

# 黄海冷水团海域微型异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌摄食作用的初步研究

朱致盛<sup>1</sup>, 林施泉<sup>1</sup>, 黄凌风<sup>1,2\*</sup>, 郭丰

(1 厦门大学 海洋学系, 福建 厦门 361005; 2 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005)

**摘要:** 2006 年 10 月在黄海冷水团海域的三个站点开展了微型异养鞭毛虫、异养细菌和蓝细菌的密度和生物量调查, 进行了微型异养鞭毛虫的现场摄食实验, 通过荧光标记细菌法和消化系数法获得该海区微型异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌的摄食率, 并估算了微型异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌现存量及生产力的摄食压。结果显示, 微型异养鞭毛虫、异养细菌和蓝细菌的密度分别为  $0.36 \times 10^3 \sim 1.13 \times 10^3$ ,  $0.39 \times 10^6 \sim 1.13 \times 10^6$  和  $0.04 \times 10^4 \sim 3.74 \times 10^4$  cells/cm<sup>3</sup>, 温跃层以上明显高于底层。微型异养鞭毛虫对异养细菌的摄食率为  $5.33 \sim 14.89$  个(HF·h), 对蓝细菌的摄食率为  $0.26 \times 10^2 \sim 23.10 \times 10^{-2}$  cells/(HF·h), 摄食率随深度而下降。微型异养鞭毛虫每天能消耗 9.27%~33.08% 的异养细菌现存量和 8.12%~16.09% 的蓝细菌现存量。同时, 微型异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌的日摄食量各占它们生产力的 2.66%~13.10% 和 8.12%~16.09%。研究表明微型异养鞭毛虫的摄食可能不是秋季黄海冷水团海域浮游细菌及其生产力的主归宿。

**关键词:** 微型异养鞭毛虫; 浮游细菌; 摄食; 黄海冷水团

中图分类号: Q945.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2009)05-0123-09

## 1 引言

在海洋微小型(0.2~2 μm)自养生物中, 原核类的蓝细菌无论是数量上还是对初级生产力的贡献上都占有重要位置, 尤其是在寡营养的离岸海域<sup>[1-2]</sup>。异养细菌则是海洋微小型异养浮游生物的主要类群, 也是生态系统中碳循环及营养盐循环再生作用的主要贡献者之一<sup>[3]</sup>。因此, 蓝细菌和异养细菌被认为是微食物环的两个关键起始环节<sup>[4]</sup>, 研究二者生产力的具体流向, 对于人们认识海洋微食物环的物质循环、能量流动以及微食物环对经典食物链的补充和支持作用具有重要意义<sup>[5]</sup>。

通常认为, 海洋微小型浮游生物的生物量和生产力受到温度、光照、营养盐、浮游动物摄食、病毒性

溶解等多种因素的影响<sup>[6-7]</sup>。不少研究指出, 异养鞭毛虫的摄食行为是控制微小型浮游生物密度的一个关键生物因素<sup>[7-8]</sup>, 对调控微小型浮游生物的群落结构具有重要作用<sup>[9-12]</sup>。但也有研究者认为, 其它因素, 如海区营养盐的浓度和病毒性溶解, 可能发挥更大作用<sup>[13-14]</sup>。比较已有的研究报道可以发现, 不同研究者在不同海区关于异养鞭毛虫对微小型浮游生物摄食压力的研究结果存在很大差异<sup>[12, 15-16]</sup>, 而且在现场同时开展异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌摄食压力的研究报道还很少。国内的一些学者以分级或稀释培养的方法研究了捕食者对浮游细菌的摄食压力<sup>[17-18]</sup>, 但此类研究将同一粒级范围的捕食者笼统作为一个研究对象来考虑, 无法区分不同类群捕食者的具体作用。因此, 在对海洋微食物环这

收稿日期: 2008-12-05; 修订日期: 2009-08-12。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB400604); 国家自然科学基金项目(40876078); 福建省高校新世纪优秀人才资助计划项目(2006)。

作者简介: 朱致盛(1984—), 男, 广西壮族自治区柳州市人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋生态学, E-mail: zs\_zhu@yahoo.com.cn

\* 通信作者: 黄凌风(1968—), 男, 福建省晋江县人, 博士, 教授, 研究方向: 海洋生态学, E-mail: huanglf@xmu.edu.cn

两个起始环节的能流走向上异养鞭毛虫究竟发挥多大作用, 至今仍不明了。

黄海冷水团是夏秋高温季节发生于黄海西北部海域的周期性水文现象, 历来受到我国海洋科学工作者的关注, 具有较好的研究基础。冷水团存在期间, 特殊的理化条件对叶绿素<sup>[19-20]</sup>、浮游细菌<sup>[20]</sup>、浮游植物<sup>[21]</sup>的分布都具有重要影响, 李杰等通过生态耦合模型推测微食物环在黄海冷水团能流、物流循环中担当了重要角色<sup>[22]</sup>。本研究利用 973 项目“我国近海生态系统食物产出的关键过程与可持续机理”组织的 2006 年黄海大面调查的秋季航次, 采用荧光标记细菌 (Fluorescent labeled bacteria, FLB) 示踪法和消化系数法来研究和比较黄海冷水团海域微型异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌的摄食率及摄食压, 以期能够获得该海域海洋异养鞭毛虫对两类微型浮游生物调控作用的证据, 为进一步探讨黄海冷水团海域微食物环的能流、物流和微型异养鞭毛虫的作用打下基础。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与生物密度测定

2006 年 10 月, 选择位于黄海冷水团区域的 3 个站点 (见图 1) 开展工作。用船载 Rosette 采水器采集各观测站表层 (0 m)、中层 (30 m, 位于温跃层附近) 和底层水样, 经 20 μm 孔径筛绢过滤后一部分用于异养细菌、蓝细菌及异养鞭毛虫密度的测定, 另一部分用于摄食实验。

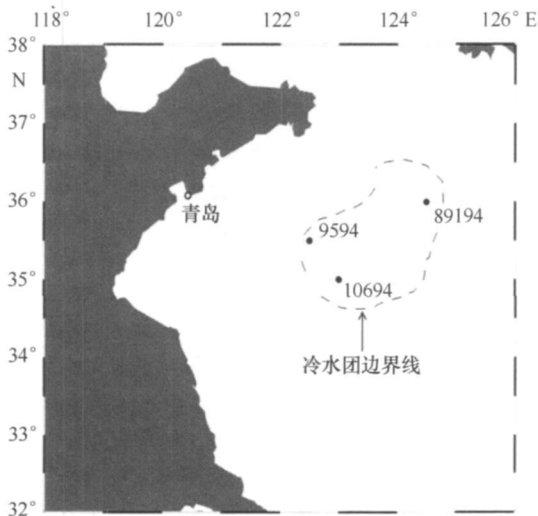


图 1 调查期间黄海冷水区域范围及现场摄食实验站位

每层水样取 20 mL (×2) 经 Millipore 滤器低压

抽滤于 0.2 μm 黑膜 (Millipore) 上, 滤至约 1 mL 时停止, 经 DAPI (终浓度为 5 μg/cm<sup>3</sup>) 染色 5 min 后再将水样滤尽。黑膜制片后 -20 °C 冷冻保存, 带回实验室后用荧光显微镜 (Leica DM 4500B) 计数异养细菌、蓝细菌及异养鞭毛虫的密度<sup>[23-24]</sup>。

### 2.2 摄食实验

分别采用荧光标记细菌法 (FLB 法)<sup>[23-24]</sup> 和消化系数法<sup>[25]</sup> 进行异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌的摄食实验。每层水样安排一组平行样进行实验, 将上述经 20 μm 孔径筛绢过滤的海水各 500 mL 分别盛于 1L 锥形瓶中, 加入 FLB (终浓度为 2.39 × 10<sup>5</sup> cells/cm<sup>3</sup>) 后立即进行培养, 从零时刻起每 5 min (至 25 min 实验结束) 取 20 mL (×2) 水样, 经过滤、DAPI 染色和制片后冷冻保存用以计数鞭毛虫体内 FLB 及蓝细菌的数量 (方法同 2.1)。

### 2.3 数据分析

#### 2.3.1 微型异养鞭毛虫对异养细菌的摄食率及摄食压

以各时刻采样的异养鞭毛虫体内的 FLB 平均值对时间作图, 该值将随时间逐渐递增直至稳定达到饱和状态, 对其直线递增部分进行回归, 即可得出鞭毛虫对荧光标记细菌的摄食率  $G_{FLB}$ , 再由 FLB 占异养细菌的比例  $R_{FLB}$ , 可求海区中异养鞭毛虫对异养细菌的摄食率  $G_B$ <sup>[15-26]</sup>

$$G_B = G_{FLB}/R_{FLB}. \quad (1)$$

继而可得鞭毛虫对异养细菌现存量及生产力的摄食压依次为

$$F_{BB} = D_{HF} G_B / D_B, \quad (2)$$

$$F_{BP} = D_{HF} G_B \alpha_B / P_B, \quad (3)$$

式中,  $D_{HF}$  和  $D_B$  分别为异养鞭毛虫和异养细菌的密度;  $\alpha_B$  为异养细菌的细胞-碳转化系数 (取 20 fg/cells)<sup>[26-27]</sup>,  $P_B$  为该海域异养细菌生产力 [取 2.11 μg/(dm<sup>3</sup>·h)]<sup>[28]</sup>。

#### 2.3.2 微型异养鞭毛虫对蓝细菌的摄食率及摄食压

假设鞭毛虫对蓝细菌的摄食与消化排出处于平衡, 根据实验测得鞭毛虫体内所含有蓝细菌的平均值  $N_c$ , 以  $\gamma$  表示鞭毛虫体内蓝细菌的消化排出速率, 得异养鞭毛虫对蓝细菌的摄食率  $G_C$ <sup>[15,27]</sup>

$$G_C = \gamma N_c, \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  值取 Dolan 等<sup>[25]</sup> 实验结果的平均值, 为 1.1% min<sup>-1</sup>。

鞭毛虫对蓝细菌现存量及生产力的摄食压依次为

$$F_{CB} = D_{HF} G_C / D_C, \quad (5)$$

$$F_{CP} = D_{HF} G_C / (D_C \mu_c), \quad (6)$$

式中,  $\mu_c$  为蓝细菌的分裂速率, 参考前人的研究数据<sup>[29-30]</sup>取  $1.0 \text{ d}^{-1}$ , 即相当于细胞每天分裂一次。

### 3 结果

#### 3.1 异养细菌、蓝细菌和微型异养鞭毛虫的密度及生物量

三个站位异养细菌密度范围为  $0.39 \times 10^6 \sim 1.13 \times 10^6 \text{ cells/cm}^3$ , 生物量(碳)为  $7.77 \sim 22.66 \mu\text{g/cm}^3$  (表1)。水平分布上, 89194 站的异养细菌密度略高于其余两站, 但差异不明显 ( $P > 0.05$ )。

表1 2006年10月黄海海域三个站点异养细菌、蓝细菌及微型异养鞭毛虫的密度和生物量

站位及分层	89194			10694			9594	
	表层	中层	底层	表层	中层	底层	表层	底层
	0 m	30 m	78 m	0 m	30 m	68 m	0 m	50 m
异养细菌密度/ $10^5 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$	8.27	10.94	3.38	8.19	7.48	3.90	11.33	7.27
蓝细菌密度/ $10^4 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$	3.74 $\pm 0.09$	1.60 $\pm 0.10$	0.04 $\pm 0.00$	3.16 $\pm 0.32$	1.00 $\pm 0.07$	0.06 $\pm 0.00$	1.80 $\pm 0.06$	0.08 $\pm 0.00$
异养鞭毛虫密度/ $10^3 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.09 $\pm 0.04$	0.93 $\pm 0.03$	0.55 $\pm 0.00$	1.13 $\pm 0.04$	0.92 $\pm 0.05$	0.56 $\pm 0.02$	0.93 $\pm 0.02$	0.36 $\pm 0.1$
异养细菌生物量(碳) / $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3 \text{ a}}$	16.53	21.87	7.77	16.37	14.95	7.81	22.66	14.54
蓝细菌生物量(碳) / $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3 \text{ b}}$	11.00 $\pm 0.25$	4.72 $\pm 0.29$	0.11 $\pm 0.01$	9.28 $\pm 0.93$	2.95 $\pm 0.21$	0.16 $\pm 0.00$	5.30 $\pm 0.18$	0.23 $\pm 0.00$

注: a. 细胞-碳含量转换系数取  $20 \text{ fg/cell}^{[28-29]}$ ; b. 细胞-碳含量转换系数取  $294 \text{ fg/cell}^{[3]}$

垂直分布上, 总体表现为表层高、底层低, 89194 站温跃层密度值高于表层。

蓝细菌密度值为  $0.04 \times 10^4 \sim 3.74 \times 10^4 \text{ cells/cm}^3$ , 生物量(碳)在  $1.06 \sim 11.0 \mu\text{g/cm}^3$  之间(表1)。垂直方向上, 蓝细菌的数量随深度的增加而迅速递减, 例如深度最大的 89194 站, 底层的蓝细菌密度约为表层的 1%。

微型异养鞭毛虫的密度为  $0.36 \times 10^3 \sim 1.13 \times 10^3 \text{ 个/cm}^3$ , 9594 站的密度略低于其余两站, 表层约为底层的两倍。由于没有公认的细胞-碳转化系数, 微型异养鞭毛虫没有估算生物量。

#### 3.2 异养鞭毛虫对异养细菌和蓝细菌的摄食率与摄食压

各站点的 FLB 示踪实验中, 异养鞭毛虫达到稳定摄食时单位鞭毛虫体内的异养细菌数量相当, 为  $1.0 \sim 1.7 \text{ cells/HF}$ 。0 m 和 30 m 水层中, 异养鞭毛虫达到稳定摄食的时间均在  $15 \sim 20 \text{ min}$  范围内, 而底层异养鞭毛虫对 FLB 摄食达到稳定

的时间为  $20 \sim 25 \text{ min}$  (图 2)。以 FLB 所占比例换算得到异养鞭毛虫对异养细菌的摄食率为  $5.33 \sim 14.89 \text{ cells/(HF} \cdot \text{h)}$  (表 2), 并随着深度的增加而降低。

本实验取零时刻异养鞭毛虫体内的蓝细菌数计算异养鞭毛虫对蓝细菌的摄食率, 得其摄食率为  $0.24 \times 10^{-2} \sim 21.00 \times 10^{-2} \text{ cells/(HF} \cdot \text{h)}$  (见表 2)。鞭毛虫对蓝细菌的摄食率随深度的增加而迅速降低, 底层鞭毛虫的摄食率约为表层的  $1/10$  (见图 3 和表 2)。

若以单位时间摄食的碳量来表示鞭毛虫对两类浮游细菌的摄食率, 则可比较发现微型异养鞭毛虫对异养细菌的摄食率和对其现存量的摄食压均高于对蓝细菌的, 但对二者生产力的摄食压则情况相反(表 2)。微型异养鞭毛虫对两类浮游细菌现存量及生产力的摄食压总体上都随着深度的增加而减小。

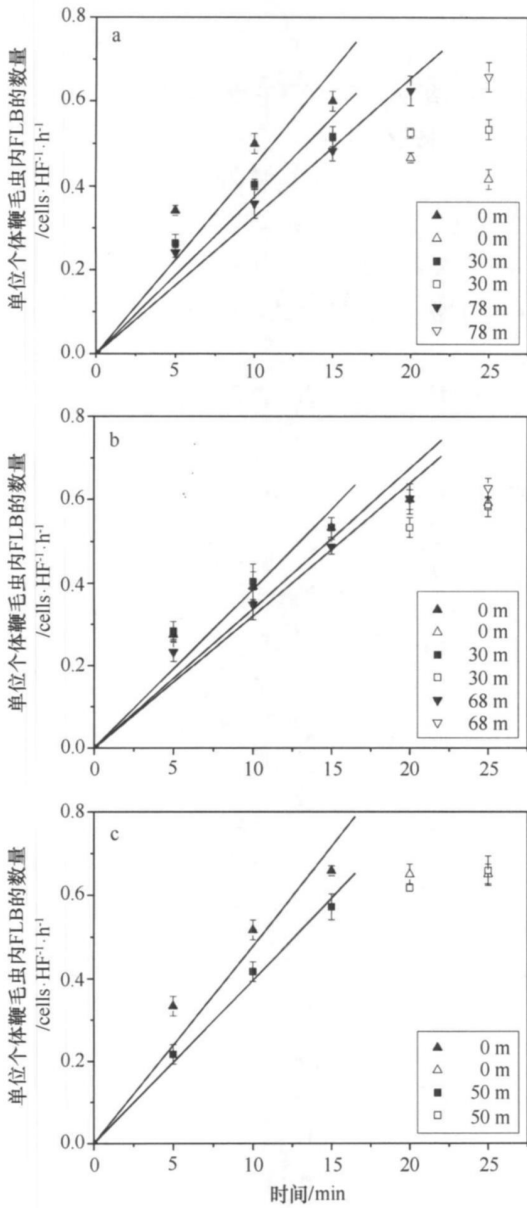


图2 荧光标记细菌摄食实验中单位个体鞭毛虫体内荧光标记细菌数量随时间的变化曲线,空心点表示未用于直线回归的数据

a. 89194 站, b. 10694 站, c. 9594 站

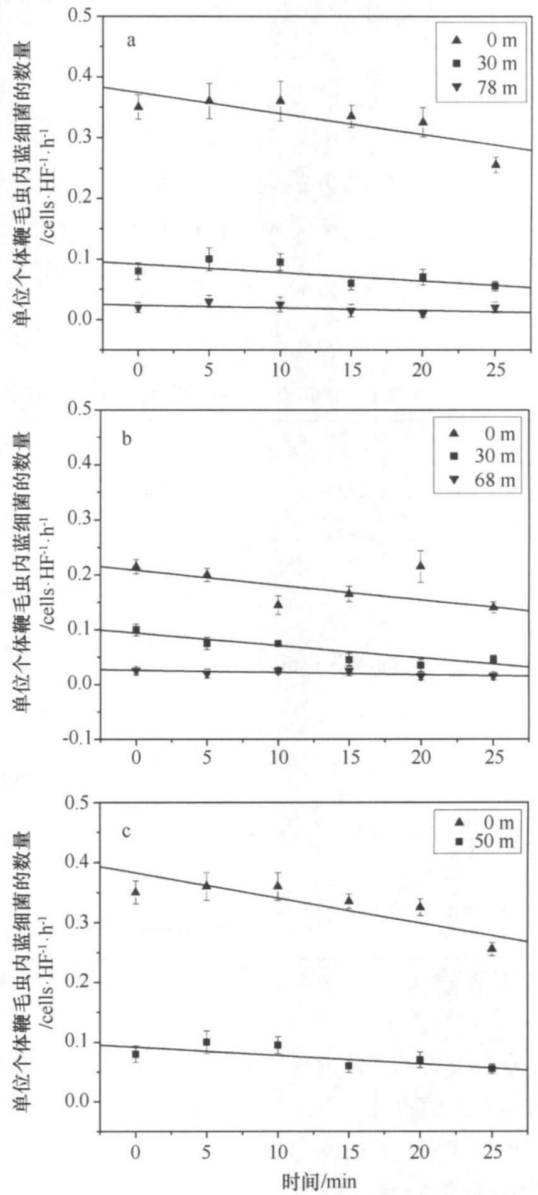


图3 蓝细菌摄食实验中单位个体鞭毛虫体蓝细菌数量随时间的变化曲线

a. 89194 站, b. 10694 站, c. 9594 站

表2 微型异养鞭毛虫对异养细菌及蓝细菌的摄食率和摄食压

站点及分层	89194			10694			9594	
	表层	中层	底层	表层	中层	底层	表层	底层
	0 m	30 m	78 m	0 m	30 m	68 m	0 m	50 m
对异养细菌摄食率/ $\text{cells} \cdot \text{HF}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$	10.50 $\pm 1.08$	10.15 $\pm 0.79$	5.33 $\pm 0.27$	7.97 $\pm 0.59$	7.21 $\pm 0.59$	5.44 $\pm 0.28$	14.89 $\pm 1.14$	7.72 $\pm 0.22$
对异养细菌生物量(碳)摄食率/ $10^{-2} \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$	22.79 $\pm 2.33$	18.92 $\pm 1.46$	5.87 $\pm 0.29$	17.99 $\pm 1.34$	13.30 $\pm 1.09$	6.09 $\pm 0.31$	27.64 $\pm 2.11$	5.61 $\pm 0.16$

续表 2

站位及分层	89 194			10 694			9 594	
	表层	温跃层	底层	表层	温跃层	底层	表层	底层
	0 m	30 m	78 m	0 m	30 m	68 m	0 m	50 m
对蓝细菌摄食率/ $10^{-2}$ cells $\cdot$ HF $^{-1}$ $\cdot$ h $^{-1}$	23.10 $\pm$ 0.48	11.22 $\pm$ 0.30	0.26 $\pm$ 0.06	14.19 $\pm$ 1.26	6.60 $\pm$ 0.42	0.33 $\pm$ 0.06	12.21 $\pm$ 0.36	0.99 $\pm$ 0.06
对蓝细菌生物量(碳)摄食率/ $10^{-2}$ $\mu$ g $\cdot$ dm $^{-3}$ $\cdot$ h $^{-1}$	7.37 $\pm$ 0.17	3.08 $\pm$ 0.10	0.04 $\pm$ 0.01	4.71 $\pm$ 0.42	1.79 $\pm$ 0.11	0.05 $\pm$ 0.01	3.33 $\pm$ 0.10	0.11 $\pm$ 0.01
对异养细菌现存量的摄食(%)	33.08 $\pm$ 3.37	20.76 $\pm$ 1.61	10.74 $\pm$ 0.54	26.37 $\pm$ 1.99	21.35 $\pm$ 1.76	18.71 $\pm$ 0.94	29.27 $\pm$ 2.22	9.27 $\pm$ 0.26
对蓝细菌现存量的摄食(%)	16.09 $\pm$ 0.31	15.65 $\pm$ 0.45	9.59 $\pm$ 3.60	12.17 $\pm$ 0.96	14.57 $\pm$ 1.01	8.12 $\pm$ 0.24	15.09 $\pm$ 0.48	11.20 $\pm$ 1.80
对异养细菌生产力的摄食压(%)	10.80 $\pm$ 1.11	8.97 $\pm$ 0.69	2.78 $\pm$ 0.14	8.53 $\pm$ 0.63	6.30 $\pm$ 0.51	2.89 $\pm$ 0.15	13.10 $\pm$ 0.99	2.66 $\pm$ 0.74
对蓝细菌生产力的摄食压(%)	16.09 $\pm$ 0.31	15.65 $\pm$ 0.45	9.59 $\pm$ 3.60	12.17 $\pm$ 0.96	14.57 $\pm$ 1.01	8.12 $\pm$ 0.24	15.09 $\pm$ 0.48	11.20 $\pm$ 1.80

## 4 讨论

### 4.1 秋季黄海冷水团海域浮游细菌和微型异养鞭毛虫的垂直分布及其主要影响因素

本研究中, 异养细菌和蓝细菌密度的垂直分布呈现表层和温跃层明显高于底层的特点, 这与前人在该海域的研究结果较一致<sup>[4, 18, 28]</sup>。李洪波等<sup>[18]</sup>指出, 温度是决定黄海冷水团中浮游细菌垂直分布的关键因素之一, 本研究结果也较好地印证了这一观点。如图 4 所示, 调查期间该海域温跃层以上水体的温度较均一, 异养细菌密度差异不大; 温跃层以下水温迅速降低, 异养细菌密度也有较大减小, 这表明异养细菌的分布与温度关系密切。与此不同的是, 蓝细菌密度随深度增大而减少的趋势更加明显, 温跃层的密度也显著低于表层( $P < 0.05$ ), 表明除了温度之外, 光照也是决定其垂直分布的重要因素之一, 这与蓝细菌的光合自养生物属性是相吻合的。其他因素如营养盐、有机物浓度等由于缺乏数据, 无法在此进行讨论。

异养鞭毛虫的垂直分布规律与浮游细菌相似(见图 4), 可能受到水温和食物浓度的共同影响。通常, 水温与食物浓度都会影响异养鞭毛虫的摄食、代谢和生长等生理活动, 从而影响其分布, 但有研究认为食物浓度的决定作用更大<sup>[32-34]</sup>。本研究中, 鞭毛虫密度与浮游细菌密度(异养细菌和聚球藻)的比

值较稳定(经 Pearson 相关分析,  $P < 0.05$ ), 约为  $1:10^3$  和  $1:10^2$ , 与 Huang 等得到的规律一致<sup>[35]</sup>, 表明了该海域微型异养鞭毛虫分布主要受上行控制作用(bottom-up control)的影响。这一点也可以从鞭毛虫摄食率随深度和食物浓度变化的规律中得到佐证(参见本文的 3.2)。

### 4.2 秋季黄海冷水团海域微型异养鞭毛虫对两类浮游细菌的摄食控制作用

从垂直分布上看, 本研究中微型异养鞭毛虫对两类浮游细菌的摄食率都表现为表层和中层高而底层低, 这可能与底层的食物(浮游细菌)浓度较低导致鞭毛虫捕食难度增大有关。此外, 该海域温跃层以下冷水的水温通常低于  $10^\circ\text{C}$ , 而温跃层以上的混合水体水温可达到  $20^\circ\text{C}$ <sup>[19]</sup>。Sherr 等<sup>[36]</sup>的研究表明,  $20^\circ\text{C}$  培养的异养鞭毛虫其摄食率显著高于  $12^\circ\text{C}$  时的情况, 因此, 温度也可能是影响该海域鞭毛虫摄食活动的重要因素。但食物浓度与温度这两个因素究竟何者对鞭毛虫摄食率影响更大, 需要进一步的研究才能搞清。

总体而言, 本研究得到的异养鞭毛虫对两种浮游细菌的摄食率与国际上采用相同方法的研究结果比较接近, 但异养鞭毛虫对两种浮游细菌的摄食压并不大。其中, 对异养细菌和蓝细菌现存量的摄食压分别为  $9.27\% \sim 33.08\%$  和  $8.12\% \sim 16.09\%$ , 对生产力的摄食压为  $2.66\% \sim 13.10\%$  和  $8.12\% \sim 16.09\%$ ,

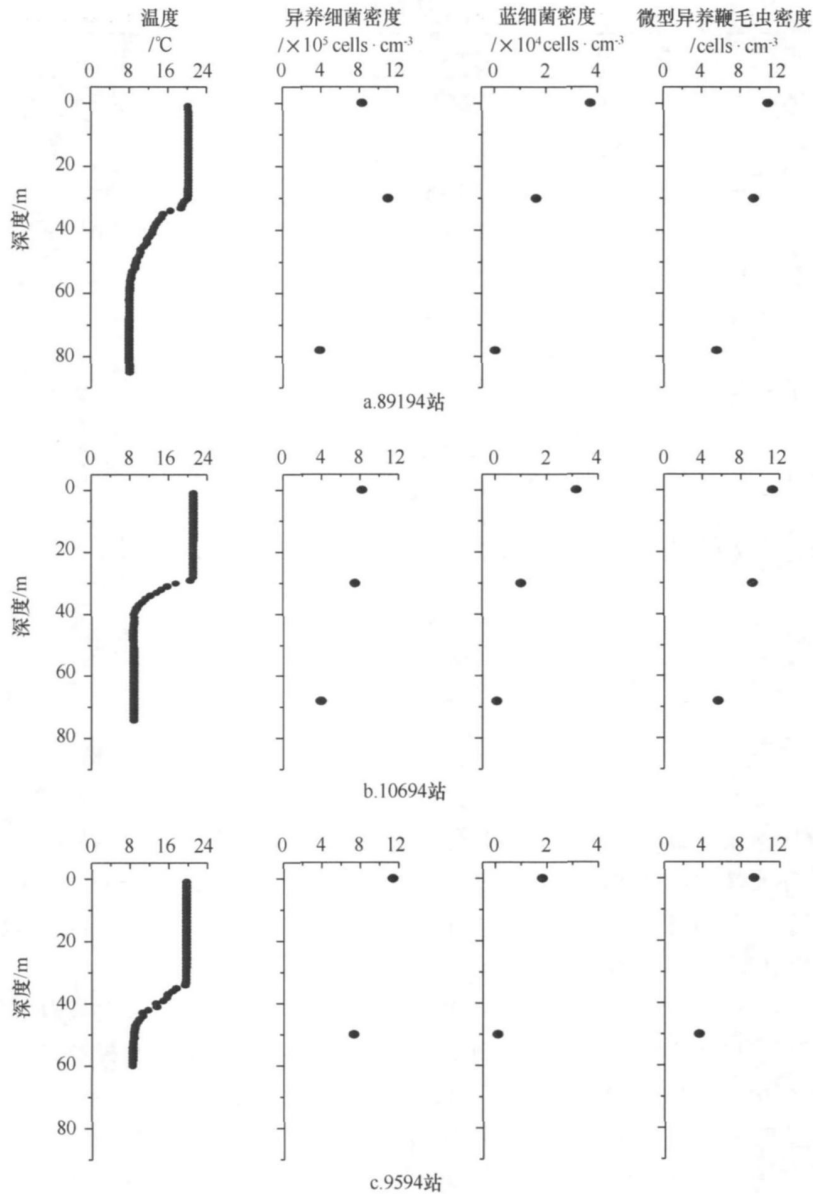


图4 各摄食实验站位的水温与异养细菌、蓝细菌和微型异养鞭毛虫密度的垂直分布

这与传统上关于微型异养鞭毛虫是异养细菌和蓝细菌的首要消费者,其摄食对浮游细菌的丰度起主要控制作用的认识<sup>[7-8, 37-39]</sup>显然并不一致。Isabel Barcina等<sup>[41]</sup>采用不同异养细菌生产力估算方法得到了两种鞭毛虫对异养细菌的摄食压力结果,二者差异可达10倍以上,说明各项摄食压研究结果可能受到异养细菌生产力测定的影响较大。Strom<sup>[41]</sup>总结25项对海洋浮游细菌生产力摄食压的研究结果表明,在生产力较低的海域,异养细菌的生产力几乎都通过捕食关系传递到更高营养级中;而在生产力较高的海域,鞭毛虫的摄食压相对较小。虽然黄海冷水团海域在我国并非高生

产力的海区,但本研究中两类浮游细菌的生产力与Strom<sup>[42]</sup>总结的研究海区相比属于其界定的高生产力海区。因此我们推测,调查期间该海域较高的异养细菌生产力可能是导致鞭毛虫摄食压不高的原因之一。赵三军的研究发现,秋季黄海异养细菌的生产力平均值显著高于春季,约为春季的4倍<sup>[28]</sup>。由此可见,秋季黄海冷水团海域中异养鞭毛虫的摄食是控制黄海冷水团水域浮游细菌数量变化的一个重要因素,但也许不是决定因素;其他途径的作用可能更大。有研究者推测当异养鞭毛虫对浮游细菌控制力减弱时,病毒即成为控制浮游细菌生物量的最主要因素<sup>[42-43]</sup>。而春季异

养细菌生产力较低时, 异养鞭毛虫对异养细菌的作用会不会加强, 还有待研究。

异养鞭毛虫对两类浮游细菌摄食压的比较研究目前还不多见。Caron 等<sup>[44]</sup>发现, 鞭毛虫以蓝细菌为食时, 常出现食物未被消化即被排出体外的现象, 当其摄食异养细菌时则具有更高的生长率, 说明一些种类鞭毛虫的生长更依赖于异养细菌。本研究中也发现, 微型异养鞭毛虫对异养细菌摄食压总体上

低于对蓝细菌的摄食压, 但从摄食率的情况来看正好相反(参见表 2), 似乎也表明异养鞭毛虫的摄食对蓝细菌种群数量的控制作用更强一些, 但鞭毛虫的生长却更依赖于异养细菌提供的有机碳。此外, 本研究只设置了三个摄食实验的站位, 只能对微型异养鞭毛虫的摄食作用做初步探讨, 要弄清不同环境、不同时期异养鞭毛虫摄食作用在微食物环中的具体贡献, 尚需开展更细致而深入的研究工作。

## 参考文献:

- [1] WATERBURY JB, WATSON S W, VALOIS F M, et al. Biological and ecological characterization of the marine unicellular *cyanobacterium* *Synechococcus* [J]. *Photosynthetic Picoplankton Can Bull Fish Aquat Sci*, 1986, 214: 343—369
- [2] CHISHOLM S W, OLSON R J, ZETTLER R, et al. A novel free living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone [J]. *Nature*, 1988, 334: 340—343.
- [3] GASOL J M, ZEHNDER A. A simple method for the detection and the “a posteriori” correction of the interference of sulfide on phosphorus measurements [J]. *Scientia Marina*, 1997, 61(2): 213—219
- [4] 孙晟, 岳海东, 肖天. 海洋蓝细菌(聚球菌属, *Synechococcus*) 的生态学意义及研究方法 [J]. *科学技术与工程*, 2005, 5(21): 1628—1633
- [5] CAPRIULO G M. *Ecology of Marine Protozoa* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1990
- [6] BILLEN G, SERVAIS P, BECQUEVORT S. Dynamics of bacterioplankton in oligotrophic and eutrophic aquatic environments: bottom up or top down control [J]. *Hydrobiologia*, 1990, 207: 37—42
- [7] PEDROSA LIO C, CALDERON-PAZ J I, GASOL J M. Comparative analysis shows that bacterivory, not viral lysis, controls the abundance of heterotrophic prokaryotic plankton [J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2000, 32: 157—165
- [8] PACE M L. Bacterial mortality and the fate of bacterial production [J]. *Hydrobiologia*, 1988, 159(1): 41—49
- [9] JÜRGENS K, PERNTHALER J, SCHALLA S, et al. Morphological and compositional changes in a planktonic bacterial community in response to enhanced protozoan grazing [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1999, 65(3): 1241—1250
- [10] ŠIMEK K, VRBA J, PERNTHALER J, et al. Morphological and compositional shifts in an experimental bacterial community influenced by protists with contrasting feeding modes [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1997, 63(2): 587—595
- [11] PERNTHALER J, POSCH T, ŠIMEK K, et al. Predator-specific enrichment of actinobacteria from a cosmopolitan freshwater clade in mixed continuous culture [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2001, 67(5): 2145—2155
- [12] 黄凌风, 潘科, 郭丰, 等. 异养性海洋鞭毛虫摄食生态学研究进展 [J]. *海洋科学*, 2006, 30(4): 78—82
- [13] GASOL J M, VAQUE D. Lack of coupling between heterotrophic nanoflagellates and bacteria: a general phenomenon across aquatic systems [J]. *Limnol Oceanogr*, 1993, 38(3): 657—665.
- [14] WEINBAUER M G, HÖFLE M G. Significance of viral lysis and flagellate grazing as factors controlling bacterioplankton production in a eutrophic lake [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1998, 64(2): 431—438
- [15] CHRISTAKI U, GIANNAKOUROU A, VAN WAMBEKE F. Nanoflagellate predation on auto- and heterotrophic picoplankton in the oligotrophic Mediterranean Sea [J]. *Journal of Plankton Research*, 2001, 23: 1297—1310
- [16] HUANG L F, PAN K and GUO F. Quantitative relationship between flagellate abundance and suspended particle density in Huanghai Sea and East China Sea in summer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(2): 109—118
- [17] 肖天, 张武昌, 王荣. 海洋蓝细菌在微食物环中作用的初步研究 [J]. *海洋科学*, 1999, 5: 48—51
- [18] 李洪波, 肖天, 丁涛, 等. 浮游细菌在黄海冷水团中的分布 [J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1012—1020
- [19] 张书文, 夏长水, 袁业立. 黄海冷水团水域物理-生态耦合数值模式研究 [J]. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 315—320
- [20] 张书文. 黄海冷水团夏季叶绿素垂向分布结构的影响机制 [J]. *海洋与湖泊*, 2003, 34(2): 179—186
- [21] 白洁, 姜艳, 孙军, 等. 黄海冷水团邻近海域浮游植物的昼夜垂直变化 [J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(6): 1013—1016.
- [22] 李杰, 吴增茂, 万小芳. 黄海冷水团新生产力及微食物环作用分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(2): 193—199
- [23] SHERR B F, SHERR E B, FALLON R D. Use of monodispersed, fluorescently labeled bacteria to estimate in situ protozoan bacterivory [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1987, 53: 958—965
- [24] 潘科. 海洋异养鞭毛虫摄食的实验生态学研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2006

- [25] SDOLAN J R, SIMEK K, VRBA J. Ingestion and digestion of an autotrophic picoplankton, *Synechococcus*, by a heterotrophic nanoflagellate, *Bodo saltans*[J]. *Limnol Oceanogr*, 1998, 43(7): 1740—1746
- [26] LEE S, FUHRMAN J A. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1987, 53(6): 1298—1303
- [27] CHO B C, AZAM F. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1990, 63(2): 253—259
- [28] 赵三军. 黄、东海海洋异养细菌的生态学研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2002.
- [29] CAMPBELL L, CARPENTER E J. Estimating the grazing pressure of heterotrophic nanoplankton on *Synechococcus* spp. using the seawater dilution and selective inhibitor techniques[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1986, 33: 121—129
- [30] KUIPERS B R, WITTE H J. Prochlorophytes as secondary prey for heterotrophic nanoflagellates in the deep chlorophyll maximum layer of the (sub) tropical North Atlantic[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2000, 204: 53—63
- [31] CAMPBELL L, NOLLA H A, VAULOT D. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the central North Pacific Ocean[J]. *Limnol Oceanogr*, 1994, 39(4): 954—961
- [32] KIMMANCE S A, ATKINSON D, MONTAGNES D J S. Do temperature food interactions matter? Responses of production and its components in the model heterotrophic flagellate *Oxyrrhis marina*[J]. *Aquat Microb Ecol*, 2006, 42(1): 63—73
- [33] NAGATA T. The microflagellate picoplankton food linkage in the water column of Lake Biwa[J]. *Limnol Oceanogr*, 1988, 33: 504—517
- [34] ISHIGAKI T, SLEIGH M A. Grazing characteristics and growth efficiencies at two different temperatures for three nanoflagellates fed with vibrio bacteria at three different concentrations[J]. *Microb Ecol*, 2001, 41(3): 264—271
- [35] HUANG L F, GUO F, HUANG B Q, XIAO T. Distribution pattern of marine flagellate and its controlling factors in the central and north part of the Yellow Sea in early summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 22(2): 273—280
- [36] SHERR B F, SHERR E B, RASSOULZADEGAN F. Rates of Digestion of Bacteria by Marine Phagotrophic Protozoa: Temperature Dependence[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1988, 54(5): 1091—1095
- [37] FENCHEL T. Ecology of heterotrophic microflagellates: IV. Quantitative occurrence and importance as bacterial consumers[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1982, 9: 35—42
- [38] WIKNER J, HAGSTRÖM A. Evidence for a tightly coupled nanoplanktonic predator-prey link regulating the bacterivores in the marine environment[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1988, 50(1): 137—145
- [39] KUUPPO-LEINIKKI P. Protozoan grazing on planktonic bacteria and its impact on bacterial population[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1990, 63(2): 227—238
- [40] BARCINA I, AYO B, UNANUE M, et al. Comparison of rates of flagellate bacterivory and bacterial production in a marine coastal system[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1992, 58(12): 3850—3856
- [41] STROM S L. Bacterivory: interactions between bacteria and their grazers[M]// KIRCHMAN D L. *Microbial Ecology of the Oceans*. New York: Wiley-Liss, 2002: 351—386.
- [42] GASOL J M. A framework for the assessment of top-down vs bottom-up control of heterotrophic nanoflagellate abundance[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1994, 113(3): 291—300
- [43] WEINBAUER M G, PEDUZZI P. Significance of viruses versus heterotrophic nanoflagellates for controlling bacterial abundance in the northern Adriatic Sea[J]. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17: 1851—1856
- [44] CARON D A, LIM E L, MICELI G, et al. Grazing and utilization of chroococoid cyanobacteria and heterotrophic bacteria by protozoa in laboratory cultures and a coastal plankton community[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1991, 76(3): 205—217



# Preliminary study on bacterivory of heterotrophic nanoflagellate upon heterotrophic bacteria and cyanobacteria in the Huanghai Sea Cold Water Mass area

ZHU Zhi-sheng<sup>1</sup>, LIN Shi-quan<sup>1</sup>, HUANG Ling-feng<sup>1,2</sup>, GUO Feng<sup>1</sup>

(1 Department of Oceanography Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2 State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Predation on bacteria and cyanobacteria (*Synechococcus* spp.) by heterotrophic nanoflagellate (HNF) were measured at three stations in the Huanghai Sea Cold Water Mass (HSCWM) area in October, 2006. It was shown that the densities of HNF, bacteria and cyanobacteria were  $0.36 \times 10^3 \sim 1.13 \times 10^3$ ,  $0.39 \times 10^6 \sim 1.13 \times 10^6$  and  $0.04 \times 10^4 \sim 3.74 \times 10^4$  cells/cm<sup>3</sup> respectively. Ingestion rate of heterotrophic bacteria, estimated on the basis of uptake of fluorescently labeled bacteria, varied from 5.33~14.89 (cell/HF·h). The grazing rate on cyanobacteria was calculated from  $0.26 \times 10^{-2}$  to  $23.10 \times 10^{-2}$  cells/(HF·h). HNF removed only 9.27%~33.08% of bacterial biomass and 2.66%~13.1% of bacterial production, while the consumption upon cyanobacteria was 8.12%~16.09% of the biomass and 8.12%~16.09% of the production, indicating that the consumption by HNF was unlikely responsible for the main fate of these two planktonic bacteria and their production in the HSCWM in autumn.

**Key words:** flagellates; bacteria; grazing; the Huanghai Sea Cold Water Mass