determination of total lipid, lipid classes and fatty acids in aquatic samples// Arts M T, Wainman B C eds. *Lipids in Freshwater Ecosystem*. New York; Springer-Verlag, 1999; 4-20.
- [5] Lee R F, Nevenzel J C, Paffenhofer G A. Importance of wax esters and other lipids in the marine food chain: phytoplankton and copepods. *Marine Biology*, 1971, 9(2): 99-108.
- [6] Kharlamenko V I, Zhukova N V, Khotimchenko S V, Svetashev V I, Kamenev G M. Fatty acids as markers of food sources in a shallow water hydrothermal ecosystem (Kraternaya Bight, Yankich Island, Kurile Islands). *Marine Ecology Progress Series*, 1995, 120: 231-241.
- [7] Rossi S, Youngbluth M J, Jacoby C A, Pag s F, Garrofé X. Fatty acid trophic markers and trophic links among seston, crustacean zooplankton and the siphonophore *Nanomia cara* in Georges Basin and Oceanographer Canyon (NW Atlantic). *Scientia Marina*, 2008, 72(2): 403-416.
- [8] Giddens A C, Nielsen L, Boshoff H I, Tasdemir D, Perozzo R, Kaiser M, Wang F, Sacchettini J C, Copp B R. Natural product inhibitors of fatty acid biosynthesis: synthesis of the marine microbial metabolites pseudopyronines A and B and evaluation of their anti-infective activities.

- Tetrahedron, 2008, 64(7): 1242-1249.
- [9] Alimuddin, Kiron V, Satoh S, Takeuchi T, Yoshizaki G. Cloning and over-expression of a masu salmon (*Oncorhynchus masou*) fatty acid elongase-like gene in zebrafish. *Aquaculture*, 2008, 282(1/4): 13-18.
- [10] Shin Paul K S, Yip K M, Xu W Z, Wong W H. Fatty acid as markers to demonstrating trophic relationships among diatoms, rotifers and green-lipped mussels. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 357(1): 75-84.
- [11] Drazen J C, Phleger C F, Guest M A, Nichols P D. Lipid, sterols and fatty acid composition of abyssal holothurians and ophiuroids from the North-East Pacific Ocean: Food web implications. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part B, Biochemistry & Molecular Biology*, 2008, 151(1): 79-87.
- [12] Li H F, Zhou H Q. Comparative studies on fatty acid composition of marine microalgae. *Oceanologia and Limnologia Sinica*, 1999, 30(1): 34-40.
- [13] Li C Y, Qiu X M. Progress on fatty acid composition of marine algae. *Biotechnology Bulletin*, 2008, 4: 63-65.
- [14] Lin Y S, Cao W Q, Zhen A R, Li W Q, Chen Q H. Fatty acid composition analysis and their nutrient effect evaluation of some pelagic food organisms. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2001, 20 (Supplement): 164-168.
- [15] Liu J, Hu B, Li H, Chen A J, Huang F, Li Y Z. Fatty acid composition of muscles in several wild fishes in the Yangtze River. *Journal of Dalian Fishery University*, 2008, 23(6): 489-492.
- [16] Liu G X, Cui J L, Huang Y. The effects of different algae on the fatty acid composition of *Schmackeria poplesia* (Copepoda: Calanoida). *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2006, 45 (Supplement2): 250-255.
- [17] Liu G X, Xu D H, Qiu X C, Huang Y, Cui J L, Zhu L Y. Study on the growth, survival and fatty acid composition of larvae and juvenile of *Paralichthys olivaceus* raised with *Schmackeria poplesia* (Copepoda: Calanoida). *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(2): 259-265.
- [18] Chen Q C. A study of the breeding periods, variation in sex ratio and in size of *Calanus sinicus* Brodsky. *Oceanologia and Limnologia Sinica*, 1964, 6(3): 272-288.
- [19] Zhang F, Sun S. Review on the ecology of the planktonic copepod *Calanus sinicus*. *Marine Science*, 2001, 25(11): 16-19.
- [20] Cao W Q, Lin Y S, Yang Q, Li S J. Advanced in biology of *Calanus sinicus* in China. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2006, 45 (2): 54-61.
- [21] Xie Z H, Wang Y, Tang X X. Effect of *Proocentrom donghaiense* on feeding and digestive enzyme activity of *Calanus sinicus*. *Oceanologia and Limnologia Sinica*, 2009, 40(4): 494-499.
- [22] Lin Y S, Fang L P, Cao W Q, Li S J. Mitochondrial DNA COI sequence analysis of *Calanus sinicus* (copepod) in Qingdao Waters. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2005, 44(1): 90-93.
- [23] Zhang G T, Li C L, Sun S, Zhang H Y, Sun J, Ning X R. Feeding habit of *Calanus sinicus* (Crustacea: Copepoda) during spring and autumn in the Bohai Sea studied with herbivore index. *Scientia Marina*, 2006, 70(3): 381-388.
- [24] Ackman R G, Tocher C S, McLachlan J. Marine phytoplankter fatty acids. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1968, 25(8): 1603-1620.
- [25] Volkman J K, Barrett S M, Blackburn S I, Mansour M P, Sikes E L, Gelin F. Microalgal biomarkers: a review of recent research developments. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(5): 1163-1179.
- [26] Xu H F. Classification of marine microalgae based on fatty acids by using chemometrics method. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(3): 69-72.
- [27] Volkman J K, Jeffrey S W, Nichols P D, Rogers G I, Garland C D. Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae used in mariculture. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1989, 128(3): 219-240.
- [28] Kainz M, Arts M T, Mazumder A. Essential fatty acids in the planktonic food web and their ecological role for higher trophic levels. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(5): 1784-1793.
- [29] Budge S M, Parrish C C. Lipid biogeochemistry of plankton, settling matter and sediments in Trinity Bay, Newfoundland II. Fatty acids. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(5/7): 1547-1559.
- [30] Budge S M, Parrish C C, Mckenzie C H. Fatty acid composition of phytoplankton, settling particulate matter and sediments at a sheltered bivalve aquaculture site. *Marine Chemistry*, 2001, 76(4): 285-303.
- [31] Li C L, Sun S, Wang R. An experimental study on grazing selectivity of *Calanus sinicus* to natural food particles. *Oceanologia and Limnologia Sinica*, 2007, 38(6): 529-535.
- [32] Graeve M, Kattner G, Hagen W. Diet-induced changes in the fatty acid composition of Arctic herbivorous copepods: Experimental evidence of

trophic markers. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1994, 182(1): 97-110.

- [33] Scott C L, Kwasniewski S, Falk-Petersen S, Sargent J R. Species differences, origins and functions of fatty alcohols and fatty acids in the wax esters and phospholipids of *Calanus hyperboreus*, *C. glacialis* and *C. finmarchicus* from Arctic waters. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 235: 127-134.

参考文献:

- [12] 李荷芳, 周汉秋. 海洋微藻脂肪酸组成的比较研究. *海洋与湖沼*, 1999, 30(1): 34-40.
- [13] 李春颖, 仇雪梅. 海洋微藻脂肪酸组成的研究进展. *生物技术通报*, 2008, 4: 63-65.
- [14] 林元烧, 曹文清, 郑爱榕, 李文权, 陈清花. 几种饵料浮游动物脂肪酸组成分析及营养效果评价. *台湾海峡*, 2001, 20 (Supplement): 164-168.
- [15] 刘军, 胡兵, 李惠, 陈爱敬, 黄峰, 李玉增. 长江水系中 5 种野生鱼类肌肉脂肪酸的研究. *大连水产学院学报*, 2008, 23(6): 489-492.
- [16] 刘光兴, 崔建丽, 黄瑛. 几种单胞藻对火腿许水蚤脂肪酸组成的影响. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006, 45 (Supplement2): 250-255.
- [17] 刘光兴, 徐东晖, 邱旭春, 黄瑛, 崔建丽, 朱丽岩. 火腿许水蚤对牙鲆仔稚鱼成活、生长及脂肪酸组成的影响. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(2): 259-265.
- [18] 陈清潮. 中华哲水蚤的繁殖、性比率和个体大小的研究. *海洋与湖沼*, 1964, 6(3): 272-288.
- [19] 张芳, 孙松. 中华哲水蚤生态学研究进展. *海洋科学*, 2001, 25(11): 16-19.
- [20] 曹文清, 林元烧, 杨青, 李少菁. 我国中华哲水蚤生物学研究进展. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(2): 54-61.
- [21] 谢志浩, 王悠, 唐学玺. 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)对中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)摄食和消化酶活性的影响. *海洋与湖沼*, 2009, 40(4): 494-499.
- [22] 林元烧, 方旅平, 曹文清, 李少菁. 中华哲水蚤线粒体 DNA COI 基因序列分析. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2005, 44(1): 90-93.
- [26] 许河峰. 基于脂肪酸组成的海洋微藻化学计量学分类研究. *海洋通报*, 2003, 22(3): 69-72.
- [31] 李超伦, 孙松, 王荣. 中华哲水蚤对自然饵料的摄食选择性实验研究. *海洋与湖沼*, 2007, 38(6): 529-535.

CONTENTS

Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau ... LI Na, WANG Genxu, YANG Yan, et al (895)

Effects of submergence on seed germination of nine annual plant species in the Three Gorges Reservoir region and their implication to vegetation restoration ... TAO Min, BAO Dachuan, JIANG Mingxi (906)

Temporal-spatial niches of Chinese White Wax Scale insect (*Ericerus pela*) and its three dominant parasitoid wasps ... WANG Zili, CHEN Yong, CHEN Xiaoming, et al (914)

Species diversity of carabid beetles in desert-steppe in Yanchi of Ningxia, China ... HE Qi, WANG Xinpu, YANG Guijun (923)

Identification of trophic relationships between marine algae and the copepod *Calanus sinicus* in a fatty acid approach ... LIU Mengtan, LI Chaolun, SUN Song (933)

Community structure of macrozoobenthos in Caizi Lake, China ... XU Xiaoyu, ZHOU Lizhi, ZHU Wenzhong, et al (943)

The community distribution pattern of intertidal macrozoobenthos and the responses to human activities in Yueqing Bay ... PENG Xin, XIE Qilang, CHEN Shaobo, et al (954)

The effects of jellyfish (*Rhopilema esculentum* Kishinouye) farming on the sediment nutrients and macrobenthic community ... FENG Jianxiang, DONG Shuanglin, GAO Qinfeng, et al (964)

Diurnal activity rhythm and time budgets of the Dwarf Blue Sheep (*Pseudois schaeferi*) in Zhubalong Nature Reserve ... LIU Guoku, ZHOU Caiquan, YANG Zhisong, et al (972)

Comparison of leaf, height and seed functional traits of species in dry-hot valleys ... ZHENG Zhixing, SUN Zhenhua, ZHANG Zhiming, et al (982)

Dynamics of soil seed banks in the reversion process of desertification in the middle reaches of the Shiyang River ... MA Quanlin, ZHANG Dekui, LIU Youjun, et al (989)

Modelling the spatial distribution of forest carbon stocks with artificial neural network based on TM images and forest inventory data ... WANG Shaohua, ZHANG Maozhen, ZHAO Pingan, et al (998)

The GIS-based visual landscape evaluation in mountain area: a case study of Mount Nan-kun National Forest Park, Guangdong Province ... QIU Yishu, GAO Jun, ZHAN Qilin (1009)

A functional classification method for examining landscape pattern of urban wetland park: a case study on Xixi Wetland Park, China ... LI Yufeng, LIU Hongyu, ZHENG Nan, et al (1021)

Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Seriphidium minchinense* under water stress ... HE Xueli, GAO Lu, ZHAO Lili (1029)

Modeled impact of irrigation on regional climate in India ... MAO Huiqin, YAN Xiaodong, XIONG Zhe, et al (1038)

The responses of photosynthetic energy use in wheat flag leaves to nitrogen application rates and light density under elevated atmospheric CO₂ concentration ... ZHANG Xucheng, YU Xianfeng, MA Yifan, et al (1046)

Enhanced drought and photooxidation tolerance of transgenic tobacco plants overexpressing pea catalase in chloroplasts ... WANG Fengde, YI Yanjun, WANG Haiqing, et al (1058)

Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress ... WANG Shugang, WANG Zhenlin, WANG Ping, et al (1064)

Predicting winter wheat growth based on integrating remote sensing and crop growth modeling techniques ... HUANG Yan, ZHU Yan, WANG Hang, et al (1073)

Effects of spraying ABA on bleeding intensity in neck-panicle node, spike traits and grain yields of two different panicle-type winter wheat ... CUI Zhiqing, YIN Yanping, TIAN Qizhuo, et al (1085)

Nitrogen and phosphorus cycling from rice-duck mutual ecosystem during late rice growth season ... ZHANG Fan, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al (1093)

Initial exploration of the ecological costs of food production in the hilly red soil region of Southern China ... LI Xiao, XIE Yongsheng, ZHANG Yinglong, et al (1101)

Optimization strategy and management decision-making in balancing forage and livestock in Gannan pastoral area ... LIANG Tiangang, FENG Qisheng, XIA Wentao, et al (1111)

Species-area relationship in travertine area in Huanglong valley, Sichuan ... HUANG Baoqiang, LUO Yibo, AN Dejun, et al (1124)

Influencing factors of fine root lifespans in two Chinese fir plantations in subtropical China ... LING Hua, YUAN Yiding, YANG Zhijie, et al (1130)

Age structure effects on stand biomass and carbon storage distribution of *Larix olgensis* plantation ... JU Wenzhen, WANG Xinjie, WANG Xinjie (1139)

Effects on controlling banana Fusarium wilt by bio-fertilizer, chitosan, hymexazol and their combinations ... ZHANG Zhihong, PENG Guixiang, LI Huaxing, et al (1149)

Seasonal dynamics of culturable bacterium numbers in freshwater bodies of different water quality in Beijing ... GAO Cheng, HUANG Manrong, TAO Shuang, et al (1157)

Review and Monograph

On the coordinated regulation of forest transpiration by hydraulic conductance and canopy stomatal conductance ... ZHAO Ping (1164)

Impacts of plant parasitism on structure and function of ecosystems ... LI Junmin, DONG Ming (1174)

Invasion mechanisms of *Solidago canadensis* L.: a review ... YANG Ruyi, ZAN Shuting, TANG Jianjun, et al (1185)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 4 期 (2011 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 4 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

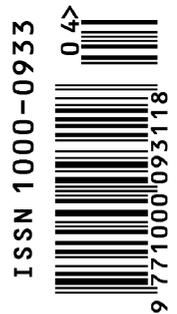
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元