

热带富营养化湖泊中浮游植物的脂肪酸组成与分布^{*}

游江涛, 董丽华, 韩博平^{**}

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘 要: 星湖位于广东省, 是一个热带地区的湖泊. 本文测定和分析了该湖的两个子湖仙女湖和中心湖浮游植物群落的脂肪酸组成, 探讨了浮游植物群落特征与脂肪酸组成之间的关系. 两个子湖的富营养化程度较高, 其中中心湖更严重. 仙女湖的浮游植物群落以蓝藻为主导, 而在中心湖则蓝藻或金藻占优势. 浮游植物样品中检测到的脂肪酸碳链长为 16 碳到 22 碳. 其中饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸种类较少, 均有 3 种; 而高不饱和脂肪酸的种类相对较多. 两个子湖的脂肪酸均以饱和脂肪酸为主, 高不饱和脂肪酸浓度相对较低. 对于单一的脂肪酸种类来说, C16:0 浓度最高, 其浓度与蓝藻数量有很高的相关性 ($R^2 = 0.955$, $P = 0.001$), 表明样品中的 C16:0 主要来源于蓝藻. 而富含 EPA (二十碳五烯酸) 的硅藻和隐藻生物量高时其浮游植物的 EPA 浓度也较高; 在中心湖中高浓度的 DHA (二十二碳六烯酸) 主要来源于金藻. 总之, 两个子湖泊的脂肪酸组成与浮游植物群落结构特征基本一致.

关键词: 浮游植物群落; 脂肪酸组成; 星湖; 富营养化湖泊

Composition and Distribution of Fatty Acids for Phytoplankton in a Typical Tropical Lake

YOU Jiangtao, DONG Lihua & HAN Boping[§]

(*Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China*)

[§] Corresponding author, E-mail: tbphan@jnu.edu.cn.

Abstract: Lake Xinghu is a typical eutrophic lake consisting of 6 sub-lakes in tropical Guangdong Province. We reported the fatty acid composition of phytoplankton community and the relationship between the fatty acids and phytoplankton in the two sub-lakes: Xiannü Lake and Zhongxin Lake in July, October and December of 2002. For the two sampled sub-lakes, Zhongxin Lake had a higher trophic level than the Xiannü Lake. In the former, Cyanophyceans were the dominant phytoplankton in July and October, but was replaced by Chrysophyceans in December. In the latter, Cyanophyceans predominated numerically in all sampling periods. The carbon chains of the fatty acids for phytoplankton in the water samples ranged from 16 to 22. 3 species of saturated fatty acids, 3 monounsaturated fatty acids and 7 polyunsaturated fatty acids were detected. The saturated fatty acids dominated in the total fatty acids, the polyunsaturated fatty acids were low in the two sub-lakes. For single species of fatty acids, the concentration of C16:0 was the highest in all the fatty acids. It showed a significant relationship with the abundance of Cyanophyceans, which indicated that the C16:0 was rooted in the Cyanophyceans. The Bacillariophyceans and Cryptophyceans were rich in EPA, and the concentration of EPA in phytoplankton was high with the biomass of the Bacillariophyceans and Cryptophyceans. The high concentration of DHA was observed in Zhongxin Lake in the December, which should be primarily from Chrysophyceans. Generally speaking, the composition of the fatty acids in the water samples was consistent with the structures of phytoplankton community.

Keywords: Phytoplankton; fatty acids; Lake Xinghu; eutrophic lake

脂肪酸广泛存在于动植物和微生物体内, 由它参与形成的脂类是构成有机体的三大基本物质之一, 是生态系统中能量和物质流动的重要基础. 一些高不饱和脂肪酸, 如二十碳五烯酸 (EPA) 和二十二碳六烯酸 (DHA), 是动物的必需脂肪酸, 在体内用于构成磷脂双层膜. 同时它们也是重要的生理活性物质, 对于幼体的正常生长、发育和存活起重要的作用^[1]. 但动物体内自身不能合成这些高不饱和脂肪酸, 必须通过食物

^{*} 教育部“优秀青年教师资助计划”和国家自然科学基金(39900022)联合资助.

2003–12–17 收稿; 2004–03–08 收修改稿. 游江涛, 女, 1977 年生, 博士研究生; E-mail: youyou163@163.net.

^{**} 通讯作者; E-mail: tbphan@jnu.edu.cn.

来获取. 藻类作为生态系统的主要初级生产者,是能生化合成 PUFA(多不饱和脂肪酸)的极少数生物类群之一.

浮游植物能否被大量捕食,主要依赖于浮游植物作为食物的质量高低,而浮游植物所含的不饱和脂肪酸是测定其作为食物质量的指标^[2,3]. 不饱和脂肪酸在水域生态系统中由浮游植物向浮游动物及其它动物能量转化过程中起着关键的作用^[4,5]. 由于不同藻类所含的不饱和脂肪酸不同,因此,自然水体中的不饱和脂肪酸种类和数量依赖于浮游植物的群落结构. 浮游植物的脂肪酸组成和浮游植物系统分类之间存在着很大的相关性,可用作浮游植物分类的化学标记^[6]. 浮游植物特征脂肪酸的变化及其分布特征可以反映水体中浮游植物的群落结构及其演替过程^[7]. 在水体富营养化过程中,富含高不饱和脂肪酸的浮游植物种类大为减少,而富含饱和脂肪酸为主的蓝藻等成为优势类群,浮游植物向浮游动物的能量转移效率下降,导致藻类的生物量大量积累,这是藻华形成的重要因素之一. 因此,水体中脂肪酸的含量和组成结构可以作为反映水体富营养化水平和特征的生化指标. 本文报道了一个典型热带地区富营养化湖泊中浮游植物脂肪酸组成与分布,探讨了浮游植物群落特征与脂肪酸组成之间的关系.

1 采样与分析方法

在我国热带地区,自然湖泊稀少,仅有的湖泊均为重要的景观水体. 星湖是广东省著名的旅游风景区,位于肇庆市北郊(112°23'E, 23°6'N),具有热带季风区的气候特征,平均气温为 22℃,是一个典型的热带湖泊,处于我国热带地区北缘. 它由 5 个子湖即仙女湖、里湖、中心湖、波海湖和青莲湖组成,正常水位面积 6.24 km². 本文以其中的两个子湖——仙女湖和中心湖作为研究水体. 仙女湖的水面面积相对较小(1.42 km²),水深 2 m 左右,水力滞留时间约 135 d. 仙女湖受到一定程度的污染,部分沉水植物遭到破坏;而中心湖水面面积为 2.12 km²,水深为 3 m,湖水滞留时间约 255 d,无沉水植物.

于 2002 年 7、10、12 月在仙女湖和中心湖的湖心处采样. 营养盐、浮游植物的计数样品的采集与测定参考标准方法^[8];脂肪酸样品的采集是取表层水,立即用孔径为 110 μm 的筛网过滤掉大型浮游动物及悬浮颗粒物,然后再经 0.47 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤出浮游植物,记下此次过滤水样的体积. 滤膜置于干冰中带回实验室,经冻干机冷冻干燥后,置 -20℃ 冰箱中保存备用.

考虑到自然水体中的微藻脂肪酸含量较少,参考彭兴跃^[9]等方法将藻类脂肪酸甲酯化. 采用美国 Thermo Finnigan 公司的 TRACE GC-MS 气相色谱-质谱联用仪进行脂肪酸的色谱-质谱分析. 色谱条件:载气为高纯氦气;柱流量为 1.2 ml/min;进样口温度 280℃;柱温 60-250℃,以 2.5℃/min 的速度程序升温. 质谱条件:电离方式为 EI,电离电压为 70 eV.

2 结果

仙女湖和中心湖的营养盐浓度均较高. 同期相比,中心湖的 TN 浓度明显高于仙女湖,而 TP 浓度也稍高于仙女湖. 两个湖泊的氮盐均是以有机氮为主,溶解无机氮(DIN)占总氮的比率很小,而且中心湖的溶解无机氮占总氮的比率要小于仙女湖,表明中心湖的有机污染很严重. 两个湖泊的无机氮浓度都是以硝酸盐为主,约占 DIN 的 85% 以上. 三次采样,两个湖泊的三种无机氮浓度均有较大波动,尤其是 12 月的无机氮浓度明显低于 7 月和 10 月,但两个湖泊之间的无机氮浓度相差不大(表 1).

3 次采样仙女湖共发现浮游植物 79 种,分属蓝藻门 16 种,绿藻门 40 种,硅藻门 14 种,其他藻类共 9 种;中心湖共发现浮游植物 75 种,其中蓝藻门 17 种,绿藻门 34 种,硅藻门 14 种,其他藻类共 10 种. 仙女湖的优势种属主要有平裂藻(*Merismopedia* sp.)、席藻(*Phormidium* sp.)和捏团粘球藻(*Gloeocapsa magma*)等富营养性指示种,季节间差异不明显;而中心湖的优势种属较多,在不同季节变化较大. 如在 7 月和 10 月,蓝藻门的螺旋藻(*Spirulina* sp.)、蓝纤维藻(*Dactylococcopsis* sp.)、颤藻(*Oscillatoria* sp.)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)、弯形尖头藻(*Raphidiopsis curvata*)和席藻、平裂藻等成为中心湖的优势种属,而在 12 月则被金藻门的分歧锥囊藻(*Dinobryon divergens*)取代成为优势种. 两个子湖这些优势种的优势度均很高. 在仙女湖中,7 月和 10 月的席藻相对丰度均达到 60% 以上,12 月时,席藻、平裂藻和粘球藻成为优势种,共占总数量的 84.6%. 在 7 月和 10 月的中心湖中,席藻和平裂藻的数量共占 90% 以上,而在 12 月时,金藻的

数量很高,约占浮游植物总数的75%,成为该时期浮游植物的优势种属. 需要指出的是,金藻门的分歧锥囊藻通常被认为是清洁水体的指示种,而在中心湖这样的富营养化水体中大量出现,并成为优势种的原因是值得深入探讨的.

表 1 仙女湖和中心湖的营养盐浓度 (mg/L)

Tab.1 The concentration of nutrients in the two sub-lakes of Lake Xinghu

湖泊	时间(月-日)	TN	DIN	DIN/TN	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₃ -N	TP	PO ₄ -P
仙女湖	07-02	0.729	0.309	0.425	0.285	-	0.024	0.026	0.005
	0.016	10-02	0.869	0.238	0.274	0.204	-	0.033	0.026
	12-02	0.892	0.139	0.156	0.135	0.001	0.004	0.052	0.010
中心湖	07-02	1.642	*	0.015	*	0.001	0.023	0.026	-
	0.011	10-02	1.335	0.250	0.187	0.216	-	0.033	0.050
	12-02	1.424	0.180	0.127	0.170	0.001	0.009	0.045	0.006

* 表示数据缺失; - 表示未检出.

仙女湖和中心湖的浮游植物群落结构是以蓝藻占主导,其蓝藻平均数量分别可达到 8.55×10^6 cells/L 和 29.70×10^6 cells/L(表 2). 仙女湖和中心湖的绿藻和硅藻数量相对蓝藻而言则低很多. 3 次采样中,仙女湖和中心湖的绿藻平均数量均为 0.57×10^6 cells/L,而硅藻数量则在 $(0.05-0.54) \times 10^6$ cells/L 之间. 其它种类,如甲藻,裸藻和隐藻等的数量都比较低. 但在 12 月时金藻成为了中心湖的优势种,数量达到 12.69×10^6 cells/L,但 7 月和 10 月的金藻数量很低;而仙女湖在 3 次采样中金藻的数量均很低. 中心湖的裸藻数量比仙女湖要高. 仙女湖检出一定数量的隐藻,而中心湖则没有检出. 两个子湖的甲藻数量相差不大.

表 2 仙女湖和中心湖的蓝藻、绿藻硅藻和金藻丰度 ($\times 10^6$ cells/L)
Tab.2 Abundances of Cyanophyta, Chlorophyta, Bacillariophyta and Chrysophyta in the two sub-lakes of Lake Xinghu ($\times 10^6$ cells/L)

		蓝藻	绿藻	硅藻	金藻
仙女湖	Jul-02	1.102	0.149	0.050	0.006
	Oct-02	19.518	0.302	0.424	0.002
	Dec-02	5.031	1.236	0.534	0.633
中心湖	Jul-02	50.078	0.707	0.089	0.000
	Oct-02	35.592	0.281	0.361	0.003
	Dec-02	3.432	0.720	0.078	12.690

图 1 为典型的实测样品气相色谱图. 虽然样品量比较少,但背景(基线波动)对脂肪酸组分的干扰较小,各组分的色谱峰仍清晰可辨相互间完全分离,说明本文中所采用的测定方法及来自现场采样的样品量已足够提供准确可靠的脂肪酸数据.

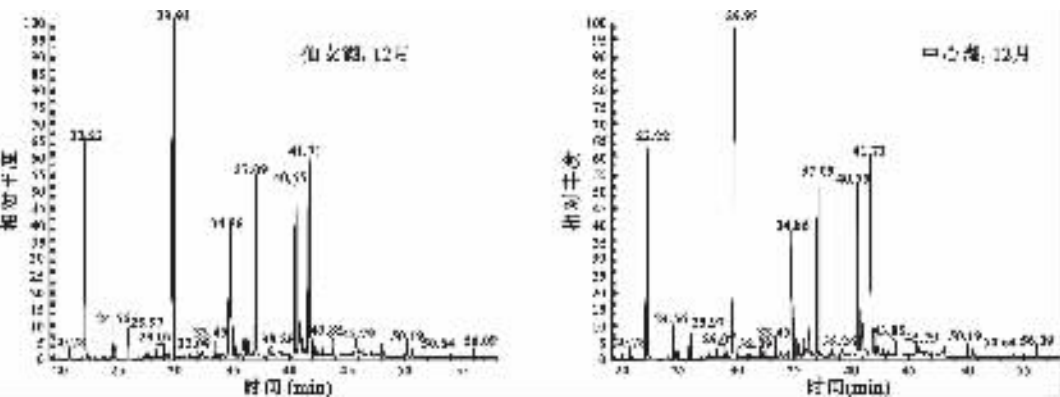


图 1 仙女湖和中心湖 12 月的浮游植物脂肪酸甲酯 GC-MS 谱图

Fig.1 Typical GC-MS charts of fatty acids methyl ester of the phytoplankton in two sub-lakes of Lake Xinghu (Dec., 2002)

在同一采样时间内,仙女湖和中心湖的总脂肪酸浓度相差不大,而且在同一子湖中,均是 7 月水样的脂

肪酸浓度最高,12月样品的脂肪酸浓度最低(图2).除仙女湖7月外,各水样的脂肪酸都是以饱和脂肪酸浓度为主,单不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA)浓度相对较低,尤其是中心湖的7月和10月样品中几乎只检测到饱和脂肪酸.两个湖泊的各类脂肪酸浓度分布最明显的特征是在蓝藻的数量高峰期,即仙女湖的10月和中心湖的12月,浮游植物的饱和脂肪酸均较高,而单不饱和脂肪酸和高不饱和脂肪酸的含量则较低.

从单一脂肪酸种类来看,水样中所检测到的脂肪酸为16碳到22碳的饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸13种(表3).其中饱和脂肪酸有C16:0,C18:0和C20:0,并以C16:0浓度为主;单不饱和脂肪酸有C16:1,C18:1和C20:1,以C16:1和C18:1浓度较高;多不饱和脂肪酸种类较多,以C18:2,20:5(EPA)和C22:6(DHA)为主.

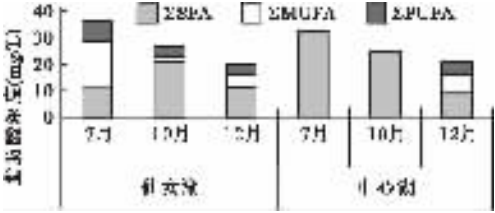


图2 各类脂肪酸的浓度分布(ΣSFA,ΣMUFA,ΣPUFA 分别表示饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、高不饱和脂肪酸浓度)

Fig. 2 The distribution of fatty acid groups in the two sub-lakes of Lake Xinghu

仙女湖的脂肪酸种类很多,而且在3次采样中几乎没有什么差别.仙女湖主要的脂肪酸为C16:0,C18:0,C18:1,C16:1,C18:2;另外EPA和DHA也有一定的浓度.这几种脂肪酸的浓度变化决定了饱和脂肪酸(SFA),单不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA)的浓度高低.仙女湖7月样品中以C18:1的含量最高,其次是C16:1,饱和脂肪酸C16:0和C18:0的含量相对较低,这就是上述7月样品的MUFA浓度高于SFA的原因;而在10月和12月样品中均以C16:0的含量最高,因此其SFA的浓度要高于MUFA.与仙女湖的脂肪酸组成不同,中心湖的脂肪酸种类和浓度均变化较大.7月和10月中心湖仅检测到3种饱和脂肪酸,但12月

月的脂肪酸种类则达到11种,包括各种饱和及不饱和脂肪酸.7月各种脂肪酸的浓度均相对较高,总脂肪酸浓度为32.6 μg/L.其中C16:0的浓度最高,为25.8 μg/L,C20:0的浓度相对最少,但也有0.7 μg/L.10月中心湖各种饱和脂肪酸的浓度均较7月样品低,总脂肪酸浓度为24.8 μg/L.在12月样品中,除了C16:0外,其它脂肪酸的浓度均明显小于7月样品.

3 讨论

蓝藻的脂肪酸组成中饱和脂肪酸(SFA)含量较高,其中以C16:0含量最高,而高不饱和脂肪酸(PUFA)含量很低^[6].C16:0在动植物中是含量最高的脂肪酸之一,也是仙女湖和中心湖水样中含量最多的脂肪酸,占总脂肪酸含量的16%~80%,其含量与蓝藻的数量成显著正相关($R^2 = 0.955, P = 0.001$).C16:0主要来源于蓝藻,因此以蓝藻为优势的水体饱和脂肪酸含量较高.

一般认为淡水藻类的脂肪酸主要是16碳和18碳的,基本不含海产藻类所特有的DHA和EPA^[10-12].但曹吉祥^[13]等指出有四种淡水隐藻及硅藻含有大量的EPA和DHA.在本文中,仙女湖和中心湖的样品中水样中也检测到多种PUFA,以EPA和DHA为主.这说明了无论是在实验室单藻培养的,还是自然水体中的淡水藻类都含有EPA和DHA.通常隐藻的PUFA组成中,EPA、DHA含量较高,特别是EPA,其含量可达

表3 仙女湖和中心湖脂肪酸浓度(μg/L)分布
Tab. 3 The concentration of fatty acids in the two sub-lakes of Lake Xinghu

脂肪酸	仙女湖			中心湖		
	12月	7月	10月	12月	7月	10月
C16:0	5.980	17.568	8.061	25.840	19.268	6.667
C18:0	4.082	3.178	2.551	6.049	4.811	1.575
C20:0	0.571	0.371	0.349	0.711	0.391	0.806
C16:1	7.067	0.596	2.047	-	-	2.102
18:1	10.038	0.938	3.178	-	0.298	4.444
C20:1	0.705	0.126	0.102	-	-	0.273
C18:2	3.018	1.912	1.475	-	-	2.617
C18:3	0.334	0.138	0.094	-	-	0.186
C20:2	-	-	0.058	-	-	0.105
C20:3	0.327	-	-	-	-	-
C20:4	0.497	0.507	0.307	-	-	0.601
C20:5	1.298	0.611	0.944	-	-	-
C22:6	2.108	-	0.483	-	-	1.108

- 表示未检出.

到 15.53%;硅藻的主要脂肪酸为 C16:0、C16:1 和 EPA,隐藻和硅藻的 EPA 含量较高也是在水产养殖业上广泛采用这两类藻作为饵料的主要原因^[6,13]。仙女湖三个季节的浮游植物群落均含有较多数量的硅藻和隐藻,因此其 EPA 浓度相对较高;在 7 月,仙女湖还有较高的 DHA 浓度,这与该时期甲藻的高生物量相对应。甲藻脂肪酸组成的特性之一是有高含量的 DHA^[14,15]。

通常,C16:0 和 C16:1 在硅藻中含量较高,但前者含量较低^[16,17],这在其他藻类中是很少见的。因此 C16:1/C16:0 > 1 是硅藻的脂肪酸特征,如果浮游植物中 C16:1/C16:0 > 1 则反映了硅藻在该群落中的优势地位^[18]。在本研究中,仙女湖 7 月的样品中含有较高浓度的 EPA 和 C16:1,并且 C16:1/C16:0 > 1,而其它样品的 C16:1/C16:0 < 1。但在另一方面,硅藻的脂肪酸组成通常缺乏高含量的 C18:1,而仙女湖 7 月样品中 C18:1 的浓度达到 10.038 $\mu\text{g/L}$,是该样品中浓度最高的脂肪酸。仙女湖 7 月样品的脂肪酸组成特点虽然可以反映出硅藻的存在,但是该时期硅藻并不是浮游植物群落的优势种,仍然是蓝藻占主导地位。因此仙女湖 7 月的脂肪酸组成特征与浮游植物组成特征不相一致,浮游植物群落中较低的硅藻数量却表现出明显的硅藻脂肪酸特征。这种不一致可能是环境因子对藻类脂肪酸组成影响的结果,也可能与藻类本身有关。藻类既可生化合成脂肪酸,也可分解释放脂肪酸。因此某种藻类和某种脂肪酸的含量高低有时在水体中常一致,有时则相反,可随藻类种类的变化而改变。

中心湖三次采样的浮游植物脂肪酸组成差异显著。中心湖 7 月和 10 月脂肪酸种类很少,只检测出三种饱和脂肪酸,而不饱和脂肪酸未见检出。但在 12 月时脂肪酸种类很丰富,检出饱和脂肪酸 3 种,单不饱和脂肪酸 3 种,多不饱和脂肪酸 7 种。这主要是因为 12 月时中心湖的金藻代替了蓝藻成为该时期的优势种。金藻具有独特的脂肪酸特征,其脂肪酸种类多,PUFA 浓度很高。金藻是同时含有 EPA 和 DHA 的少数藻类,而绝大多数藻类中 DHA 含量很低^[19]。因此,中心湖 12 月浮游植物的脂肪酸组成表现出相应的特征。由于金藻的大量出现,使得中心湖 12 月的脂肪酸种类较多,而且不饱和脂肪酸的浓度相当高。在多不饱和脂肪酸中,尤以 C22:6 和 C20:4 浓度丰富。这些脂肪酸特征都体现了金藻的大量存在。中心湖 7 月和 10 月时蓝藻的相对丰度均在 97% 以上,占有绝对优势,其浮游植物脂肪酸仅检测到饱和脂肪酸。

7 月和 10 月的中心湖和仙女湖均是蓝藻占优势,其蓝藻的相对数量丰度均在 67% 以上,其它藻类的数量很少,因此这两个时期的中心湖和仙女湖的浮游植物群落结构特征相差不大。但是,浮游植物的脂肪酸组成特征则差异明显。中心湖的脂肪酸组成较简单,仅检测到较高浓度的饱和脂肪酸;仙女湖的脂肪酸种类丰富,各种饱和及不饱和脂肪酸的浓度均较丰富。这种差异的产生可能在于环境因子的不同。浮游植物群落的脂肪酸组成不仅决定于藻类组成,同时也受环境因子的影响。营养状况、温度、pH 值、光周期、光强度以及光质量等也会影响微藻细胞的脂肪酸构成^[20]。仙女湖和中心湖同是星湖的子湖,其气候、地理状况,太阳辐射,温度, pH 值和光周期等环境因子差别很小,对两个子湖浮游植物脂肪酸组成差异的影响应较小。两个湖泊环境因子的差异主要在于湖水滞留时间,营养盐浓度等的不同。如仙女湖的湖水滞留时间较中心湖要短得多,中心湖的有机污染比仙女湖严重,各种营养盐浓度也是中心湖要高于仙女湖。因此两个湖泊脂肪酸组成的差异很有可能是由水动力学和营养盐水平的不同引起的。仙女湖和中心湖在浮游植物群落结构相似的情况下其脂肪酸组成却呈现出明显的差异,这就为浮游植物群落的脂肪酸研究提出了一个新的问题,不同环境因子对浮游植物群落脂肪酸的影响还需要进一步的研究。

4 结论

仙女湖和中心湖是富营养化水体,其中中心湖的富营养化程度相对较高。仙女湖的浮游植物群落在调查期间均是以蓝藻为优势;而中心湖在 7 月和 10 月的浮游植物也是以蓝藻占绝对优势,但是在 12 月时浮游植物群落由金藻代替蓝藻成为该时期的优势种群。中心湖的浮游植物数量远高于仙女湖的浮游植物数量,尤其是蓝藻和金藻的数量。

样品中检测到的脂肪酸为 C16 - C22,其中饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸种类较少,均只有 3 种;但高不饱和脂肪酸的种类相对较多。在多不饱和脂肪酸中也检测到 EPA 和 DHA,这对于重新评价淡水藻类的营养价值及其在能量转移的作用很有意义。

对单一的脂肪酸种类来说,C16:0 是含量最高的脂肪酸。其含量与蓝藻数量有很高的相关性,表明样品

中的 C16:0 主要来源于蓝藻,这也反映了仙女湖和中心湖的富营养化特征. 而 EPA 主要来源于硅藻和隐藻;在中心湖中高含量的 DHA 主要来源于金藻. 脂肪酸的组成结构基本反映了浮游植物群落的结构特征.

5 参考文献

- [1] Izquierdo M S. Effect of n-3 HUFA levels in artemia on growth of larval Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture*, 1992, (1): 73 – 82.
- [2] Ahlgren G, Lundsted L, Brett M T, *et al.* Lipid composition and food quality of some freshwater phytoplankton for cladoceran zooplankters. *J Plank Res*, 1990, **12** (4): 809 – 818.
- [3] Muller-Navarra D C. Evidence that a highly unsaturated fatty acid limits *Daphnia* growth in nature. *Arch Hydrobiol*, 1995, **132** (3): 297 – 307.
- [4] Brett M T, Muller-Navarra D C. The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic foodweb processes. *Freshwat Biol*, 1997, **38**: 483 – 499.
- [5] Muller-Navarra D C, Brett M T & Anne M. A highly unsaturated fatty acid predicts carbon transfer between primary producers and consumers. *Nature*, 2000, **403** (6): 4 – 77.
- [6] Ahlgren G, Gustafsson I B & Boberg M. Fatty acid content and chemical composition of freshwater microalgae. *J Phycol*, 1992, **28**: 37 – 50.
- [7] Napolitano G E, Ricardo D P, Gayoso A M, *et al.* Fatty acids as trophic markers of phytoplankton blooms in the Bahia Blanca Estuary (Buenos Aires, Argentina) and in Trinity Bay (Newfoundland, Canada). *Biochem Sys and Eco*, 1997, **25** (8): 739 – 755.
- [8] 金相灿, 屠清瑛主编. 湖泊富营养化调查规范. 第 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [9] 彭兴跃, 王大为, 徐立等. 毫克级微藻样品中脂肪酸的分离及测定. 台湾海峡, 1998, **7** (3): 289 – 293.
- [10] Cohen Z, Vonshak A, Richmond A. Fatty acid composition of *spirulina* strains grown under various environmental conditions. *Phytochemistry*, 1987, **26** (8): 2255 – 2258.
- [11] Isik O, Sarihan E, Kusvuran E, *et al.* Comparison of the fatty acid composition of the freshwater fish larvae *Tilapia Zillii*, the rotifer *Brachionus calyciflorus*, and the microalgae *Scenedesmus abundans*, *Monoraphidium minutum* and *Chlorella vulgaris* in the algae-rotifer-fish larvae food chains. *Aquaculture*, 1999, **174**: 299 – 311.
- [12] Sushchik N N, Kalacheva G S, Giadyshev M I. Secretion of free fatty acids by prokaryotic and eukaryotic algae at optimal, superoptimal, and suboptimal growth temperatures. *Microbiology*, 2001, **70** (5): 329 – 635.
- [13] 曹吉祥, 李德尚, 王金秋. 10 种淡水常见浮游藻类营养组成的研究. 中山大学学报(自然科学版), 1997, **36** (2): 22 – 27.
- [14] Zhukova N V, Aizdaicher N A. Fatty acid composition of 15 species of marine microalgae. *Phytochemistry*, 1995, **39** (2): 351 – 356.
- [15] 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.
- [16] Brown M R, Jeffrey S W & Garland C D. Nutritional aspects of microalgae used in mariculture: a literature review. CSIRO Marine Laboratories, 1989: 205.
- [17] Kayama M S & Sato A S. Lipids of marine plants. In: Marine biogenic lipids, fats, and oils, Vol. II. Boca Raton: CRC Press, 1989: 3 – 48.
- [18] Napolitano G E, Ackman R G & Ratnayake M W. Fatty acid composition of three cultured algal species (*Isochrysis galbana*, *Chaetoceros gracilis* and *C. calcitrans*) used as food for bivalve larvae. *J World Aquaculture Soc*, 1990, **21**: 122 – 130.
- [19] 詹冬梅, 孙世英, 梁英. 十九株海洋金藻的总脂含量及脂肪酸组成. 海水养殖, 2000, **55**: 28 – 32.