

风信子鹿角珊瑚繁殖前后脂质与脂肪酸的变化

郭少华^{1,2,3}, 黄晖^{1,2}, 刘胜¹, 袁翔成¹, 练健生¹, 雷新明¹, 陈标^{1,2,3}

1. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院海南热带海洋生物实验站, 海南 三亚 572000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 采用氯仿-甲醇混合液提取法及气相色谱-质谱联用法, 首次对造礁石珊瑚(风信子鹿角珊瑚 *Acropora hyacinthus*) 繁殖前后脂质与脂肪酸的变化进行了研究。研究结果表明: 1) 繁殖过程对风信子鹿角珊瑚脂质含量、组织含量有较大影响。繁殖过后风信子鹿角珊瑚脂质含量减少约 43.4%, 组织含量减少约 19.6%, 而共生藻密度在繁殖过程中并无显著性变化; 2) 风信子鹿角珊瑚在繁殖前脂质含量大量累积, 以顺利完成繁殖过程; 3) 首次表明二十碳五烯酸(C20:5n-3, eicosapentamethic acid, EPA)、二十二碳六烯酸(C22:6n-3, docosahexaenoic acid, DHA)是造礁石珊瑚繁殖过程中重要的脂肪酸, 其含量在繁殖过程中具有显著变化。EPA 含量繁殖前从 15.7 $\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$ 增加到 22.16 $\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 增加 41.1%, 而繁殖后降为 15.06 $\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 减少 32.0%; DHA 含量繁殖前从 18.17 $\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$ 增加到 24.81 $\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 增加 36.5%, 而繁殖后降为 16.31 $\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 减少 34.3%。此外, 多聚不饱和脂肪酸(poly-unsaturated fatty acids, PUFAs)含量在繁殖后也显著性减少; 4) 造礁石珊瑚繁殖时可能会适当增加摄食, 以满足繁殖过程对脂肪酸和能量的需求。

关键词: 繁殖; 造礁石珊瑚; 脂质; 脂肪酸

中图分类号: Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)01-0074-07

Variation of lipid and fatty acid contents in the reef coral *Acropora hyacinthus* between prereproduction and postreproduction

GUO Shao-hua^{1,2,3}, HUANG Hui^{1,2}, LIU Sheng¹, YUAN Xiang-cheng¹, LIAN Jian-sheng¹, LEI Xin-ming¹, CHEN Biao^{1,2,3}

1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Tropical Marine Biological Research Station in Hainan, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Lipid and fatty acid contents were firstly monitored in the reef coral *Acropora hyacinthus* during its reproductive cycle by using chloroform-methanol mixture extraction method and gas chromatography-mass spectrometry. The results are summarized here. The lipid content and tissues of the reef coral *A. hyacinthus* fluctuated markedly during the reproductive process, with the lipid content decreased drastically by approximately 43.4% and the tissues reduced by about 19.6% after reproduction. However, there was no significant difference in symbiotic algae density during the breeding process, implying that the eggs were probably without zooxanthellae. The reef coral *A. hyacinthus* accumulated lipid in the process of reproduction preparing. EPA (C20:5n-3, eicosapentamethic acid) and DHA (C22:6n-3, docosahexaenoic acid) played important roles in reproduction, since their contents changed significantly during this process. EPA and DHA increased by 41.3% and 36.5%, respectively, before breeding. However, their contents decreased by 32.0% and 34.3%, respectively, after breeding. Meanwhile, the content of poly-unsaturated fatty acids (PUFAs) also reduced appreciably, suggesting that they were intimately bound up with the reproduction.

收稿日期: 2013-01-10; 修订日期: 2013-01-29。林强编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-227); 国家海洋局公益性项目(201105012-2; 201005012-6); 国家青年科学基金(41106107); LMEB201001

作者简介: 郭少华(1987~), 男, 江西省吉安市人, 硕士研究生, 研究方向为珊瑚生理生态学。E-mail: gsh1211@gmail.com

通信作者: 黄晖。E-mail: huanghui@sciso.ac.cn

Scleractinian corals likely increased feeding to meet the need of fatty acids and energy during the reproductive process.

Key words: reproduction; scleractinian coral; lipid; fatty acid

脂质与脂肪酸在动物繁殖过程中具有重要的生理作用: 一方面, 脂质和脂肪酸作为主要的储能物质, 能满足繁殖过程中大量的能量需求 (Edmunds, et al, 1986); 另一方面, 某些特定脂肪酸[如二十碳五烯酸(C20:5n-3, eicosapentamethic acid, EPA)、二十二碳六烯酸(C22:6n-3, docosahexaenoic acid, DHA)等必需脂肪酸]的含量能影响卵子质量 (Surai, et al, 2000; Rooke, et al, 2001)。近年来, 在珊瑚研究中也证实了这点。珊瑚中脂质含量丰富, 能占其成体组织干重的 10%~40%, 幼体干重的 50%~80% (Lucas, et al, 1979; Leuzinger, et al, 2003; Tchernov, et al, 2004; Rodrigues, et al, 2008)。珊瑚繁殖过程中脂质含量会大量减少, 甚至达 85% 左右 (Leuzinger, et al, 2003), 以保证繁殖过程的顺利进行。此外, 脂质的含量及组成也是决定珊瑚幼体正常发育的重要因素。当脂质能量低于某个阈值时, 珊瑚的浮浪幼虫便无法附着和正常变态发育 (Lucas, et al, 1979)。除在繁殖过程具有重要作用之外, 脂质与脂肪酸还与珊瑚白化相关, 如脂肪酸的不饱和程度影响珊瑚的耐热性 (Tchernov, et al, 2004), 含量丰富的脂质有助于珊瑚延缓白化, 增加对逆境的抵抗能力 (Rodrigues, et al, 2008; Anthony, et al, 2009)。因此, 他们的含量及组成常用于反映珊瑚的生理状况 (Rodrigues, et al, 2007; Saunders, et al, 2006)。

目前, 对珊瑚脂质与脂肪酸的研究主要集中于加勒比海、红海、日本海、夏威夷及大堡礁 (Imbs, et al, 2012; Papina, et al, 2007; Rodrigues, et al, 2007; Saunders, et al, 2006), 而对我国近海的珊瑚尚未有研究报导。已有研究表明, 脂质和脂肪酸与珊瑚的生理状况密切相关, 然而对于珊瑚繁殖前后脂质与脂肪酸的变化目前的研究还很少。而在与珊瑚分类上较为接近的物种如海肾 *Renilla koellikeri* 等的研究中发现, 海肾在繁殖 EPA 和花生四烯酸 (C20:4n-6, arachidonic acid, AA) 大量累积 (Pernet, et al, 2002)。为此, 本研究拟选取三亚湾常见珊瑚种风信子鹿角珊瑚 *Acropora hyacinthus* 为研究对象, 监测其繁殖前后脂质与脂肪酸的变化, 以探究造礁石珊瑚繁殖过程中对脂肪酸的需求情况, 同时通过分析脂质含量及脂肪酸的生化组成, 对揭示珊瑚的生理状况提供一些信息。

1 材料与方法

1.1 样品的采集及保存

在三亚市鹿回头珊瑚礁保护区站位 (18°12'49"N, 109°28'17"E) (图 1) 采集风信子鹿角珊瑚 *Acropora hyacinthus*, 采样时间分别为 2012 年 3 月 15 日、4 月 6 日、4 月 14 日, 采样范围约为 2m×2m, 水深约为最低低潮线 2m。采样珊瑚来自同一群体向阳小分枝, 采样长度约为 5cm。采集的样品立即用液氮固定, 保存在-20℃冰箱中, 所有样品的分析和处理在半个月内完成 (Harland, et al, 1993)。珊瑚排卵时间通过珊瑚水下体表颜色的变化来判断, 深棕红色暗示即将产卵 (Ward, 1995), 同时采集的珊瑚断枝面部位亦可观察到有发育成熟的卵子。4 月 8 日晚于水下观察到珊瑚排卵行为。整个采样期间未监测到海水水温异常, 也未观察到珊瑚白化。

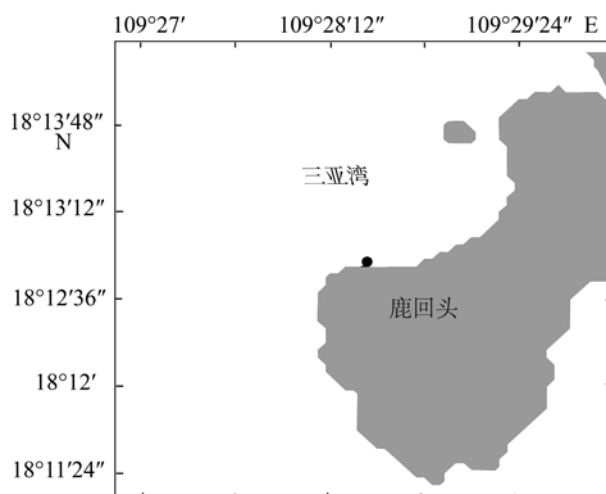


图 1 采样站位 (●) 位置示意图

Fig. 1 The station used for collecting samples

1.2 共生藻密度与组织含量的测定

共生藻密度的测定参照李秀保等 (2006) 方法: 用美国洁碧洗牙器 (WP70-EC) 冲洗珊瑚表面, 并量取一定体积的冲洗液 (15mL) 于血球计数板下计数, 重复 8 次, 取平均值。珊瑚组织含量的测定参照 Fitt, et al (2000) 方法: 将珊瑚样品于 60℃ 下烘干 24h 后称量干重, 然后于马弗炉下 400℃ 煅烧 4h 后称量灰重。前后质量之差即为珊瑚组织含量。以上数据均统一化为珊瑚表面积。珊瑚表面积的测定采用铝箔法 (李秀保等, 2006)。

1.3 珊瑚脂质的提取

参照 Rodrigues, et al(2007)方法:取一定量珊瑚样品(湿重约 1g)以甲醇-氯仿混合液(体积比 1:2)提取, 1g 珊瑚约加 20mL 甲醇-氯仿混合液于黑暗下萃取 24h, 然后将萃取液中的有机相于无氧环境中蒸发烘干称重即得珊瑚脂质含量。珊瑚脂质含量最后均一化为珊瑚组织灰重。珊瑚组织灰重为珊瑚烘干后质量与煅烧后的质量之差。

1.4 脂肪酸的分析与鉴定

参照 Imbs, et al(2012)方法:将提取的脂质加 $\text{BF}_3\text{-CH}_3\text{OH}$ 溶液于 75℃ 甲酯化, 冷却至室温后加入正己烷标定后用气质联用以分析脂肪酸组分。色谱柱型号为 Agilent DB-FFAp (30m×0.25mm×0.50μm), 以高纯氮为载气, 流速 $1.1\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样口温度为 230℃, 检测器温度为 250℃。程序升温过程: 130℃

保持 1min, 然后以 $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 250℃ 保持 5 min。质谱条件:检测器为 MSD, 电离能源 70eV, 扫描范围为 m/z 50~550, 溶剂延迟 3min。峰的鉴定采用谱库自动检索, 确定各脂肪酸组分所在位置, 以面积归一化法得到各脂肪酸组分的相对含量, 再根据每种脂肪酸相对于 C19:0 内标的峰面积来计算各脂肪酸组分的含量。脂肪酸含量最后均一化为珊瑚组织灰重。脂肪酸的分离与分析在兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室完成。

1.5 数据的分析与处理

实验数据采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 用单因素方差分析和 LSD 多重比较进行差异显著性检验。实验数据均以平均数±标准差表示, 实验结果以 SigmaPlot 10.0 绘制成图。

2 结果

2.1 繁殖前后共生藻密度及组织含量的变化

风信子鹿角珊瑚共生藻密度约为 2×10^6 个· cm^{-2} , 繁殖前共生藻密度显著增加($p<0.05$), 但繁殖后共生藻密度并未降低(图 2)。繁殖前后共生藻密度之间无显著差异($p>0.05$)。风信子鹿角珊瑚组织含量为 $8.2 \sim 10.2\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$, 繁殖过程中组织含量先增加后减少(图 2)。排卵后, 组织含量与排卵前相比显著减少($p<0.05$), 减少了约为 19.6%。

2.2 繁殖前后脂质含量的变化

脂质含量约占风信子鹿角珊瑚组织灰重(gdw)的 35%, 繁殖过程中脂质含量先增加后减少(图 3)。排卵前的 20d 时间内, 脂质含量迅速增加, 从 $0.42\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$ 显著增加至 $0.53\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$ ($p<0.05$); 排卵后, 脂质含量显著减少($p<0.01$), 减少约 43.4%。

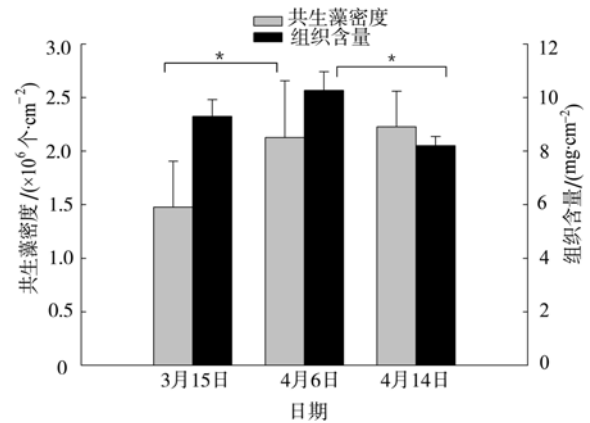


图 2 风信子鹿角珊瑚繁殖前后共生藻密度及组织含量的变化

* 表示统计差异显著, $p<0.05$

Fig. 2 Variation of symbiotic algae density and tissues between prereproduction and postreproduction

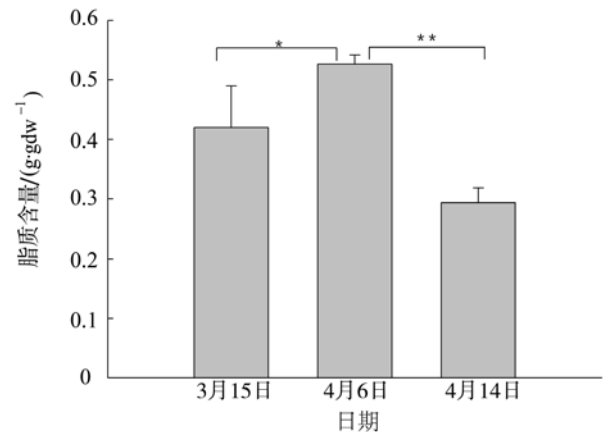


图 3 风信子鹿角珊瑚繁殖前后脂质含量的变化

* 表示统计差异显著, $p<0.05$; ** 表示统计差异极其显著, $p<0.01$

Fig. 3 Variation of lipid between prereproduction and postreproduction

2.3 繁殖前后脂肪酸的变化

风信子鹿角珊瑚含有丰富的饱和脂肪酸和多聚不饱和脂肪酸, 主要的脂肪酸为: C16:0、C18:0、C18:1n-9、C18:3n-6、C20:5n-3 和 C22:5n-3, 其中饱和脂肪酸约占总脂肪酸含量的 46.7%~59.3%, 多聚不饱和脂肪酸含量约占总脂肪酸含量的 28.9%~37.1%(表 1)。除常见脂肪酸外, 风信子鹿角珊瑚中还检测到少量的奇数碳链脂肪酸和反式脂肪酸。 $n-3$ 和 $n-6$ 系列的脂肪酸在风信子鹿角珊瑚脂肪酸构成中占有重要的比例。繁殖前后脂肪酸的含量发生显著变化, 尤其表现为总的饱和脂肪酸和多聚不饱和脂肪酸(表 1, $p<0.05$), 而脂肪酸的组成并未发生改变。在排卵前, 风信子鹿角珊瑚中各系列的脂肪酸含量均相当丰富, 而繁殖过后各脂肪酸含

量均有不同程度降低。其中, EPA、DHA 等含量的变化尤为明显。繁殖前 EPA 含量从 $15.7\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$ 增加到 $22.16\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 增加 41%, 而繁殖后降为 $15.06\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 减少 32%; 繁殖前 DHA 含量从

$18.17\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$ 增加到 $24.81\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 增加 36.5%, 而繁殖后降为 $16.31\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$, 减少 34.3% (图 4, $p<0.05$)。另外, $n-3/n-6$ 脂肪酸含量的比值也是随着繁殖过程先增加后减少(表 1)。

表 1 风信子鹿角珊瑚繁殖前后珊瑚脂肪酸的变化
Tab. 1 Variation of fatty acids between prereproduction and postreproduction of *Acropora hyacinthus*

脂肪酸	含量/($\mu\text{g}\cdot\text{gdw}^{-1}$)		
	3 月 15 日	4 月 6 日	4 月 14 日
C10:0	0.11±0.01	0.30±0.02	0.20±0.01
C12:0	0.41±0.02	0.46±0.04	0.49±0.09
C14:0	12.46±0.69	23.05±2.96	6.71±0.92
C14:1	12.11±1.06	22.39±1.46	7.47±1.87
C15:0	0.20±0.01	0.31±0.07	0.21±0.01
C15:0 (iso)	0.69±0.09	0.56±0.17	0.54±0.05
C16:0	114.47±6.28	240.18±4.30	106.81±3.98
C16:1 <i>n</i> -9	0.25±0.00	0.31±0.03	0.36±0.06
C16:1 <i>n</i> -7	9.25±0.45	13.56±1.24	6.36±1.01
C16:2 <i>n</i> -4	0.47±0.01	0.85±0.06	0.37±0.03
C16:4 <i>n</i> -1	0.38±0.03	0.53±0.08	0.37±0.07
C17:0	7.47±0.71	0.77±0.11	0.13±0.01
C17:1	1.52±0.12	2.77±0.54	0.80±0.57
C18:0	16.37±0.44	14.08±1.72	16.25±1.07
C18:1 <i>n</i> -7	0.79±0.06	0.89±0.09	0.39±0.10
C18:1 <i>n</i> -9	16.32±0.38	8.27±2.53	14.13±0.16
C18:2 <i>n</i> -9	0.78±0.03	1.29±0.09	0.96±0.46
C18:2 <i>n</i> -6	9.73±0.69	7.68±2.63	3.72±0.14
C18:3 <i>n</i> -6	27.99±2.17	15.32±4.45	20.64±2.09
C18:3 <i>n</i> -3	1.78±0.22	0.75±0.19	0.29±0.10
C18:4 <i>n</i> -3	3.72±0.94	5.36±0.27	2.97±0.38
C20:0	2.66±0.10	5.30±0.36	2.28±0.18
C20:1 <i>n</i> -9	5.00±1.48	6.10±0.46	4.03±0.71
C20:2 <i>n</i> -6	0.35±0.08	0.62±0.10	0.33±0.05
C20:3 <i>n</i> -6	0.85±0.15	2.87±0.84	0.88±0.16
C20:3 <i>n</i> -6t	4.55±0.36	8.17±0.87	3.63±0.25
C20:4 <i>n</i> -6	7.80±1.07	7.50±0.72	13.20±0.19
C20:4 <i>n</i> -3	0.55±0.66	0.82±0.19	0.40±0.04
C20:5 <i>n</i> -3	15.70±2.14	22.16±1.93	15.06±2.46
C22:2	0.57±0.03	1.20±0.10	0.11±0.03
C22:4 <i>n</i> -6	2.49±0.23	2.56±0.24	2.80±0.47
C22:5 <i>n</i> -6	4.93±0.49	8.95±2.14	3.54±0.85
C22:5 <i>n</i> -3	15.59±0.69	28.15±1.27	13.99±0.64
C22:6 <i>n</i> -3	18.17±1.61	24.81±1.80	16.31±1.41
ΣSAFAs	154.84±8.35	285.03±9.76	133.63 ±6.32
ΣMUFAs	44.19±3.44	52.39±5.87	33.12±3.95
ΣPUFAs	115.94±11.01	138.74±17.91	99.20±15.79
Σodd-BrFAs	9.88±0.93	4.42±0.89	1.68±0.65
Σ <i>n</i> -3/Σ <i>n</i> -6	0.95±0.10	1.53±0.11	1.00±0.10

注：iso 表示脂肪酸异构体；C20:3*n*-6t 表示反式脂肪酸；SAFAs 为总的饱和脂肪酸；MUFAs 为总的单聚不饱和脂肪酸；PUFAs 表示总的多聚不饱和脂肪酸；odd-BrFAs 表示总的奇数和支链脂肪酸。

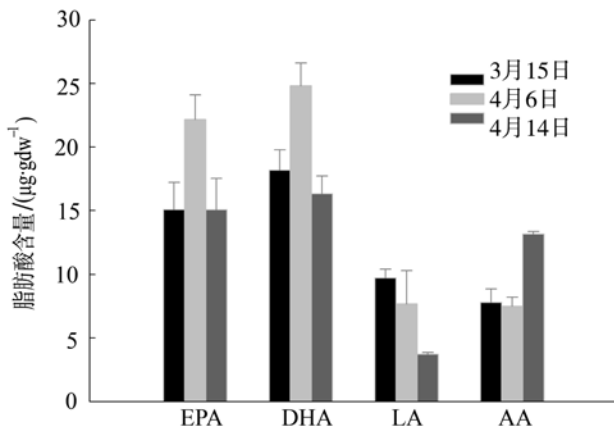


图4 风信子鹿角珊瑚繁殖前后必需脂肪酸含量的变化

EPA 为二十碳五烯酸 (C20:5n-3, eicosapentaenoic acid); DHA 为二十二碳六烯酸 (C22:6n-3, docosahexaenoic acid); LA 为亚麻酸 (C18:2n-6, Linoleic acid); AA 为花生四烯酸 (C20:4n-6, arachidonic acid)

Fig. 4 Variation of some essential fatty acids between prereproduction and postreproduction

3 讨论

3.1 共生藻密度和组织含量与珊瑚生理状态

共生藻密度和组织含量是反映珊瑚生理状况的重要指标 (Fitt, et al, 2000), 其中共生藻密度与珊瑚的光合作用密切相关 (Brown, et al, 1999)。在正常生理状态下, 造礁石珊瑚共生藻密度约为 $1\sim3$ 个· cm^{-2} , 组织含量约为 $6\sim12\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Fagoonee, et al, 1999; Fitt, et al, 2000; Imbs, et al, 2012; 李秀保 等, 2006; 雷新明 等, 2008), 本研究测定的风信子鹿角珊瑚, 其共生藻密度约为 2×10^6 个· cm^{-2} , 组织含量约为 $8\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$, 在正常值范围内。这表明风信子鹿角珊瑚繁殖期间生理状况比较稳定。而繁殖前后共生藻密度之间并无差异, 暗示风信子鹿角珊瑚所排出的卵子很可能是不带虫黄藻的。Harrison(2011)也认为所有的鹿角珊瑚其幼虫的共生藻不是通过母体传递获得的, 需要从后天环境获取。过去的研究阐明, 珊瑚组织含量主要受水温、光照、浑浊度等的影响 (Fitt, et al, 2000; Imbs, et al, 2012; 李秀保 等, 2006), 而从本研究来看, 繁殖过程也对珊瑚的组织含量有较大影响。

3.2 脂质与珊瑚的繁殖

丰富的脂质是保证珊瑚繁殖策略成功的必要条件 (Harri, et al, 2002; Leuzinger, et al, 2003; Richmond, 1987), 造礁石珊瑚繁殖过程中脂质含量将减少 $20\%\sim85\%$ (Anthony, 2006; Leuzinger, et al, 2003)。本研究中, 风信子鹿角珊瑚繁殖前后脂质含量减少了约 43.4% , 与已有的研究结果基本一致。这些减少的脂质主要传递给幼体, 一方面保证了幼体因含有丰

富的脂质能够漂浮于水面上进行水平扩散传播 (Arai, et al, 1993; Richmond, 1987); 另一方面这些含量丰富的脂质也保证幼体在扩散途中具有足够的能量以扩散得更远, 尤其是当其幼体不带共生藻的时候 (Graham, et al, 2008; Harri, et al, 2010; Harrison, 2011; Szmant, 1991)。

除繁殖过后脂质含量显著减少之外, 本研究还观察到珊瑚繁殖前脂肪含量显著增加 ($p<0.05$), 这表明造礁石珊瑚繁殖过程中有个脂质迅速累积的阶段。Szmant 的研究表明, 珊瑚在繁殖前会有段脂肪累积时期, 卵细胞中将出现大量脂泡 (Szmant, 1991)。而在这脂质迅速增加过程中, 珊瑚共生藻密度也保持增加趋势, 暗示这可能与繁殖期间需要充足的供能有关。

3.3 脂肪酸与珊瑚的繁殖过程

本研究表明, 风信子鹿角珊瑚中主要的脂肪酸为: C16:0、C18:0、C18:1n-9、C18:3n-6、C20:5n-3、C22:5n-3, 这与已有的研究结果是一致的 (Al-Moghrabi, et al, 1995; Latyshev, et al, 1991)。在各类脂肪酸组成中, 饱和脂肪酸和多聚不饱和脂肪酸的含量非常高, 其中饱和脂肪酸占总脂肪酸含量的 50% 左右, 多聚不饱和脂肪酸含量占总脂肪酸含量的 30% 左右, 这与其他海洋生物脂肪酸的构成也是吻合的 (Bergé, et al, 2005)。与其他海洋生物不同的是, 除这些常见的脂肪酸外, 风信子鹿角珊瑚中还检测到少量的奇数碳链脂肪酸和反式脂肪酸, 这些奇数碳链脂肪酸和反式脂肪酸很可能是与珊瑚共附生的细菌所特有的, 如固氮的蓝细菌及硫细菌等 (Gillan, et al, 1988; Yamashiro, et al, 2005)。整个繁殖过程中主要为脂肪酸 (尤其为多聚不饱和脂肪酸) 的含量发生变化, 而脂肪酸的组成并未发生改变, 表明脂肪酸的组成是比较稳定的。这与珊瑚白化过程中脂肪酸变化不同: 珊瑚白化过程中除了脂肪酸含量发生变化外, 脂肪酸组成也发生改变 (Yamashiro et al, 2005)。

某些必需脂肪酸如 EPA、DHA 等为性腺细胞的主要组成成分之一, 能够影响海洋动物的产卵率、受精率、孵化率及存活率等, 对动物的个体繁殖具有举足轻重的作用 (Bergé, et al, 2005)。本研究中发现 EPA、DHA 等在珊瑚繁殖过程中具有显著变化, 暗示 EPA、DHA 等对珊瑚的繁殖过程具有重要意义。这也是首次在珊瑚中监测到繁殖过程中 EPA、DHA 的重要作用。Pernet, et al (2002) 对海肾 *Renilla koellikeri* 的研究也表明, 海肾在排卵前会有大量的 EPA 的累积; 他人的研究也表明 EPA、DHA 等这些

必需脂肪酸的累积对繁殖过程是必不可少的, 如能影响卵子的质量及孵化率等(Rooke, et al, 2001; Surai, et al, 2000; Xu, et al, 1994)。

3.4 自养与异养: 脂肪酸的暗示

与其他海洋生物不同的是, 共生藻的合成、转移是造礁石珊瑚脂肪酸的主要来源(Papina, et al, 2003), 除此之外, 异养也是珊瑚脂肪酸的来源之一, 如浮游生物等(Teece, et al, 2011)。由于动物与植物中所合成的脂肪酸存在差异, 通过分析脂肪酸组成, 可以为揭示珊瑚繁殖时碳的来源提供一定信息(Imbs, et al, 2010b; Papina, et al, 2007; Teece, et al, 2011)。 $n-6$ 系列和 $n-3$ 系列是风信子鹿角珊瑚最主要的两类多聚不饱和脂肪酸。本研究中, 风信子鹿角珊瑚繁殖过程中 $n-3/n-6$ 含量先增加后减少, 表明繁殖前有 $n-3$ 系列脂肪酸的累积。而 $n-3$ 系列脂肪酸主要是由共生藻合成、转移过来的(Imbs, et al, 2010a; Papina, et al, 2003), 表明繁殖时共生藻脂肪酸的合成比较活跃, 保证了繁殖时珊瑚对脂肪酸的需求。另外, 考虑到浮游生物中 $C20:5n-3$ 含量比较丰富, 而且珊瑚自身缺少合成 $n-3$ 系列脂肪酸的 12 和 15 去饱和酶, 推测珊瑚脂肪酸中的 $C20:5n-3$ (EPA)、 $C22:5n-3$ 除了从共生藻获得外, 还

可能通过食物获得并通过链的延伸合成而来(Imbs, et al, 2010b; Papina, et al, 2007; Teece, et al, 2011)。这暗示珊瑚繁殖时可能会增加摄食, 以满足繁殖时对脂肪酸的需求。

4 结论与展望

本文以三亚湾常见造礁石珊瑚种类——风信子鹿角珊瑚为实验对象, 研究了造礁石珊瑚繁殖前后脂质与脂肪酸的变化, 得到如下结论:

1)繁殖过程对风信子鹿角珊瑚脂质含量和组织含量有较大影响。繁殖前后, 风信子鹿角珊瑚脂质含量、组织含量均显著减少, 其中脂质含量减少约 43.4%, 组织含量减少约 19.6%。而共生藻密度在繁殖过程中并无显著变化, 表明风信子鹿角珊瑚所排出的幼体很可能不带虫黄藻。

2)风信子鹿角珊瑚在繁殖前出现脂质的大量累积现象, 以顺利完成繁殖过程。

3)本研究首次表明 EPA、DHA 是造礁石珊瑚繁殖过程中重要的脂肪酸, 其含量在风信子鹿角珊瑚繁殖过程中具有显著性变化。

4)造礁石珊瑚繁殖时可能会适当增加摄食, 以满足繁殖过程对脂肪酸和能量的需求。

参考文献

- 雷新明, 黄晖, 王华接, 等. 2008. 鼻形鹿角珊瑚对不同温度的响应及白化研究[J]. 热带海洋学报, 27(5): 56–62.
- 李秀保, 黄晖, 符曲, 等. 2006. 升温胁迫对珊瑚及其共生藻影响的初步研究 [J]. 热带海洋学报, 25(6): 55–59.
- AL-MOGHRABI S, ALLEMAND D, COURET J, et al. 1995. Fatty acids of the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*: Effect of light and feeding [J]. Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology, 165(3): 183–192.
- ANTHONY K R N. 2006. Enhanced energy status of corals on coastal, high-turbidity reefs [J]. Marine Ecology Progress Series, 31(9): 111–116.
- ANTHONY K, HOOGENBOOM M O, MAYNARD J A, et al. 2009. Energetics approach to predicting mortality risk from environmental stress: a case study of coral bleaching [J]. Functional ecology, 23(3): 539–550.
- ARAI I, KATO M, HEYWARD A, et al. 1993. Lipid composition of positively buoyant eggs of reef building corals [J]. Coral Reefs, 12(2): 71–75.
- BERGÉ J P, BARNATHAN G. 2005. Fatty acids from lipids of marine organisms: molecular biodiversity, roles as biomarkers, biologically active compounds, and economical aspects [J]. Marine biotechnology 1, 49–125.
- BROWN B, DUNNE R, AMBARSARI I, et al. 1999. Seasonal fluctuations in environmental factors and variations in symbiotic algae and chlorophyll pigments in four Indo-Pacific coral species [J]. Marine Ecology Progress Series, 19(1): 53–69.
- EDMUNDS P, DAVIES P S. 1986. An energy budget for *Porites porites* (Scleractinia) [J]. Marine Biology, 92(3): 339–347.
- FAGOONEE I, WILSON H, HASSELL M, et al. 1999. The dynamics of zooxanthellae populations: a long-term study in the field [J]. Science, 283(5403): 843–845.
- FITT W, MCFARLAND F, WARNER M, et al. 2000. Seasonal patterns of tissue biomass and densities of symbiotic dinoflagellates in reef corals and relation to coral bleaching [J]. Limnology and Oceanography, 677–685.
- GILLAN F T, STOILOV I L, THOMPSON J E, et al. 1988. Fatty acids as biological markers for bacterial symbionts in sponges [J]. Lipids, 23(12): 1139–1145.
- GRAHAM E, BAIRD A, CONNOLLY S. 2008. Survival dynamics of scleractinian coral larvae and implications for dispersal [J]. Coral Reefs, 27(3): 529–539.
- HARII S, KAYANNE H, TAKIGAWA H, et al. 2002. Larval survivorship, competency periods and settlement of two brooding corals, *Heliopora coerulea* and *Pocillopora damicornis* [J]. Marine Biology, 141(1): 39–46.
- HARII S, YAMAMOTO M, HOEGH-GULDBERG O. 2010. The relative contribution of dinoflagellate photosynthesis

- and stored lipids to the survivorship of symbiotic larvae of the reef-building corals [J]. *Marine Biology*, 157(6): 1215–1224.
- HARLAND A, NAVARRO J, SPENCER DAVIES P, et al. 1993. Lipids of some Caribbean and Red Sea corals: total lipid, wax esters, triglycerides and fatty acids [J]. *Marine Biology*, 117(1): 113–117.
- HARRISON P L. 2011. Sexual reproduction of scleractinian corals [J]. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*, 59–85.
- IMBS A B, LATYSHEV N A, DAUTOVA T N, et al. 2010a. Distribution of lipids and fatty acids in corals by their taxonomic position and presence of zooxanthellae [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 40(9): 65–75.
- IMBS A B, YAKOVLEVA I, LATYSHEV N, et al. 2010b. Biosynthesis of polyunsaturated fatty acids in zooxanthellae and polyps of corals [J]. *Russian Journal of Marine Biology*, 36(6): 452–457.
- IMBS A, YAKOVLEVA I. 2012. Dynamics of lipid and fatty acid composition of shallow-water corals under thermal stress: an experimental approach [J]. *Coral Reefs*, 31(1): 41–53.
- LATYSHEV N, NAUMENKO N, SVETASHEV V, et al. 1991. Fatty acids of reef-building corals [J]. *Marine ecology progress series*, 76(3): 295–301.
- LEUZINGER S, ANTHONY K R N, WILLIS B L. 2003. Reproductive energy investment in corals: scaling with module size [J]. *Oecologia*, 136(4): 524–531.
- LUCAS M, WALKER G, HOLLAND D, et al. 1979. An energy budget for the free-swimming and metamorphosing larvae of *Balanus balanoides* (Crustacea: Cirripedia) [J]. *Marine Biology*, 55(3): 221–229.
- PAPINA M, MEZIANE T, VAN WOESIK R. 2003. Symbiotic zooxanthellae provide the host-coral *Montipora digitata* with polyunsaturated fatty acids [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 135(3): 533–537.
- PAPINA M, MEZIANE T, VAN WOESIK R. 2007. Acclimation effect on fatty acids of the coral *Montipora digitata* and its symbiotic algae [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 147(4): 583–589.
- PERNET V, GAVINO V, GAVINO G, et al. 2002. Variations of lipid and fatty acid contents during the reproductive cycle of the anthozoan *Renilla koellikeri* [J]. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 172(6): 455–465.
- RICHMOND R. 1987. Energetics, competency, and long-distance dispersal of planula larvae of the coral *Pocillopora damicornis* [J]. *Marine Biology*, 93(4): 527–533.
- RODRIGUES L J, GROTTOLE A G. 2007. Energy reserves and metabolism as indicators of coral recovery from bleaching [J]. *Limnology and Oceanography*, 1874–1882.
- RODRIGUES L J, GROTTOLE A G, PEASE T K. 2008. Lipid class composition of bleached and recovering *Porites compressa* Dana, 1846 and *Montipora capitata* Dana, 1846 corals from Hawaii [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 358(2): 136–143.
- ROOKE J, SHAO C, SPEAKE B. 2001. Effects of feeding tuna oil on the lipid composition of pig spermatozoa and in vitro characteristics of semen [J]. *Reproduction*, 121(2): 315–322.
- SAUNDERS S M, RADFORD B, BOURKE S A, et al. 2006. A rapid method for determining lipid fraction ratios of hard corals under varying sediment and light regimes [J]. *Environmental Chemistry*, 2(4): 331–336.
- SURAI P, NOBLE R, SPARKS N, et al. 2000. Effect of long-term supplementation with arachidonic or docosahexaenoic acids on sperm production in the broiler chicken [J]. *Journal of reproduction and fertility*, 120(2): 257–264.
- SZMANT A M. 1991. Sexual reproduction by the Caribbean reef corals *Montastrea annularis* and *Montastrea cavernosa* [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 7(4): 13–25.
- TCHERNOV D, GORBUNOV M Y, DE VARGAS C. 2004. Membrane lipids of symbiotic algae are diagnostic of sensitivity to thermal bleaching in corals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(37): 13531–13535.
- TEECE M A, ESTES B, GELSLEICHTER E, et al. 2011. Heterotrophic and autotrophic assimilation of fatty acids by two scleractinian corals, *Montastraea faveolata* and *Porites astreoides* [J]. *Limnology and Oceanography*, 56(4): 1285–1296.
- WARD S. 1995. Two patterns of energy allocation for growth, reproduction and lipid storage in the scleractinian coral *Pocillopora damicornis* [J]. *Coral Reefs*, 14(2): 87–90.
- XU X, JIA W, CASTELL J, et al. 1994. Influence of dietary lipid sources on fecundity, egg hatchability and fatty acid composition of Chinese prawn (*Penaeus chinensis*) broodstock [J]. *Aquaculture*, 119(4): 359–370.
- YAMASHIRO H, OKU H, ONAGA K. 2005. Effect of bleaching on lipid content and composition of Okinawan corals [J]. *Coral Reefs*, 24(2): 448–453.