

海洋尖尾藻对2种海洋微藻的摄食特征研究

张艳苓¹, 李雪梅¹, 李志伟^{1,2}, 安鑫龙^{1,2*}

(1. 河北农业大学海洋学院, 赤潮科学与海洋浮游生物学实验室, 河北 秦皇岛 066003;

2. 秦皇岛市海洋工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066003)

摘要: 为研究海洋尖尾藻对双色藻和齿状纹石藻的摄食特征, 分别采用2种海洋微藻为饵料培养海洋尖尾藻, 分析海洋尖尾藻对2种海洋微藻的摄食过程、培养液颜色变化特征和摄食规律。结果显示, 海洋尖尾藻摄食双色藻时将藻丝一段一段慢慢裹入纵沟, 而齿状纹石藻整个细胞同时被裹入纵沟。海洋尖尾藻接种6 h后, 对2种海洋微藻的摄食率均为100%。随着海洋尖尾藻细胞初始密度(双色藻培养液中分别为 0.8×10^4 、 2.4×10^3 和 0.8×10^3 个/mL, 齿状纹石藻培养液中分别为 3.9×10^3 、 2.4×10^3 和 1.7×10^3 个/mL)降低, 其种群在初始密度为 3.4×10^7 个/mL的双色藻培养液中达到稳定期所需时间增加, 分别为接种后第3、4和6天, 双色藻被摄食完毕所需时间也增加, 分别为接种后第5、10和15天; 海洋尖尾藻种群在初始密度为 6.6×10^5 个/mL的齿状纹石藻培养液中达到稳定期所需时间增加, 分别为接种后第4、5和12天, 齿状纹石藻被摄食完毕所需时间也增加, 分别为接种后第6、7和13天。研究表明, 海洋尖尾藻对不同大小和体制类型的双色藻和齿状纹石藻的摄食过程不同, 培养方式对培养液颜色变化产生影响, 饵料藻种类以及饵料藻和海洋尖尾藻最初浓度配比会影响海洋尖尾藻摄食, 15 d培养过程中双色藻种群和齿状纹石藻种群均向海洋尖尾藻种群发生了演替。

关键词: 海洋尖尾藻; 双色藻; 齿状纹石藻; 摄食过程; 摄食规律; 颜色变化

中图分类号: Q 949.2; S 917.3

文献标志码: A

海洋尖尾藻(*Oxyrrhis marina*)是世界广布的一种海洋浮游真核生物, 在我国分布于广东省大鹏湾和大亚湾、山东省青岛以及河北省秦皇岛等沿海^[1-4], 该藻目前已成为国际上室内海洋生物实验的模式海洋浮游生物^[3,5-7], 但在国内只对其进行了初步研究^[1-2,4,8-13]。国内外研究表明, 海洋尖尾藻摄食广泛, 对亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)^[2]、赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)^[14]、假微型海链藻(*Thalassiosira pseudonana*)^[15]、球等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)^[16]、盐生红细胞藻(*Rhodomonas salina*)^[17]、杜氏盐藻(*Dunaliella tertiolecta*)^[18]等海洋微藻以及细菌和酵母等微生物^[12,19-20]具有摄食作用, 是养殖水产动物生物饵

料的重要敌害生物之一, 在生产实践中对水产生物饵料培养产生了很大危害; 另一方面, 海洋尖尾藻是赤潮原因种, 能够在河口或海湾区域产生粉红色赤潮^[21]。海洋尖尾藻与其他海洋生物之间的作用主要表现在摄食和化感作用两个方面^[3]; 就目前而言, 还未见海洋尖尾藻对其他海洋生物具有化感作用的报道。自然海域中海洋尖尾藻对海洋微藻和海洋微生物等的摄食在维持海洋生态系统平衡中发挥着重要作用, 一旦局部海域食物网结构趋于单一, 海洋尖尾藻发生暴食, 其后果如何还未见报道。因此, 在实验室条件下模拟构建简单食物链研究海洋尖尾藻对海洋微藻的摄食特征, 对生物饵料培养和近海生物群落演替乃至赤潮演替研究具有重要意义。

收稿日期: 2013-08-29 修回日期: 2014-01-11

资助项目: 河北省高等学校科学技术研究计划项目(Z2012026); 河北农业大学青年科学基金资助项目(QJ201202); 河北省秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目(2012022A012)

通信作者: 安鑫龙, E-mail: axlqhd@126.com

关于海洋尖尾藻对双色藻 (*Cyanobium* sp.) 和齿状纹石藻 (*Pleurochrysis dentata*) 的摄食研究还未见报道。本实验采用海洋尖尾藻分别与双色藻和齿状纹石藻在三角瓶中共培养的方法,研究了海洋尖尾藻对这 2 种海洋微藻的摄食特征,以期探讨共培养条件下 2 种海洋微藻培养液的颜色变化和海洋尖尾藻对 2 种海洋微藻的摄食过程与规律,为河北省秦皇岛市沿海生物群落演替和赤潮演替提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 藻种来源

海洋尖尾藻于 2010 年 7 月采自秦皇岛市沿岸海域^[4],双色藻和齿状纹石藻于 2011 年 9 月采自河北省秦皇岛市沿海正在发生赤潮的水域,均由河北农业大学海洋学院赤潮科学与海洋浮游生物学实验室分离、纯化获得,且均为纯种。

1.2 主要仪器设备

BX51 型数码显微镜(日本 OLYMPUS 公司);GXZ 智能型光照培养箱(宁波江南仪器厂);SW-CJ-2F 型洁净工作台(苏净集团苏州安泰空气技术有限公司)。

1.3 实验方法

双色藻和齿状纹石藻的室内培养 在洁净工作台内,分别于盛有 230 mL f/2 培养液的三角瓶内接种双色藻和齿状纹石藻 20 mL,然后置于光照培养箱内培养,培养条件:温度 25 ℃,光强 60 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,L:D = 12 h:12 h。用显微镜检查 2 种海洋微藻的生长情况,每天上午、下午和晚上各定时摇匀一次。

海洋尖尾藻细胞的室内培养 在洁净工作台内,分别在盛有 230 mL 双色藻和齿状纹石藻培养液的三角瓶中加入 20 mL 饥饿 2 d 的海洋尖尾藻培养液,双色藻初始密度 3.8×10^5 个/mL、齿状纹石藻为 3.1×10^5 个/mL、海洋尖尾藻为 1.1×10^3 个/mL,然后置于光照培养箱内培养,培养条件同上,用显微镜检查海洋尖尾藻的生长情况,每天上午、下午和晚上各定时摇匀一次。

海洋尖尾藻细胞对双色藻和齿状纹石藻摄食的显微观察 分别吸一小滴上述培养的海洋尖尾藻培养液置于洁净的凹玻片中央,然后分别利用 OLYMPUS 显微镜连续观察海洋尖尾藻细胞对双色藻和齿状纹石藻的摄食过程;上述培养液

培养 6 h 后,每个样品随机观察海洋尖尾藻细胞 >200 个,分别记录细胞内含有上述 2 种海洋微藻的海洋尖尾藻个数,计算其摄食率^[22]。

海洋尖尾藻培养液颜色变化观察 按照上述“海洋尖尾藻细胞的室内培养”方法,分别以双色藻和齿状纹石藻为饵料培养海洋尖尾藻。每种饵料设 6 个平行,其中 3 瓶静置培养,另 3 瓶每天上午、下午和晚上各定时摇匀一次。培养期间,逐日观察培养液的透明度和颜色变化并拍照。

海洋尖尾藻细胞对双色藻和齿状纹石藻的摄食规律研究 在洁净工作台内,分别在 9 个盛有 230 mL 双色藻和 9 个盛有 230 mL 齿状纹石藻培养液的三角瓶中加入 20 mL 饥饿 2 d 的海洋尖尾藻培养液,立即显微计数海洋尖尾藻、双色藻和齿状纹石藻的密度。9 个三角瓶中双色藻细胞初始密度相同,均为 3.4×10^7 个/mL,3 个平行海洋尖尾藻细胞初始密度分别为 1 号 0.8×10^4 个/mL、2 号 2.4×10^3 个/mL、3 号 0.8×10^3 个/mL;9 个三角瓶中齿状纹石藻细胞初始密度相同,均为 6.6×10^5 个/mL,3 个平行海洋尖尾藻细胞初始密度分别为 1 号 3.9×10^3 个/mL、2 号 2.4×10^3 个/mL、3 号 1.7×10^3 个/mL。计数完毕后全部置于光照培养箱内培养,培养条件同上。每天上午、下午和晚上各定时摇匀一次。每天上午定时摇匀藻液并取样 1 mL,加入 1 滴 luglos 试剂使其固定,用容积为 0.1 mL 的浮游生物计数框在显微镜下计数,每个样重复计数 3 次,取平均值,接种海洋尖尾藻后连续培养 15 d,分别绘制不同密度海洋尖尾藻对双色藻和齿状纹石藻细胞密度的变化曲线。

2 结果

2.1 海洋尖尾藻对双色藻和齿状纹石藻摄食的显微观察

海洋尖尾藻摄食双色藻的过程如下:海洋尖尾藻细胞靠近双色藻,首先利用 2 根鞭毛围住双色藻并拖动至合适位置,然后以双色藻在内、海洋尖尾藻在外的排列方式连续旋转若干圈后,海洋尖尾藻将双色藻的一条藻丝一段一段慢慢裹入其纵沟,摄食完毕后开始摄食剩下的藻丝。与摄食双色藻过程不同的是,海洋尖尾藻将整个齿状纹石藻同时裹入纵沟(图 1)。

双色藻培养液和齿状纹石藻培养液内接种海

洋尖尾藻6 h后,各随机观察了2种培养液内500个海洋尖尾藻细胞,发现每个海洋尖尾藻细胞内均

含有双色藻藻丝或齿状纹石藻细胞,因此海洋尖尾藻对2种海洋微藻的摄食率均为100%(表1)。

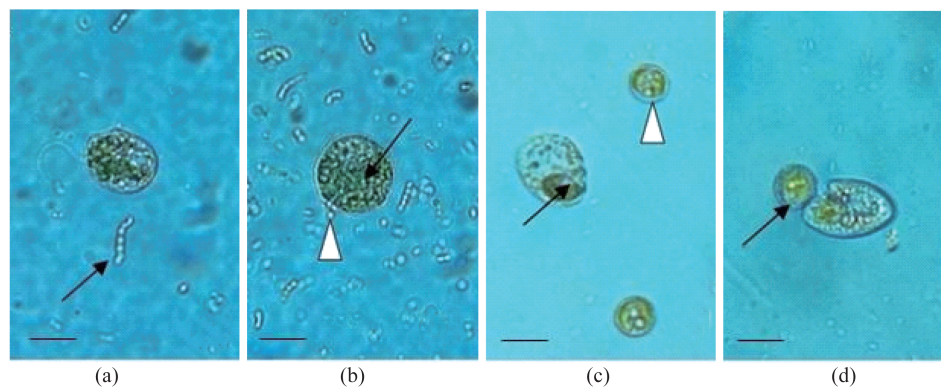


图1 海洋尖尾藻对双色藻和齿状纹石藻的摄食

(a) 海洋尖尾藻细胞寻找双色藻(黑色箭头示双色藻);(b) 海洋尖尾藻正在摄食双色藻(黑色箭头示海洋尖尾藻细胞内的双色藻,白楔形尖端示正在进行摄食);(c) 海洋尖尾藻细胞内含1个齿状纹石藻(黑色箭头示海洋尖尾藻细胞内的齿状纹石藻,白楔形尖端示齿状纹石藻);(d) 海洋尖尾藻准备摄食第2个齿状纹石藻(黑色箭头示齿状纹石藻)。标尺=20 μm

Fig.1 Feeding of *O. marina* on *Cyanobium* sp. and *P. dentata*

(a) *O. marina* is searching for *Cyanobium* sp. (the black arrow is pointing at *Cyanobium* sp.); (b) *O. marina* is feeding on *Cyanobium* sp. (the black arrow is pointing at *Cyanobium* sp. contained in *O. marina*, the white wedge is pointing at *Cyanobium* sp. feeding by *O. marina*); (c) one cell of *P. dentata* contained in *O. marina* (the black arrow is pointing at *P. dentata* contained in *O. marina*, the white wedge is pointing at *P. dentata*); (d) *O. marina* is preparing for feeding the second *P. dentata* (the black arrow is pointing at *P. dentata*). bar = 20 μm

表1 海洋尖尾藻对双色藻和齿状纹石藻的摄食率

Tab.1 Feeding rates of *O. marina* on *Cyanobium* sp. and *P. dentata*

实验组 group	观察海洋尖尾藻 细胞个数/个 number of <i>O. marina</i> observed	摄食率/% feeding rate
双色藻 + 海洋尖尾藻 <i>Cyanobium</i> sp. + <i>O. marina</i>	500	100
齿状纹石藻 + 海洋尖尾藻 <i>P. dentata</i> + <i>O. marina</i>	500	100

2.2 海洋尖尾藻培养液颜色变化特征

观察发现,静置培养时,以双色藻为饵料培养海洋尖尾藻2 d时培养液透明度变化不明显,7 d时培养液透明度明显增大,10 d时培养液出现粉红色(图2);以齿状纹石藻为饵料培养海洋尖尾藻2 d时培养液透明度变化不明显,7 d时培养液透明度明显增大,10 d时培养液出现淡粉红色(图3)。每天定时3次摇动培养时,以双色藻为饵料培养海洋尖尾藻2 d时培养液透明度明显增大,以后培养液透明度增大至无色(图4);以齿状纹石藻为饵料培养海洋尖尾藻2 d时培养液透明度变化不明显,7 d时培养液透明度明显增大,以后培养液透明度增大至无色(图5)。

2.3 海洋尖尾藻细胞对双色藻的摄食规律

在双色藻细胞初始密度相同(3.4×10^7

个/mL)、海洋尖尾藻细胞初始密度不同(1号海洋尖尾藻 0.8×10^4 个/mL、2号海洋尖尾藻 2.4×10^3 个/mL、3号海洋尖尾藻 0.8×10^3 个/mL)条件下,随着培养时间延长,双色藻细胞密度逐渐减小;海洋尖尾藻细胞密度逐渐增加,当细胞达到最大密度后停止生长至藻密度下降(图6)。海洋尖尾藻细胞初始密度为 0.8×10^4 个/mL,培养5 d后达到稳定时的最大密度为 5.6×10^4 个/mL,11 d后细胞密度逐渐降低,至15 d时降低为 1.0×10^3 个/mL,而双色藻细胞密度在接种海洋尖尾藻4 d时显著降低,至15 d时降低为 2.4×10^4 个/mL;海洋尖尾藻细胞初始密度为 2.4×10^3 个/mL条件下,培养6 d后达到稳定时的最大密度为 5.0×10^4 个/mL,14 d后细胞密度逐渐降低,至15 d时降低为 5.3×10^3 个/mL,而双色藻细胞密度在接种海洋尖尾藻4 d时显著降低,至15 d时降低到 3.1×10^5 个/mL;海洋尖尾藻细胞初始密度为 0.8×10^3 个/mL条件下,培养12 d后达到稳定时的最大密度为 7.8×10^4 个/mL,15 d内没有出现明显衰亡期,15 d时的细胞密度为 6.7×10^4 个/mL,而双色藻细胞密度在接种海洋尖尾藻5 d时显著降低,至15 d时降低到 8.6×10^5 个/mL。单因子方差分析($P < 0.01, \alpha = 0.01$)表明,海洋尖尾藻不同初始密度对双色藻摄食有极显著影响。

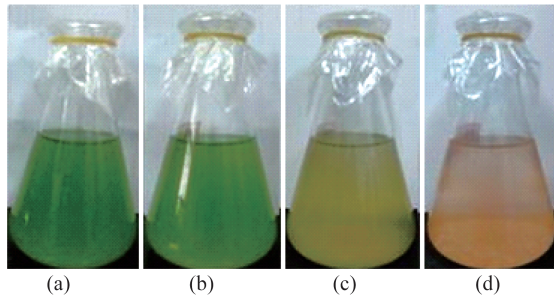


图2 静置海洋尖尾藻培养液(双色藻饵料)颜色变化
(a) 双色藻培养液; (b) 接种尖尾藻 2 d 培养液; (c) 接种尖尾藻 7 d 培养液; (d) 接种尖尾藻 10 d 培养液

Fig. 2 Color changes of culture media fed by *Cyanobium* sp. under static state

(a) *Cyanobium* sp.; (b) inoculated by *O. marina* for 2 days; (c) inoculated for 7 days; (d) inoculated for 10 days

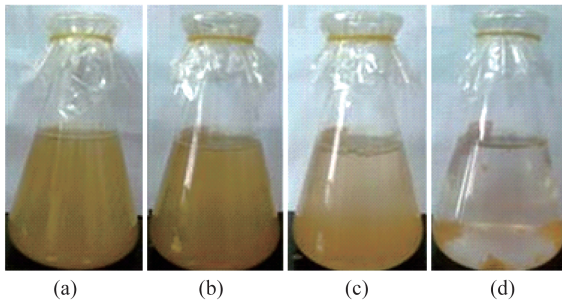


图3 静置海洋尖尾藻培养液(齿状纹石藻饵料)颜色变化

(a) 齿状纹石藻培养液; (b) 接种尖尾藻 2 d 培养液; (c) 接种尖尾藻 7 d 培养液; (d) 接种尖尾藻 10 d 培养液

Fig. 3 Color changes of culture media fed by *P. dentata* under static state

(a) *P. dentata*; (b) inoculated by *O. marina* for 2 days; (c) inoculated for 7 days; (d) inoculated for 10 days

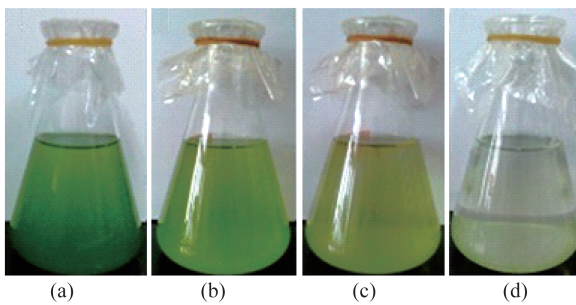


图4 摇动海洋尖尾藻培养液(双色藻饵料)颜色变化
(a) 双色藻培养液; (b) 接种尖尾藻 2 d 培养液; (c) 接种尖尾藻 7 d 培养液; (d) 接种尖尾藻 10 d 培养液

Fig. 4 Color changes of culture media fed by *Cyanobium* sp. under shaking state

(a) *Cyanobium* sp.; (b) inoculated by *O. marina* for 2 days; (c) inoculated for 7 days; (d) inoculated for 10 days

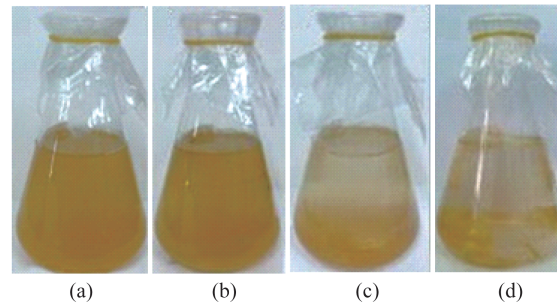


图5 摇动海洋尖尾藻培养液(齿状纹石藻饵料)颜色变化

(a) 齿状纹石藻培养液; (b) 接种尖尾藻 2 d 培养液; (c) 接种尖尾藻 7 d 培养液; (d) 接种尖尾藻 10 d 培养液

Fig. 5 Color changes of culture media fed by *P. dentata* under shaking state

(a) *P. dentata*; (b) inoculated by *O. marina* for 2 days; (c) inoculated for 7 days; (d) inoculated for 10 days

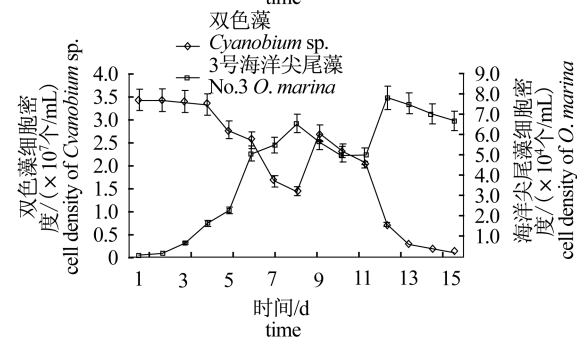
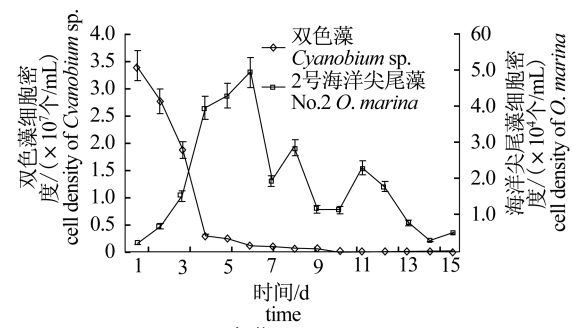
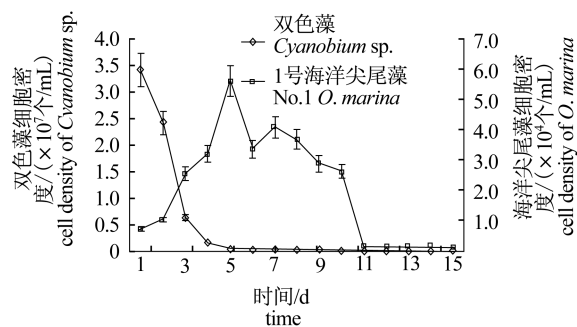


图6 不同初始密度海洋尖尾藻对双色藻的摄食

Fig. 6 Feedings of *O. marina* at different initial cell densities on *Cyanobium* sp.

2.4 海洋尖尾藻细胞对齿状纹石藻的摄食规律

在齿状纹石藻细胞初始密度相同(6.6×10^5 个/mL)、海洋尖尾藻细胞初始密度不同(1号海洋尖尾藻 3.9×10^3 个/mL、2号海洋尖尾藻 2.4×10^3 个/mL、3号海洋尖尾藻 1.7×10^3 个/mL)条件下,随着培养时间延长,齿状纹石藻细胞密度逐渐减小;海洋尖尾藻细胞密度逐渐增加,当细胞达到最大密度后停止生长至藻密度下降(图7)。海洋尖尾藻细胞初始密度为 3.9×10^3 个/mL 条件下,培养7 d后达到稳定时的最大密度,为 5.8×10^4 个/mL,15 d内没有出现明显衰亡期,15 d时的细胞密度为 4.4×10^4 个/mL,而齿状纹石藻细胞密度在接种海洋尖尾藻4 d时显著降

低,至15 d时降低到 1.2×10^3 个/mL;海洋尖尾藻细胞初始密度为 2.4×10^3 个/mL 条件下,培养13 d后达到稳定时的最大密度,为 4.8×10^4 个/mL,15 d内没有出现明显衰亡期,15 d时的细胞密度为 3.7×10^4 个/mL,而齿状纹石藻细胞密度在接种海洋尖尾藻6 d时显著降低,至15 d时降低到 2.6×10^3 个/mL;海洋尖尾藻细胞初始密度为 1.7×10^3 个/mL 条件下,培养14 d后达到稳定时的最大密度,为 7.2×10^4 个/mL,15 d内没有出现明显衰亡期,15 d时细胞密度为 6.2×10^4 个/mL,而齿状纹石藻细胞密度在接种海洋尖尾藻11 d时显著降低,至15 d时降低到 4.8×10^3 个/mL。单因子方差分析($P < 0.01, \alpha = 0.01$)表明,海洋尖尾藻不同初始密度对齿状纹石藻摄食有极显著影响。

3 讨论

海洋尖尾藻可以通过摄食硅藻、绿藻、隐藻、甲藻、金藻以及酵母和细菌等进行异养生活^[1-2]。安鑫龙等^[2-3]研究结果显示,海洋尖尾藻能够对个体小于其本身的亚心形扁藻、蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、绿色巴夫藻(*Pavlova viridis*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)、三角褐指藻(*Phaeodactylum tricorutum*)和湛江等鞭金藻(*Isochrysis zhanjiangensis*)等饵料藻直接进行过滤摄食。据本次研究结果可知,海洋尖尾藻对不同大小和体制类型的海洋微藻摄食过程不同:双色藻为丝状体,藻丝长度 $25.0 \sim 38.0 \mu\text{m}$,大于海洋尖尾藻细胞纵沟长度,海洋尖尾藻摄食时一段一段将其裹入纵沟;齿状纹石藻为单细胞个体,细胞直径 $12.5 \sim 15.0 \mu\text{m}$,远小于海洋尖尾藻细胞,海洋尖尾藻摄食齿状纹石藻时的过程与摄食亚心形扁藻等海洋微藻一致^[2]。Jeong等^[19]研究发现,海洋尖尾藻摄食细菌时,鞭毛搅动使周围水体形成捕食流,拦截进入纵沟中的细菌进行摄食。Roberts等^[23]认为海洋尖尾藻摄食海洋微藻的过程大体分为寻找、接触、捕获、处理、摄食和消化等6个步骤,在捕获和处理过程中,海洋微藻的拒捕行为和细胞表面生物化学性质等有关。因此,海洋尖尾藻对种类繁多、细胞表面性质各异、个体大小和形态差异大的海洋微型生物具有多样化的摄食过程。

张淑雯等^[24]研究了链状亚历山大藻

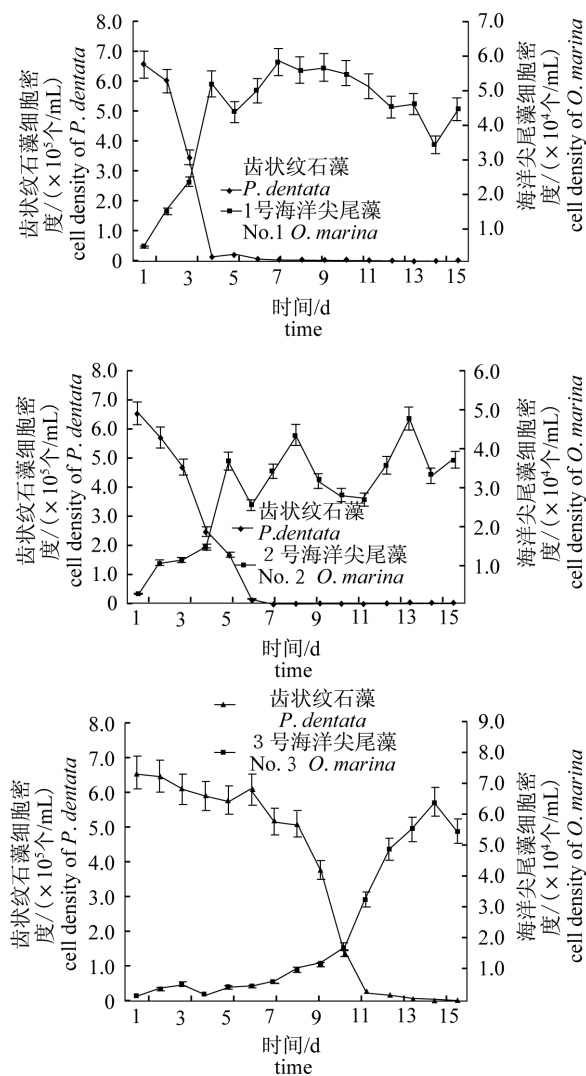


图7 不同初始密度海洋尖尾藻对齿状纹石藻的摄食

Fig. 7 Feedings of *O. marina* at different initial cell densities on *P. dentata*

(*Alexandrium catenella*) 等 6 种赤潮甲藻对海洋微藻的吞噬行为, 结果发现, 正常光照培养 6 h 后, 只观测到 1 个游动的链状亚历山大藻细胞内摄食了 2~3 个荧光标记的聚球藻(*Synechococcus cfelongates*, FLSc), 摄食率极低。在东海赤潮高发区现场船基围隔实验中^[25], 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*) 摄食荧光标记等鞭金藻的数量为 1~4 个, 一般只摄食 1 个荧光标记骨条藻(*Skeletonema* sp., FLS), 这可能与多数骨条藻为长链结构, 较难吞噬有关; 在观测的 500 个细胞中, 仅 2~7 个东海原甲藻细胞具有摄食行为, 摄食率 0.4%~1.4%。本实验结果显示, 海洋尖尾藻对双色藻和齿状纹石藻的摄食率均为 100%, 明显高于链状亚历山大藻和东海原甲藻等光合自养型混合营养生物^[24-25]。关于海洋尖尾藻的摄食研究, 有些饵料藻进行了荧光标记^[26], 而有些没有进行标记^[14,27], 这主要是由于海洋尖尾藻细胞个体相对较大, 在普通光学显微镜下能够清晰地看到其细胞内是否含有饵料藻, 因此, 是否有必要进行荧光标记应依研究目的确定。如本研究中主要是研究海洋尖尾藻的摄食率, 所用藻种均为纯种且采用无菌操作, 且海洋尖尾藻细胞内均含有饵料藻, 故本研究没有对饵料藻进行荧光标记, 这有待今后进一步研究。

以海洋微藻为饵料的海洋尖尾藻培养液的颜色变化原因较为复杂, 国内外仅对此作了初步研究, 如安鑫龙等^[12]研究表明, 饵料藻为亚心形扁藻和米氏凯伦藻且静置培养海洋尖尾藻时, 培养液颜色分别由饵料藻的绿色和黄褐色均变为淡粉红色至粉红色, 海洋尖尾藻培养液颜色变化规律指示了海洋尖尾藻对海洋微藻的摄食进程, 无需显微观察即可判断海洋尖尾藻的培养程度; Lowe 等^[28]研究发现, 海洋尖尾藻的浓培养物中出现了粉红色。本研究发现, 静置培养的双色藻培养液接种海洋尖尾藻 10 d 后出现粉红色, 齿状纹石藻培养液接种海洋尖尾藻 10 d 后出现淡粉红色, 而每日定时摇动 3 次培养的双色藻培养液和齿状纹石藻培养液均未出现肉眼可见的粉红色。培养液出现不同程度粉红色的原因, 海洋尖尾藻的培养方式和培养液理化因子等对培养液颜色变化影响, 如何定量研究培养液颜色变化等等均有待进一步研究。

在共培养条件下, 海洋尖尾藻对双色藻和齿

状纹石藻的摄食结果与褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*) 对不同初始密度小球藻(*Chlorella* sp.)^[29]的摄食研究结果一致: 小球藻细胞初始密度分别为 6×10^6 、 8×10^6 、 10×10^6 、 12×10^6 和 14×10^6 个/mL 时, 100 个/mL 轮虫摄食 12 h 后各梯度组小球藻最终密度分别为 0.93×10^6 、 1.95×10^6 、 3.67×10^6 、 5.73×10^6 和 7.52×10^6 个/mL。Jeong 等^[14]研究了 73 h 内海洋尖尾藻对赤潮异弯藻的摄食特征, 结果表明: 随着培养时间的延长, 实验中宇宙 MC1 内的赤潮异弯藻细胞的浓度在最初 18 h 内保持在 1.4×10^4 ~ 1.8×10^4 个/mL, 18~58 h 内连续降低, 至 73 h 时降至 10 个/mL, 而海洋尖尾藻的浓度从 2.10×10^3 个/mL 升高到 9.03×10^3 个/mL; 对照中宇宙 MC2 内的赤潮异弯藻的浓度由 1.90×10^4 个/mL 升高到 5.04×10^4 个/mL。本实验结果显示, 随着海洋尖尾藻细胞初始密度降低, 初始密度为 3.4×10^7 个/mL 的双色藻被摄食完毕所需时间增加, 分别为接种后第 5、10 和 15 天; 初始密度为 6.6×10^5 个/mL 的齿状纹石藻被摄食完毕所需时间也增加, 分别为接种后第 6、7 和 13 天。可见, 饵料藻和海洋尖尾藻的最初浓度配比影响海洋尖尾藻摄食。本研究还发现, 在实验设计的海洋微藻初始密度范围内, 15 d 培养过程中双色藻种群和齿状纹石藻种群均向海洋尖尾藻种群发生了演替, 且演替过程中海洋尖尾藻密度变动范围 (2.4×10^4 ~ 7.8×10^4 个/mL) 内培养液均没有出现粉红色。Begun 等^[21] 研究结果显示, 日本海 Amursky 湾的海洋尖尾藻粉红色赤潮中, 海洋尖尾藻的最大密度为 4.43×10^5 个/mL。海洋尖尾藻分布广泛, 且引发的赤潮多发生在海湾, 但由于人们对发生的海洋尖尾藻赤潮的报道较少^[30], 赤潮爆发密度范围以及呈现粉红色的密度范围还不明朗, 这有待进一步调查研究。

4 结论

通过显微观察、培养液颜色变化和显微计数相结合的方法分析海洋尖尾藻的摄食特征, 可以得出: (1) 海洋尖尾藻摄食双色藻时将藻丝一段一段慢慢裹入纵沟, 而齿状纹石藻整个细胞同时被裹入纵沟, 因而海洋尖尾藻对不同大小和体制类型海洋微藻的摄食过程不同, 海洋尖尾藻培养 6 h 后对 2 种海洋微藻的摄食率均为 100% ;

(2)海洋尖尾藻静置培养过程中培养液颜色出现淡粉红色至粉红色,摇动培养液未出现,故培养方式对培养液颜色变化产生影响;(3)在每天定时摇动3次、以双色藻和齿状纹石藻为饵料培养海洋尖尾藻过程中,随着海洋尖尾藻细胞初始密度降低,海洋尖尾藻种群达到稳定期所需时间增加,双色藻和齿状纹石藻细胞密度降低速率均减慢。因此,饵料藻种类以及饵料藻和海洋尖尾藻最初浓度配比影响海洋尖尾藻摄食。在实验设计的海洋微藻初始密度范围内,15 d培养过程中双色藻种群和齿状纹石藻种群均向海洋尖尾藻种群发生了演替。

双色藻由中国科学院水生生物研究所李仁辉研究员帮助鉴定,齿状纹石藻由天津科技大学海洋科学与工程学院孙军教授帮助鉴定,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] Am X L, Yao Q, Pan J. Red tide in coastal of Hebei Province [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011: 35 - 37. [安鑫龙, 么强, 潘娟. 河北省沿海赤潮. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 35 - 37.]
- [2] An X L, Li X M, Li Y N. The Feeding of *Oxyrrhis Marina* [J]. Ocean Technology, 2012, 31 (1): 100 - 102. [安鑫龙, 李雪梅, 李亚宁. 海洋尖尾藻的摄食. 海洋技术, 2012, 31 (1): 100 - 102.]
- [3] An X L, Li X M, Gong C G. Research progress on ecological characteristics of *Oxyrrhis marina* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22 (3): 364 - 369. [安鑫龙, 李雪梅, 宫春光. 海洋尖尾藻的生态特征. 上海海洋大学学报, 2013, 22 (3): 364 - 369.]
- [4] An X L, Li X M, Yao Q. *Oxyrrhis marina*— a new recorded species of one red tide algae in Hebei Province [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2011, 39 (9): 5078. [安鑫龙, 李雪梅, 么强. 河北省1个赤潮藻新记录种—海洋尖尾藻. 安徽农业科学, 2011, 39 (9): 5078.]
- [5] Hartz A, Sherr B F, Sherr E B. Using inhibitors to investigate the involvement of cell signaling in predation by marine phagotrophic protists [J]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 2008, 55 (1): 18 - 21.
- [6] Lowe C D, Montagnes D J S, Martin L E, et al. Patterns of genetic diversity in the marine heterotrophic flagellate *Oxyrrhis marina* (Alveolata: Dinophyceae) [J]. Protist, 2010, 161 (2): 212 - 221.
- [7] Hae J J, Yeong D Y, Jae S K, et al. Growth, feeding and ecological roles of the mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates in marine planktonic food webs [J]. Ocean Science Journal, 2010, 45 (2): 65 - 91.
- [8] Wen J F, Li J Y. The nucleoskeleton of special dinoflagellate, *Oxyrrhis marina* [J]. Zoological Research, 1992, 13 (1): 89 - 94. [文建凡, 吴传芳, 李靖炎. 特殊涡鞭毛虫—尖尾藻的核骨架. 动物学研究, 1992, 13 (1): 89 - 94.]
- [9] Zhang C Y, Zeng C M, Li J Y. The comparative study on the chromosomes of *Oxyrrhis marina* and typical dinoflagellate paying special attention to the systematic position of this organism [J]. Zoological Research, 1996, 17 (3): 331 - 336. [张超英, 曾丛梅, 李靖炎. 特殊涡鞭毛虫—尖尾藻染色体与典型涡鞭毛虫染色体的比较研究. 动物学研究, 1996, 17 (3): 331 - 336.]
- [10] Fang Z L. A comparative study of the ultrastructure of chromosomes in *Amphidinium carterae* and *Oxyrrhis marina* [J]. Journal of Chongqing Teachers College: Natural Science Edition, 1994, 11 (2): 31 - 34. [方志林. 前环藻与尖尾藻染色体超微结构的比较研究. 重庆师范学院学报: 自然科学版, 1994, 11 (2): 31 - 34.]
- [11] An X L, Li X M, Gong C G. Laboratory culture of *Oxyrrhis marina* Dujardin [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2012, 40 (1): 85 - 86. [安鑫龙, 李雪梅, 宫春光. 海洋尖尾藻的室内培养. 安徽农业科学, 2012, 40 (1): 85 - 86.]
- [12] An X L, Li X M, Li Y N. Basic features of the culture medium of *Oxyrrhis marina* [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2012, 40 (13): 7827 - 7828. [安鑫龙, 李雪梅, 李亚宁. 海洋尖尾藻培养液的基本特征. 安徽农业科学, 2012, 40 (13): 7827 - 7828.]
- [13] Zhang J Y, Li Y, Chen J X. Salinity tolerance and genetic diversity of the dinoflagellate *Oxyrrhis marina* [J]. Journal of Ocean University of China, 2010, 9 (1): 87 - 93.
- [14] Jeong H J, Kim J S, Yoo Y D, et al. Feeding by the heterotrophic dinoflagellate *Oxyrrhis marirta* on the red-tide raphidophyte *Heterosigma akashiwo*: a potential biological method to control red tides using mass-cultured grazers [J]. Journal of Eukaryotic

- Microbiology, 2003, 50(4): 274 - 282.
- [15] Saló V, Simó R, Vila-Costa M, *et al.* Sulfur assimilation by *Oxyrrhis marina* feeding on a ³⁵S-DMSP-labelled prey [J]. Environmental Microbiology, 2009, 11(12): 3063 - 3072.
- [16] Martel C M. Prey location, recognition and ingestion by the phagotrophic marine dinoflagellate *Oxyrrhis marina* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 335(2): 210 - 220.
- [17] Florian M H, Maarten B. Dietary-induced responses in the phagotrophic flagellate *Oxyrrhis marina* [J]. Marine Biology, 2010, 157(7): 1641 - 1651.
- [18] Hartz A J, Sherr B F, Sherr E B. Photoresponse in the heterotrophic marine dinoflagellate *Oxyrrhis marina* [J]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 2011, 58(2): 171 - 177.
- [19] Jeong H J, Yoo Y D, Kim J S, *et al.* Growth, feeding and ecological roles of the mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates in marine planktonic food webs [J]. Ocean Science Journal, 2010, 45(2): 65 - 91.
- [20] Droop M R. Water-soluble factors in the nutrition of *Oxyrrhis marina* [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1959, 38(3): 605 - 620.
- [21] Begun A A, Orlova T Y, Selina M S. A "bloom" in the water of Amursky Bay (Sea of Japan) caused by the dinoflagellate *Oxyrrhis marina* Dujardin, 1841 [J]. Russian Journal of Marine Biology, 2004, 30(1): 51 - 55.
- [22] Zhang Q C, Yu R C, Song J J, *et al.* Ingestion of selected HAB-forming dinoflagellates [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 402 - 413. [张清春, 于仁成, 宋静静, 等. 几株赤潮甲藻的摄食能力. 生态学报, 2012, 32(2): 402 - 413.]
- [23] Roberts E C, Wootton E C, Davidson K, *et al.* Feeding in the dinoflagellate *Oxyrrhis marina*: linking behaviour with mechanisms [J]. Journal of Plankton Research, 2011, 33(4): 603 - 614.
- [24] Zhang S W, Zhang Y, Ou L J, *et al.* Study on phagotrophic behavior of six harmful dinoflagellates on fluorescent labeled algae [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 602 - 608. [张淑雯, 张云, 欧林坚, 等. 6 种赤潮甲藻对荧光标记藻类的吞噬行为研究. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 602 - 608.]
- [25] Zhang S W, Ou L J, Lü S H, *et al.* Effects of light and nutrients on the phagotrophic behaviors of three harmful dinoflagellates [J]. Marine Sciences, 2011, 35(4): 94 - 99. [张淑雯, 欧林坚, 吕颂辉, 等. 光照及营养盐对 3 种赤潮甲藻吞噬营养行为的影响. 海洋科学, 2011, 35(4): 94 - 99.]
- [26] Höhfeld I, Melkonian M. Lifting the curtain? The microtubular cytoskeleton of *Oxyrrhis marina* (dinophyceae) and its rearrangement during phagocytosis [J]. Protist, 1998, 149(1): 75 - 88.
- [27] Jeong H J, Kang H, Shim J H, *et al.* Interactions among the toxic dinoflagellate *Amphidinium carterae*, the heterotrophic dinoflagellate *Oxyrrhis marina*, and the calanoid copepods *Acartia* spp. [J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 218: 77 - 86.
- [28] Lowe C D, Keeling P J, Martin L E, *et al.* Who is *Oxyrrhis marina*? Morphological and phylogenetic studies on an unusual dinoflagellate [J]. Journal of Plankton Research, 2011, 33(4): 555 - 567.
- [29] Li L, Zhu X M, Wu H X. Feeding of rotifer *Brachionus plicatilis* enriched with microalgae. [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(9): 2019 - 2025. [李磊, 朱小明, 吴洪喜. 营养强化时褶皱臂尾轮虫对饵料微藻的摄食. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2019 - 2025.]
- [30] Johnson M D, Rome M, Stoecker D K. Microzooplankton grazing on *Prorocentrum minimum* and *Karlodinium micrum* in Chesapeake Bay [J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(1): 238 - 248.

Feeding characteristics of *Oxyrrhis marina* on *Cyanobium* sp. and *Pleurochrysis dentata*

ZHANG Yanling¹, LI Xuemei¹, LI Zhiwei^{1,2}, AN Xinlong^{1,2*}

(1. Laboratory of Harmful Algae Science and Marine Planktology,

Ocean College of Hebei Agricultural University, Qinhuangdao 066003, China;

2. Qinghuangdao Ocean Engineering Technology Research Center, Qinhuangdao 066003, China)

Abstract: To investigate the feeding characteristics of *Oxyrrhis marina*, *Cyanobium* sp. and *Pleurochrysis dentata* were used as food algae to culture *O. marina* respectively. The feeding processes, feeding rules and the color changes of culture media of *O. marina* on two marine microalgae were analysed by the combined methods of microscopic examination, macro-observation and microscopic counting. The results showed that the feeding method of *O. marina* on *Cyanobium* sp. was wrapping the trichome sections slowly into the longitudinal groove, while the whole cell of *P. dentata* was incorporated into the longitudinal groove at the same time. The feeding rates of *O. marina* on two marine microalgae were 100% after inoculated by *O. marina* for 6 h, respectively. In static culture of *O. marina*, the color of culture media appeared pale pink to pink, whereas shaking culture media were not found. With the decrease of the initial density of *O. marina* (the cell density in *Cyanobium* sp. culture medium is 0.8×10^4 , 2.4×10^3 and 0.8×10^3 cells/mL respectively), the time when the population of *O. marina* reached the stationary phase required longer, namely, 3, 4 and 6 d respectively in culture media of *Cyanobium* sp., and the time when the population of *Cyanobium* sp. were fed up by *O. marina* required longer too, namely, 5, 10 and 15 d respectively. Also, with the decrease of the initial density of *O. marina* (the cell density in *P. dentata* culture medium was 3.9×10^3 , 2.4×10^3 and 1.7×10^3 cells/mL respectively), the time when the population of *O. marina* reached the stationary phase required longer, namely, 4, 5 and 12 d respectively in culture media of *P. dentata*, and the time when the population of *P. dentata* were fed up by *O. marina* required longer too, namely, 6, 7 and 13 d respectively. The experiment results showed that the feeding processes of *O. marina* on *Cyanobium* sp. and *P. dentata* were different for their different sizes and types and the color changes of culture media were affected by culture modes. Also the feeding of *O. marina* was affected by the kind of food algae and the initial concentration ratio of food algae to *O. marina*. During 15 day's culture period, *Cyanobium* sp. populations and *P. dentata* populations evolved to *O. marina* populations.

Key words: *Oxyrrhis marina*; *Cyanobium* sp.; *Pleurochrysis dentata*; feeding process; feeding rule; color change

Corresponding author: AN Xinlong. E-mail: axlqhd@126.com