

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2010.00336

海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻种间竞争研究

王朝晖^{1,2} 袁美玲^{1,3} 骆育敏¹ 赵建刚¹

(1. 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632; 2. 水体富营养化与赤潮防治广东省教育厅重点实验室, 广州 510632;
3. 山东淄博第四中学, 淄博 255100)

摘要: 研究了不同起始细胞密度与硅酸盐浓度对海洋卡盾藻(Cm)与中肋骨条藻(Sc)及锥状斯氏藻(St)之间种间竞争的影响, 利用竞争抑制参数对相互间的竞争关系进行了分析, 并引入体积竞争抑制系数的概念。结果表明: 海洋卡盾藻的环境容量不受起始细胞密度(100—3600 cells/mL)的影响, 但随着起始接种密度的增加, 达到最大细胞密度和进入稳定生长期的时间均提前。在硅缺乏的条件下, 中肋骨条藻仍能保持一定生长, 并能在与海洋卡盾藻之间的种间竞争中保持数量优势, 但硅酸盐浓度的增加有利于其种间竞争。初始细胞密度和接种比例对3种赤潮藻类之间的种间竞争影响明显, 总体来说海洋卡盾藻在竞争中处于劣势。当海洋卡盾藻细胞密度远远高于中肋骨条藻时(Cm:Sc=6:1), 海洋卡盾藻才能在与中肋骨条藻的竞争取胜; 而在与海洋卡盾藻共培养条件下, 锥状斯氏藻具有一定竞争优势, 其对海洋卡盾藻的体积抑制系数(α')是后者(β')的27—100倍。但在所有处理中均没有绝对优胜者, 竞争结果都会出现不稳定的平衡状态。

关键词: 海洋卡盾藻; 种间竞争; 起始密度; 中肋骨条藻; 锥状斯氏藻

中图分类号: X55; Q178.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2010)02-0336-09

随着海洋污染的加剧, 赤潮频繁发生, 赤潮发生过程中优势种群之间常出现演替, 而且近年来由两种或者两种以上赤潮生物引发的复合型赤潮的发生也日趋频繁。如1998年春珠江口和香港海域发生的凯伦藻(*Karenia* spp.)和裸甲藻(*Gymnodinium* spp.)赤潮^[1]; 长江口海域2002年和2004年春发生的东海原甲藻(*Prorocentrum danghaiense* Lu)、中肋骨条藻[*Skeletonema costatum* (Greville) Cleve]和链状亚历山大藻[*Alexandrium catenella* (Whedon and Kofoid) Balech]的混合赤潮^[2], 2005年春发生的米氏凯伦藻[*K. mikimotoi* (Miyake et Kominami ex Oda) Hansen and Moestrup]和东海原甲藻赤潮^[2], 2005年渤海湾的米氏凯伦藻和球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa* Scherffel)的混合赤潮等^[2]。这些两种或两种以上赤潮生物所引起的复合型赤潮发生面积广, 持续时间长, 给海水养殖业以及海洋生态环境造成了巨大的

破坏。

许多微藻之间存在着明显的相互作用, 研究结果得出营养盐限制与营养盐需求差异以及藻类之间的克生作用均为藻类种间竞争的重要因素^[3-6]。海洋卡盾藻[*Chattonella marina* (Subrahmanyam) Hara et Chihara]作为一种危害十分严重的赤潮生物, 近年来其赤潮在我国发生频率增加^[7], 且于2003年在大亚湾发生了海洋卡盾藻与锥状斯氏藻[*Scrippsiella trochoidea* (Stein) Loeblich III]的混合赤潮^[8]; 锥状斯氏藻和中肋骨条藻分别为我国沿海最为常见的甲藻和硅藻, 曾分别在我国沿海多次引发赤潮^[9, 10]。为了了解海洋卡盾藻与这两种赤潮藻类间的种间竞争关系, 本文研究了不同起始密度及接种比例条件下, 海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻的种群竞争关系, 为卡盾藻赤潮发生机理和防治研究提供科学依据。

收稿日期: 2008-08-19; 修订日期: 2009-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40773063); 国家自然科学基金委员会-广东省人民政府自然科学基金(U0633006); 广东省科技计划项目(2007B030200002)资助

作者简介: 王朝晖(1968—), 女, 汉族, 湖南长沙人; 教授; 主要从事海洋生态学的研究。E-mail: twzh@jnu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 藻种来源与培养条件

海洋卡盾藻(Cm)、锥状斯氏藻(St)和中肋骨条藻(Sc)采自南海大亚湾海域, 采用毛细管分离法进行分离纯化, 保存于暨南大学水生生物研究所。实验前, 将藻细胞在对数生长期连续接种、培养 3—4 个周期, 使细胞达到同步生长。

培养基采用经调整的 *f/2* 培养基, 除氮(N)、磷(P)、硅(Si)营养元素外, 其余元素与 *f/2* 培养基^[11]中相同, 标准培养基中 N、P、Si 浓度分别为 500 $\mu\text{g/L}$ N、74 $\mu\text{g/L}$ P、1000 $\mu\text{g/L}$ Si。培养基所用人工海水由 Red coral Sea 牌无营养盐海盐配制, pH 为 7.9 ± 0.1 , 盐度为 31—33。人工海水、培养基储备液通过 121 $^{\circ}\text{C}$ 高压蒸汽灭菌 15min 后, 在超菌工作台配制所需培养基。所有容器均经过高压灭菌后使用。

培养温度为 $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$, 光照强度为 4000 lx, 光暗比为 L:D=12:12。如果没有特别说明, 藻类培养和实验均在标准培养基和环境条件下进行。

实验前, 将对数生长期的藻细胞置于离心管中, 以 400 r/min 转速离心 5min, 弃去上清液, 加适量过滤灭菌的人工海水, 离心洗涤 3 次。实验时, 将洗涤过的藻细胞接入盛有 100 mL 培养基的 250 mL 三角瓶内, 各实验组均设 3 个重复。

1.2 实验设计

不同初始接种密度下海洋卡盾藻的生长 在初始细胞密度分别为 100、200、600、1800 和 3600 cells/mL 条件下, 研究海洋卡盾藻的生长状况。

海洋卡盾藻与中肋骨条藻在不同硅酸盐浓度条件下的种间竞争 硅是硅藻生长的必需营养元素, 而且硅的消耗常被认为是硅藻水华消退的重要因素^[12]。在同样的初始接种细胞密度下(600 cells/mL), 设定 Si(NaSiO_3)浓度分别为 0、5、200、1000 $\mu\text{g/L}$, 分别研究海洋卡盾藻和中肋骨条藻单独培养以及两者共培养条件下的生长, 以了解硅在两者种群竞争中

的作用。

混合培养 分别测量处于对数生长期的海洋卡盾藻、锥状斯氏藻和中肋骨条藻的细胞大小, 得出海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻的细胞体积比分别约为 3:1 和 6:1。因此, 在共培养体系中, 设定海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻的初始接种比例分别为 Cm:Sc=1:1、1:6、6:1 和 Cm:St=1:1、1:3、3:1。

实验时, 设定锥状斯氏藻、中肋骨条藻初始接种密度保持不变(600 cells/mL), 改变海洋卡盾藻初始细胞密度, 使海洋卡盾藻与其他两种藻的初始接种比例达到设定值(表 1)。同时设置初始细胞密度为 600 cells/mL 条件下, 斯氏藻和骨条藻的单独培养实验组, 不同密度卡盾藻的单种培养生长实验见前。

1.3 实验观察

实验共进行了 30d。实验前 13d, 每隔 2 天计数一次; 实验后期(14—30d), 由于细胞生长速度的降低, 适当延长计数间隔, 每隔 4 天计数一次。藻细胞计数时, 吸取藻培养液 0.1 mL, 置于 1 mL 计数框内, 根据细胞数量加入适量过滤海水稀释, 并用 1 小滴福尔马林固定, 立即在 OLYMPUS BH-2 显微镜下计数藻细胞数目。

1.4 分析计算方法

生长曲线的拟合 以逻辑斯谛方程 $dN/dt = rN(1-K/N)$, 拟合藻类的增长过程。其中 t 为时间, N 为此刻种群数量, r 为该种群的内禀增长率, K 为环境容纳量。以每个处理组的最大生物量作为 K 的估计值, 应用逻辑斯谛方程的对数形式 $\ln[(K-N)/N] = a - rt$, 以最小二乘法进行回归分析, 获得该方程的斜率和截距作为 a 和 r 的估计值^[13]。

藻类增长曲线拐点的确定 为逻辑斯谛方程二阶导数等于零时的时间 t_p 值, 此时 $N = K/2$, 故 $t_p = (a - \ln 2)/r$ 。

表 1 混合培养实验的初始接种密度和比例
Tab. 1 The inoculation cell density and proportion in co-cultures

初始接种比例 Inoculation rate	初始接种密度 Initial cell density (cells/mL)		初始接种比例 Inoculation rate	初始接种密度 Initial cell density (cells/mL)	
	海洋卡盾藻(Cm)	中肋骨条藻(Sc)		海洋卡盾藻(Cm)	锥状斯氏藻(St)
Cm:Sc=1:1	600	600	Cm:St = 1:1	600	600
Cm:Sc=1:6	100	600	Cm:St = 1:3	200	600
Cm:Sc=6:1	3600	600	Cm:St = 3:1	1800	600

竞争抑制参数的计算 利用 Lotka-Volterra 种间竞争模型的差分形式:

$$dN_1/dt = r_1 N_1 (K_1 - N_1 - \alpha N_2)/K_1 \quad (1)$$

$$dN_2/dt = r_2 N_2 (K_2 - N_2 - \beta N_1)/K_2 \quad (2)$$

其中, N_1 为共培养中海洋卡盾藻的细胞密度, N_2 为中肋骨条藻或者锥状斯氏藻的细胞密度(cells/mL); r_1 、 r_2 分别为它们的内禀增长率(由单种培养回归计算得到); K_1 、 K_2 分别为它们的最大环境容量(由单种培养得到); α 、 β 分别为共培养中中肋骨条藻或者锥状斯氏藻对海洋卡盾藻的竞争抑制系数以及海洋卡盾藻对其他两种藻的竞争抑制系数, α 表示每个中肋骨条藻或锥状斯氏藻个体占据的空间相当于 α 个海洋卡盾藻的个体数量, β 表示每个海洋卡盾藻个体占据的空间相当于 β 个中肋骨条藻或锥状斯氏藻的个体数量。

由于不同微藻之间体积相差悬殊, 竞争抑制系数不能准确反映微藻之间空间竞争状况, 将利用 Lotka-Volterra 种间竞争模型根据各自的体积比例加以修饰, 得到下列方程式:

$$dN_1/dt = r_1 N_1 (K_1 - N_1 - \alpha' N_2/b)/K_1 \quad (3)$$

$$dN_2/dt = r_2 N_2 (K_2 - N_2 - \beta' N_1 \times b)/K_2 \quad (4)$$

其中 b 为海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻的体积系数(体积比), 对于中肋骨条藻: $b=6$, 对于锥状斯氏藻: $b=3$ 。 α' 、 β' 为体积竞争抑制系数, 表示某一藻细胞与同样体积另一藻细胞竞争所占据的空间, 其大小能更为准确反映不同大小藻类之间的种间竞争关系。

应用上述公式计算共培养中藻类增长曲线在拐点以后的所有竞争抑制参数, 取其平均值作为该种的竞争抑制系数的估计值。

2 结果

2.1 不同起始细胞密度对海洋卡盾藻生长的影响

图 1 显示, 随着起始接种密度的增加, 海洋卡盾藻生长的延滞期缩短, 进入对数生长期和稳定期的时间均提前, 且对数生长期和稳定期持续时间随着接种密度的增加呈递减趋势, 最大细胞密度略有下降, 但差异不明显($P>0.05$)。结果说明, 虽然初始密度影响细胞种群的初始增长, 但在一定环境条件下(营养、温度、光照和培养容量), 初始接种密度并不影响海洋卡盾藻的环境容量。

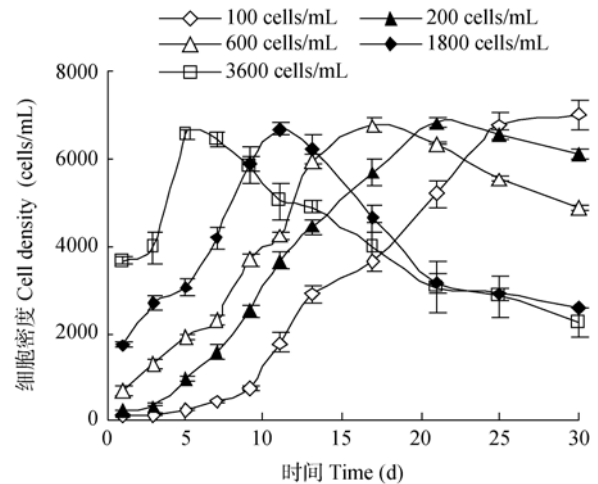


图 1 不同接种密度下海洋卡盾藻的生长

Fig. 1 Growth of *Chattonella marina* under different initial cell densities

2.2 在不同硅酸盐浓度条件下海洋卡盾藻与中肋骨条藻的种间竞争

图 2 显示了在不同的 Si 浓度下, 海洋卡盾藻与中肋骨条藻单独培养的生长状况。当硅酸盐浓度高于 200 $\mu\text{g/L}$ 时, 中肋骨条藻的生长基本上不受到硅酸盐浓度的影响; 在 Si 受到限制或者缺乏的条件下 ($<5 \mu\text{g/L}$), 虽然骨条藻生长受到较大影响, 但在接种前期(10d 以内)仍能保持一定速率的对数生长, 生长后期由于 Si 的缺乏, 细胞密度急剧下降并一直维持较低水平(图 2a)。由于海洋卡盾藻生长不需要硅酸盐, Si 浓度不影响卡盾藻的生长(图 2b)。

在两种藻共培养条件下, 中肋骨条藻能保持旺盛的生长趋势, 很快进入对数生长期, 而且即使 Si 缺乏条件下, 仍能维持一定生长速度(图 3)。随着 Si 浓度的增加, 中肋骨条藻的竞争优势逐渐明显, 具体表现为环境容量增加、对海洋卡盾藻的竞争系数 α 上升、生长曲线拐点推迟等(表 2)。虽然如此, 但由于海洋卡盾藻个体远大于中肋骨条藻, 海洋卡盾藻对骨条藻仍具有较强的抑制效应, 其对骨条藻的竞争抑制系数 β 可达 34.22—82.25, 而且混合培养条件下中肋骨条藻的最大环境容量也远远小于单种培养时的环境容量(表 2)。

Si 浓度的增加则不利于海洋卡盾藻与硅藻之间的种间竞争, 其环境容量迅速降低, 而抑制拐点则提前。当 Si 浓度大于 200 $\mu\text{g/L}$ 时, 拐点 t_p 值小于 0, 说明共培养刚开始时, 骨条藻就对卡盾藻产生了竞争抑制效应。从体积竞争抑制系数 α' 、 β' 值可得知(表 2),

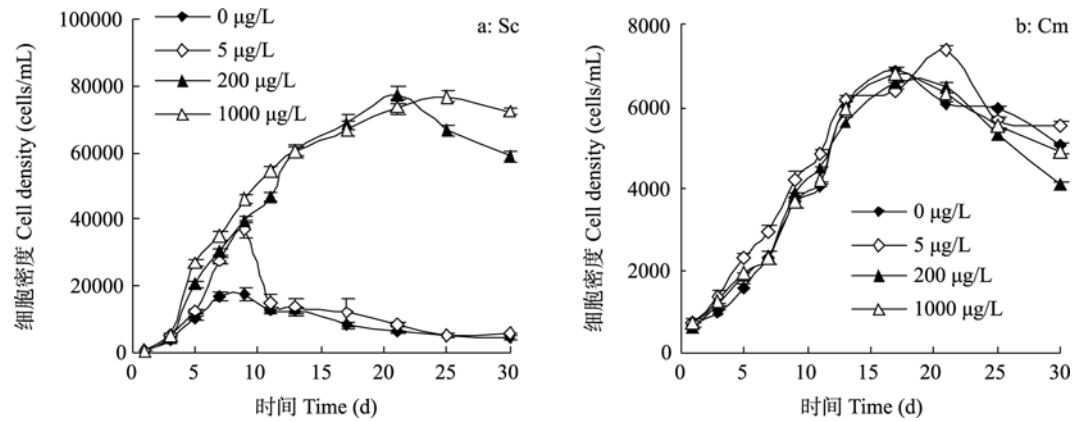


图 2 在不同硅浓度下海洋卡盾藻与中肋骨条藻单独培养时的生长
Fig. 2 Growth of *Chattonella marina* and *Skeletonema costatum* in different Si concentrations

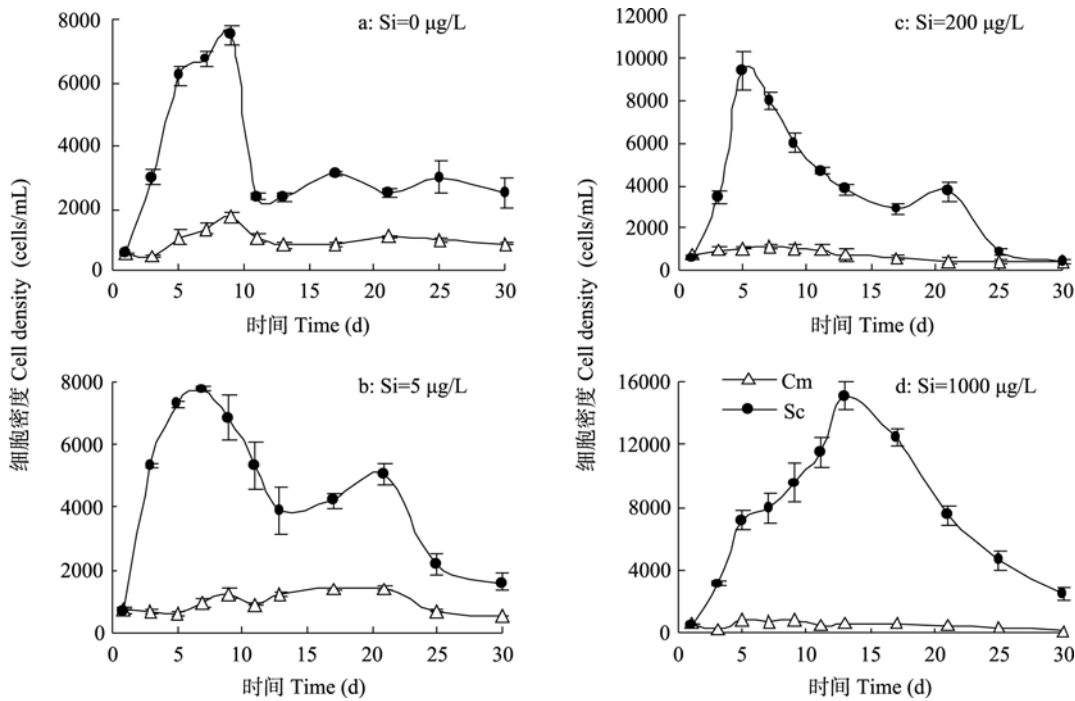


图 3 在不同硅浓度下海洋卡盾藻与中肋骨条藻的种群竞争
Fig. 3 Competition of *Chattonella marina* and *Skeletonema costatum* in different Si concentrations

表 2 不同 Si 浓度下，海洋卡盾藻与中肋骨条藻的竞争抑制作用(初始接种密度 600 : 600)

Tab. 2 Inhibition factor between *Chattonella marina* and *Skeletonema costatum* in different Si concentrations (initial cell density 600 : 600)

Si 浓度 Si concentration ($\mu\text{g/L}$)		K (cells/mL)	K_{max} (cells/mL)	a	r	t_p (d)	α	β	α'	β'
0	海洋卡盾藻	1683	6867	1.33	0.367	1.75	2.37	—	10.27	—
	中肋骨条藻	7513	17513	3.01	0.806	2.88	—	71.41	—	15.00
5	海洋卡盾藻	1383	7883	0.88	0.247	0.76	2.11	—	12.60	—
	中肋骨条藻	7767	36800	3.42	1.261	2.16	—	82.25	—	13.71
200	海洋卡盾藻	1187	6607	0.23	0.198	-2.35	3.52	—	12.52	—
	中肋骨条藻	9400	77504	3.77	1.08	2.85	—	49.39	—	8.23
1000	海洋卡盾藻	900	6780	0.66	0.24	-0.13	4.71	—	14.22	—
	中肋骨条藻	15000	77083	2.85	0.39	5.42	—	34.22	—	11.90

注: K : 混合培养时的环境容量; K_{max} : 同样条件单种培养时的环境容量; 其余参数含义见 1.4; 下同

两种藻之间的竞争抑制程度相近,在Si缺乏条件下,海洋卡盾藻对中肋骨条藻抑制作用较强;反之中肋骨条藻具有更强的竞争能力。

2.3 不同接种比例下海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻的种间竞争

起始生长密度为 600 cells/mL 时,中肋骨条藻和锥状斯氏藻单独培养条件下的生长状况(图 4),在不同起始密度条件下海洋卡盾藻单独培养时的生长状况(图 1)。以图 1 和图 4 中的数据为混合培养时的单独培养对照组,并作为计算环境容量及竞争抑制系数的依据。

在骨条藻初始细胞密度等于或者大于卡盾藻的情况下,卡盾藻生长受到明显抑制(图 5a, b),尤其当骨条藻初始细胞密度远大于卡盾藻时($C_m : S_c = 1 : 6$, 两者的细胞体积比相同),卡盾藻生长极为缓慢,种群增长几乎停滞(图 5b)。而卡盾藻初始细胞密度远远大于骨条藻时($C_m : S_c = 6 : 1$),卡盾藻占据了竞争中的优势地位,中肋骨条藻则生长缓慢,环境容量仅为单独培养时的 1.88%(图 5c, 表 3)。

海洋卡盾藻与锥状斯氏藻的种间竞争状况与初始接种比例密切相关(图 6)。当初始接种密度比为 1 : 1 时,虽然海洋卡盾藻种群密度占据优势,但其生长受到明显抑制,而对锥状斯氏藻生长抑制作用不明显($P > 0.10$)(图 6a、表 3);当两者体积比相同时($C_m : S_t = 1 : 3$),海洋卡盾藻生长几乎停滞,而锥状斯氏藻的生长则未受到影响(图 5b);而卡盾藻细胞密度远大于斯氏藻时($C_m : S_t = 3 : 1$),虽然两种藻类环境容量均下降,但与同样细胞密度下单独生长相比,生长均未受到明显影响($P > 0.05$)。由此可见,在与海洋卡盾藻共培养条件下,锥状斯氏藻具有一

定竞争优势。

在共培养情况下,3 种赤潮藻类均出现环境容量降低、生长曲线拐点提前的现象,而且对其他藻类的竞争抑制系数与其自身初始接种比例正相关(表 3)。体积竞争抑制系数 α' 、 β' 值更为清楚地表明 3 种藻之间的竞争抑制作用。在相同细胞密度下,海洋卡盾藻与中肋骨条藻之间的竞争抑制作用相近;若骨条藻数量占据优势(体积比相同),那么骨条藻在竞争获胜;只有当海洋卡盾藻远远超出中肋骨条藻时,海洋卡盾藻才能对中肋骨条藻产生较强的竞争抑制作用。而在海洋卡盾藻与锥状斯氏藻的共培养体系中,在实验设置的初始接种细胞密度范围内,锥状斯氏藻均对海洋卡盾藻产生强烈的抑制作用,其体积竞争抑制系数(α')是海洋卡盾藻体积竞争抑制系数(β')的 27—100 倍。

3 讨论

3.1 起始细胞密度与种群增长

环境中赤潮生物的背景生物量是影响赤潮发生的关键性因素之一。随着起始接种密度的增加,海洋卡盾藻生长的延滞期缩短,进入对数生长期和稳定期的时间均提前,但环境容量却相差不大。这说明环境资源量相同时,每个物种都有适合自己生长和繁殖的最佳种群密度和环境容量。

起始细胞密度的高低也影响着赤潮发生的时间和趋势,对赤潮预测预报具有重要的指导意义。日本是卡盾藻赤潮多发国家之一,政府为了做好赤潮防治和研究工作,对有害赤潮生物物种和生物量监测做了严格规定,特别重视对赤潮生物密度和分布状况的监测,并作为赤潮预报和警报的发布依据^[14]。

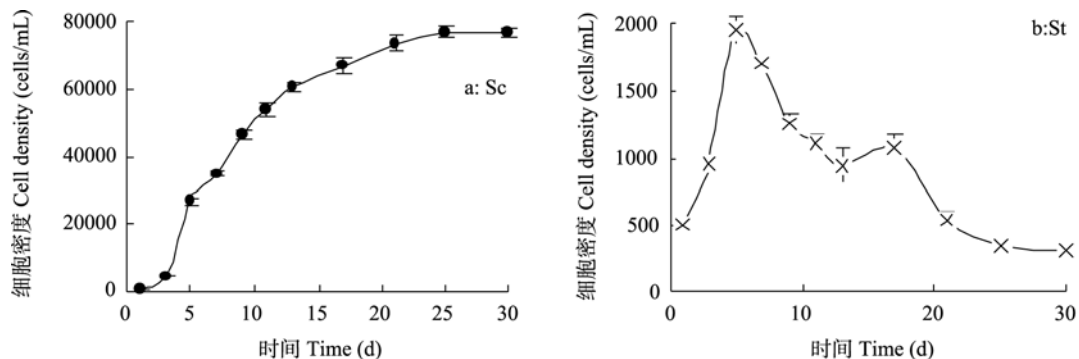


图 4 在单种培养条件下,中肋骨条藻和锥状斯氏藻的生长曲线

Fig. 4 The growth of *Skeletonema costatum* and *Scrippsiella trochoidea* in mono species culture

海洋卡盾藻单独培养生长曲线见图 1

The growth of *Chattonella marina* is showed in Fig. 1

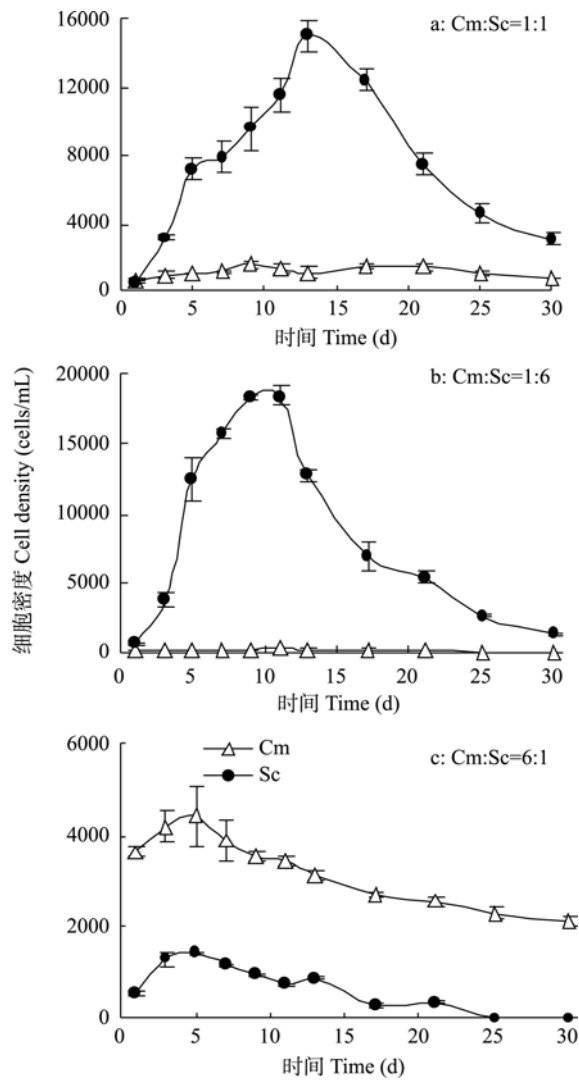


图 5 在不同接种比例共培养条件下，海洋卡盾藻和中肋骨条藻的生长
Fig. 5 The growth of *Chattonella marina* and *Skeletonema costatum* in the co-cultures under different inoculation cell densities

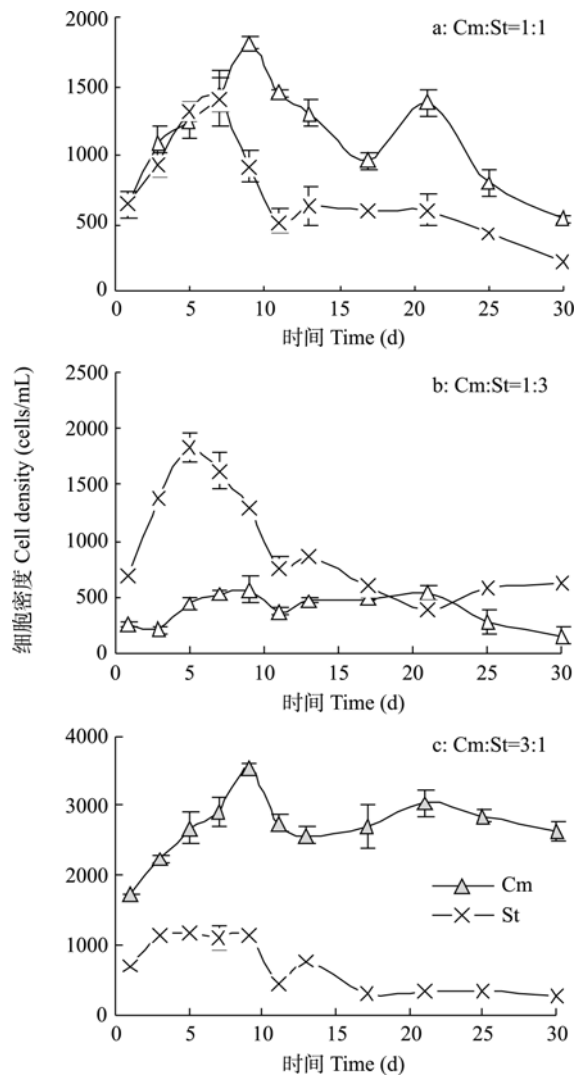


图 6 在不同接种比例共培养条件下，海洋卡盾藻和锥状斯氏藻的生长
Fig. 6 The growth of *Chattonella marina* and *Scrippsiella trochoidea* in the co-cultures under different inoculation cell densities

表 3 海洋卡盾藻与中肋骨条藻以及锥状斯氏藻的竞争抑制作用

Tab. 3 Inhibition factor between *Chattonella marina* and *Skeletonema costatum*, *Scrippsiella trochoidea* in the co-cultures under different inoculation cell densities

接种比例 Inoculation rate		K (cells/mL)	K_{\max} (cells/mL)	a	r	t_p (d)	α	β	α'	β'
1:1	海洋卡盾藻	1583	6780	0.12	0.23	2.53	0.76	—	6.43	—
1:1	中肋骨条藻	15000	77083	2.85	0.39	5.42	—	33.52	—	5.59
1:6	海洋卡盾藻	300	7020	0.56	0.12	-1.08	5.16	—	30.97	—
6:1	中肋骨条藻	18400	77083	4.77	1.11	3.67	—	21.78	—	3.63
6:1	海洋卡盾藻	4433	6550	0.79	0.40	0.13	1.72	—	10.33	—
1:6	中肋骨条藻	1453	77083	1.81	0.33	0.84	—	412.25	—	68.70
1:1	海洋卡盾藻	1816	6780	0.79	0.31	1.30	7.41	—	22.22	—
1:1	锥状斯氏藻	1407	1950	1.10	0.72	0.56	—	1.02	—	0.34
1:3	海洋卡盾藻	557	6843	1.27	0.51	1.13	8.22	—	24.67	—
3:1	锥状斯氏藻	1817	1950	1.33	0.80	0.79	—	0.42	—	0.24
1:3	海洋卡盾藻	3527	6675	0.27	0.27	1.56	6.53	—	19.58	—
3:1	锥状斯氏藻	1130	1950	1.25	1.64	1.00	—	2.18	—	0.73

本实验结果显示当初始生物量为 100 cells/mL 时, 在 10d 左右海洋卡盾藻细胞密度就能达到赤潮密度 ($>3 \times 10^5$ cells/L); 而起始细胞密度增加, 达到赤潮密度所需的时间也缩短。因此, 了解卡盾藻等有害赤潮藻类种群数量的动态变化, 可为有害赤潮灾害的预防、预警提供科学依据。

3.2 微藻种群竞争效应

微藻的体积大小在浮游生物群落的结构、组成及种间相互作用中起着重要作用, 个体小、比表面积大的微藻在对光照和营养盐的竞争更易占据优势地位^[15]。中肋骨条藻细胞体积小, 细胞分裂速度快, 在共培养条件下, 能迅速增长繁殖, 营养盐被快速消耗, 从而抑制了海洋卡盾藻的生长。但是在海洋卡盾藻的初始接种密度远远大于中肋骨条藻, 由于卡盾藻个体较大, 在空间上占据优势, 而且卡盾藻对其他海洋微藻的生长具有一定的克生作用^[16], 使骨条藻在竞争中处于劣势。而郑忠明等^[5]在研究铜绿微囊藻和四尾栅藻的种间竞争关系也认为, 铜绿微囊藻在竞争中取胜的主要原因是其对四尾栅藻的他感作用。

在生态策略方面, 卡盾藻与锥状斯氏藻细胞个体较大、分裂速度慢, 而且可进行垂直迁移、吸收有机营养物质, 并且在不良环境条件下可形成休眠孢囊。因此, 卡盾藻与锥状斯氏藻的种间竞争可谓势均力敌, 起始细胞密度是决定谁能在竞争中取胜的关键因素, 但从体积竞争抑制系数来看, 锥状斯氏藻能对海洋卡盾藻产生较强的抑制作用。此结果与自然水体中观察到的赤潮现象一致^[8]。2003 年 8 月广东省大亚湾海域发生两者引起的混合赤潮, 在种群竞争中, 总体来说是以锥状斯氏藻占据优势。同时, 赤潮发生前期两种藻的细胞密度和比例是决定赤潮期间优势物种的关键因素。在赤潮发生前锥状斯氏藻数量占优势的海区, 赤潮暴发后优势种仍然是锥状斯氏藻; 赤潮发生前海洋卡盾藻占优势的海区, 赤潮暴发后优势种仍是海洋卡盾藻。

3.3 卡盾藻种群竞争机制与策略

在自然水体中, 海洋浮游植物种间竞争激烈, 优势物种演替频繁, 群落结构常常处于不稳定的平衡状态。在本研究的所有处理中, 海洋卡盾藻与中肋骨条藻以及锥状斯氏藻竞争结果都将出现不稳定平衡状态, 与自然水体中情况相似, 它们可以在同一环境中共存, 但最终平衡将会被打破, 导致某一

藻类占据优势。

大量营养盐的不均衡消耗以及由此引起的营养盐结构的变化被认为是浮游微藻种群竞争关系发生改变的重要原因。一般来说, 硅藻对氮和硅的需求较大, 硅藻水华消耗了水体中大量的氮和硅, 最终导致水华的消亡^[12]; 与此同时, 甲藻、针泡藻等不需要硅的鞭毛藻类利用其垂直迁移以及吸收利用有机营养的生理特征, 可迅速生长繁殖并占据竞争优势, 使群落优势物种发生更迭^[17]。本研究发现, 虽然卡盾藻与骨条藻的竞争与硅酸盐含量具有一定关系, 但即使在硅酸盐严重缺乏的情况下, 骨条藻仍能在短时间内依靠细胞体内积累的硅进行分裂。在自然水体中, 硅酸盐耗尽的情况并不多见, 而且由于地表径流的影响, 补充也十分及时, 这也是维持近岸海域硅藻型浮游植物群落的重要原因。

参考文献:

- [1] Qi Y Z, Chen J F, Wang Z H, *et al.* Some observations on harmful algal bloom (HAB) events along the coast of Guangdong, southern China in 1998 [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **512**: 209—214
- [2] SOC (State Oceanic China). Bulletin of Marine Environmental Quality, 2002, 2004, 2005 [国家海洋局, 海洋环境质量公告, 2002, 2004, 2005]
- [3] Hegarty S G, Villareal T A. Effects of light level and N:P supply ratio on the competition between *Phaeocystis* cf. *pouchetii* (Hariot) Lagerheim (Prymnesiophyceae) and five diatom species [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, **226**: 241—258
- [4] Dong Y W, Dong S L, Liu X Y. The effect of initial cell density on the population competition between *Alexandrium tamarense* Balech and *Heterosigma akashiwo* Had [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2004, **34**(6): 964—968 [董云伟, 董双林, 刘相义. 不同起始浓度对塔玛亚历山大藻和赤潮异弯藻种群竞争的影响. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, **34**(6): 964—968]
- [5] Zheng Z M, Bai P F, Lu K H, *et al.* Growth characteristics and competitive parameters of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricauda* at different temperatures [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*. 2008, **32**(5): 720—727 [郑忠明, 白培峰, 陆开宏, 等. 铜绿微囊藻和四尾栅藻在不同温度下的生长特性及竞争参数计算. 水生生物学报, 2008, **32**(5): 720—727]
- [6] Wang Y, Tang X. Interactions between *Prorocentrum donghaiense* Lu and *Scrippsiella trochoidea* (Stein) Loeblich III

- under laboratory culture [J]. *Harmful Algae*, 2008, **7**(1): 65—75
- [7] Wang Z H, Qi Y Z, Chen J F, *et al.* Population dynamics of *Chattonella* in spring in Daya Bay, the South China Sea and the cause of its blooms [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(4): 394—398 [王朝晖, 齐雨藻, 陈菊芳, 等. 大亚湾春季卡盾藻种群动态及其赤潮成因分析. 水生生物学报, 2006, **30**(4): 394—398]
- [8] Li T, Liu S, Huang L M. Studies on phytoplankton community changes at Daya Bay during a red tide [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, **24**(3): 18—24 [李涛, 刘胜, 黄良民. 大亚湾一次赤潮生物期间浮游植物群落变化研究. 热带海洋学报, 2005, **24**(3): 18—24]
- [9] Xiao Y Z, Wang Z H, Chen J F, *et al.* Seasonal dynamics of dinoflagellate cysts in sediments from Daya Bay, the South China Sea, its relationship to the bloom of *Scrippsiella trochoidea* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, **27**(4): 372—377 [肖咏之, 王朝晖, 陈菊芳, 等. 广东大亚湾甲藻孢囊及其与锥状斯氏藻赤潮的关系. 水生生物学报, 2003, **27**(4): 372—377]
- [10] Chen X W, Gao K S. Response of photosynthesis of the bloom-formation marine diatom *Skeletonema costatum* to changes in pH and inorganic nitrogen concentrations in seawater [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **28**(6): 635—639 [陈雄文, 高坤山. 赤潮藻中肋骨条藻的光合作用对海水 pH 和 N 变化的响应. 水生生物学报, 2006, **28**(6): 635—639]
- [11] Guillard R R L. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrate animals [A]. Berg Jr C J. Culture of Marine Invertebrates—selected readings [C], Stroudsberg Pa., Hutchinson Ross, 1983, 108—132
- [12] Gilpin L C, Davidson K, Roberts E. The influence of changes in nitrogen: silicon ratios on diatom growth dynamics [J]. *Journal of Sea Research*, 2004, **51**: 21—35
- [13] Chen D H, Liu Y D, Yuan J F, *et al.* Experiments of mixed culture and calculation of competitive parameters between *Microcystis* (Cyanobacteria) and *Scenedesmus* (Green algae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(6): 908—913 [陈德辉, 刘永定, 袁俊峰, 等. 微囊藻和栅藻共培养实验及其竞争参数的计算. 生态学报, 1999, **19**(6): 908—913]
- [14] Yamaguchi H, Sakamoto S, Yamaguchi M. Nutrition and growth kinetics in nitrogen- and phosphorus-limited cultures of the novel red tide flagellate *Chattonella ovata* (Raphidophyceae) [J]. *Harmful Algae*, 2008, **7**: 26—32
- [15] Armstrong R A. A hybrid spectral representation of phytoplankton growth and zooplankton response: the “control rod” model of plankton in interaction [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, **50**: 2895—2916
- [16] Gross E M. Allelopathy of aquatic autotrophs [J]. *Crit. Rev. Plant. Sci.* 2003, **22**(3—4): 313—339
- [17] Hodgkiss I J, Lu S H. The effects of nutrients and their ratios on phytoplankton abundance in Junk Bay, Hongkong [J]. *Hydrobiologia*, 2004, **512**: 215—229

STUDIES ON INTERSPECIES COMPETITION OF *CHATTONELLA MARINA* WITH *SKELETONEMA COSTATUM* AND *SCRIPPSIELLA TROCHOIDEA* IN LABORATORY CULTURES

WANG Zhao-Hui^{1, 2}, YUAN Mei-Ling^{1, 3}, LUO Yu-Min¹ and ZHAO Jian-Gang¹

(1. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632; 2. Key Laboratory of Aquatic Eutrophication and Control of Harmful Algal Blooms of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510632;

3. The Forth Middle School of Zibo, Shandong Province, Zibo 255100)

Abstract: In order to understand the interspecies competition of *Chattonella marina* with other harmful algal bloom species, and to provide useful information for the control of *C. marina* bloom, the growth of *C. marina* and competition between *C. marina* (Cm) and two other harmful algal bloom (HAB) species, *Skeletonema costatum* (Sc) and *Scrippsiella trochoidea* (St), were studied. Experiments were conducted at three initial inoculation proportions according to their cell volumes, and four Si concentrations. The competition parameters were used to compare interspecific competition between the three algae, and the concept of volume competition parameter was firstly introduced. The carrying capacity (K) of *C. marina* showed no obvious changes in five different initial cell densities ranged from 100 cells/mL to 3600 cells/mL, however, the maximum cell density and the stable stage postponed with the decreasing of initial cell density. *S. costatum* had the ability to keep steady growth even in Si free culture, and held the predominance of cell number in the competition of *C. marina*. Meanwhile, the increase of Si level benefited the competition of *S. costatum* to *C. marina*. The initial cell density and inoculation proportion exhibited significant effects on interspecific competition of the three species. Although *S. costatum* grew faster than *C. marina* in the same initial cell density (600 cells/mL), the volume competition parameters between them (α' and β') were comparable. *S. costatum* won in the culture when its inoculation cell number overpassed that of *C. marina* (Cm:Sc=1:6, the same cell volume). *C. marina* predominated in the culture only when its cell number greatly preponderated over *S. costatum* (Cm:Sc=6:1). *S. trochoidea* produced strong inhibition effects on the growth of *C. marina* under all treatments of the experiment (Cm:St=1:1, 1:3, 3:1), and its volume competition parameters to *C. marina* (α') were 27—100 times higher than the opposition (β'). However, no out-competitions were observed in all treatments of this study, which implied that all of the three species had the possibility to dominate in the interspecific competition. From the results of this study, it could be concluded that background cell number and proportion of HAB species in the water column may play important roles in phytoplankton competition, and the background cell number would be a useful parameter for the forecast of *C. marina* bloom.

Key words: *Chattonella marina*; Interspecies competition; Initial cell density; *Skeletonema costatum*; *Scrippsiella trochoidea*