# 不同温度对3种海洋纤毛虫种群增长的影响\*

潘莹姜勇张伟朱明壮许恒龙\*\*

(中国海洋大学海洋生物多样性与进化研究所 青岛 266003)

摘 要 利用实验生态学方法探讨温度对3种海洋纤毛虫——缩原克鲁虫(Protocruzia contrax)、拉氏游仆虫(Euplotes raikovi)和中华游仆虫(E. sinica)纤毛虫种群增长的影响.纤毛虫采用米粒培养液培养,测定其在4个温度(17 ℃、22 ℃、27 ℃和32 ℃)下的密度变化,计算种群生态学参数(种群增长率和温度系数).结果显示:1)拉氏游仆虫种群密度在27 ℃最大(2.73×10<sup>3</sup> ind/mL),而缩原克鲁虫和中华游仆虫在22 ℃下最大(分别为1.58×10<sup>4</sup> ind/mL和 8.50×10<sup>2</sup> ind/mL); 2)缩原克鲁虫和中华游仆虫在4种温度下的种群增长率大小顺序均为: 32 ℃组>27 ℃组>22 ℃组>17 ℃组,而中华游仆虫的顺序为: 22 ℃组>27 ℃组>32 ℃组>17 ℃组; 3) 3种纤毛虫的指数期长度均随培养温度的升高而变短; 4) 3种纤毛虫的温度系数(Q<sub>10</sub>)的大小顺序为:中华游仆虫对高温的耐受范围较宽,在32 ℃下也能保持较高的种群增长率和密度;中华游仆虫温度范围较窄,在32 ℃和17 ℃下均不能进行正常的种群增长.图2表3 参15 关键词 海洋纤毛虫;种群增长;增长率;温度系数;实验生态学

Effect of Temperature on Population Growth of Three Marine Ciliates\*

PAN Ying, JIANG Yong, ZHANG Wei, ZHU Mingzhuang & XU Henglong<sup>\*\*</sup> (Institute of Evolution and Marine Biodiversity, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China)

**Abstract** The effect of different temperatures on population dynamics of three marine ciliates, *Protocruzia contrax*, *Euplotes raikovi* and *E. sinica*, was investigated using experimental ecological method in rice medium at a range of temperatures. The population parameters of the three species of ciliates were analyzed at 17 °C, 22 °C, 27 °C and 32 °C, respectively. The results showed that: 1) the highest population density of *E. raikovi* was found at 27 °C ( $2.73 \times 10^3$  ind/mL), while those of *P. contrax* and *E. sinica* were at 22 °C ( $1.58 \times 10^4$  ind/mL and  $8.50 \times 10^2$  ind/mL, respectively); 2) the population growth rates of *P. contrax* and *E. raikovi* were in the same order: 32 °C group > 27 °C group > 17 °C group > 17 °C group > 27 °C group > 17 °C; 3) the logarithmic phase of the three ciliates was shortened with rising of temperature; and 4) their temperature coefficients ( $Q_{10}$ ) were in order of the species: *E. sinica* > *E. raikovi* > *P. contrax*. The results suggest that the three marine ciliates have their optimal temperature ranges for population growth, e.g., *P. contrax* and *E. raikovi* can grow with a high growth rate in a wide range of temperature, while *E. vannus* grows in a narrow range of temperature (>17 °C and <32 °C). Fig 2, Tab 3, Ref 15

**Keywords** marine ciliates; population growth; growth rate; temperature coefficient; experimental ecology **CLC** Q959.116.08

原生动物作为微食物网的基本组成部分,在碳源的回收、利用、向高营养级的传递及能量流动中起着重要的枢纽作用<sup>[1]</sup>.近年来,利用现代技术对海洋纤毛虫的分类学、自然生态学研究有了广泛而深入的开展,并在物质循环与全球变化,以及在利用原生动物群落监测与评价淡水环境等方面已取得了大量的研究成果<sup>[1-5]</sup>.然而,有关原生动物中纤毛虫的个体及种群生态学研究仍属薄弱环节,尤其有关种群增长及毒理学实验生态学资料报道甚少<sup>[6-8]</sup>.

本文利用实验生态学方法研究了3种常见海洋纤毛 虫——缩原克鲁虫(Protocruzia contrax)、拉氏游仆虫

(Euplotes raikovi)和中华游仆虫(E. sinica)在不同温度下的种群增长过程,以期为海洋纤毛虫种群生态学及生物测试、

生态毒理学等相关学科提供基础资料.

# 1 材料与方法

# 1.1 纤毛虫种群维持及培养

纤毛虫均取自中国海洋大学原生动物研究室细胞库, 为海水养殖水体中的3个常见种. 缩原克鲁虫(*P. contrax* Mansfeld, 1923)、拉氏游仆虫(*E. raikovi* Agamaliev, 1966) 和中华游仆虫(*E. sinica* Jiang *et al.*, 2009),均为周丛生海洋 纤毛虫,大小分别为(40~48)  $\mu$ m × (20~28)  $\mu$ m、(48~52)  $\mu$ m × (28~32)  $\mu$ m和(60~64)  $\mu$ m × (36~40)  $\mu$ m. 实验前将纤毛虫接 种于大米粒培养液中,以米粒繁殖细菌为饵料,室温下(约23 ℃)扩大培养至种群密度达到2 500 ind/mL(约72 h)后备用<sup>[8]</sup>.

### 1.2 培养液制备

1.2.1 海水获取与处理 配制培养基所用海水取自青岛近海 (盐度约30 psu、pH约7.5),经0.45 μm核孔滤膜抽滤,制备成 无颗粒海水.

收稿日期: 2010-02-01 接受日期: 2010-03-04

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(No. 41076089)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41076089)

<sup>\*\*</sup>通讯作者 Corresponding author (E-mail: henglongxu@126.com)

1.2.2 米粒培养液配制 100 mL无颗粒海水加入30粒消毒米 粒配制而成.

#### 1.3 实验设计

1.3.1 **培养温度梯度的设置** 实验共设4个处理组,温度分别 设为17 ℃、22 ℃、27 ℃和32 ℃.

1.3.2 海洋纤毛虫培养方法 实验在6孔细胞培养板中进行. 每孔加入3 mL培养液并接种30个纤毛虫,每组分别设两个 平行样,分别于17 ℃、22 ℃、27 ℃和32 ℃下于培养箱(LRH-150B型)进行恒温暗培养.

## 1.4 测试参数及数据处理

1.4.1 参数测定 实验共持续11 d. 实验期间每隔12 h测定纤 毛虫密度:前5 d直接于桂光XTL200型实体显微镜(45×)下 进行视野法计数,每孔观察8个视野,然后取平均数.之后, 充分混匀后每孔取25 μL样品置于0.1 mL浮游生物计数框, 加25 μL鲁哥氏液固定后于解剖镜下计数,重复2次,取平均 数,要求每两次计数误差不超过10%,最后换算成每毫升虫 体个数<sup>[8]</sup>.

1.4.2 种群增长率计算 种群自然增长率(r)的计算根据公式:

 $\ln N_t = \ln N_0 + rt \tag{1}$ 

其中N<sub>t</sub>为时间t时的种群密度; N<sub>0</sub>是指初始种群密度.增 长率以最小二乘法回归分析得出,以时间为横坐标,因变量 是纤毛虫密度(每毫升个体)的自然对数,只有在指数增长 期的数据才用来计算增长率,其斜率即种群自然增长率r<sup>[9]</sup>.

1.4.3 世代时间计算 自由生纤毛虫是通过二分裂的方式 进行种群增长的,因此其世代时间(G)与种群自然增长率 (r)之间的关系为:

$$G = \ln 2/r \tag{2}$$

代入上述所得r值,以计算G.

1.4.4 温度系数计算 在一定温度范围内,温度每升高10
 ℃,种群增长速度增加的倍数叫温度系数(Q<sub>10</sub>).温度系数
 的计算公式为:

$$Q_{10} = (r_2/r_1)^{10/(T2-T1)}$$
(3)

式中, r<sub>2</sub>和r<sub>1</sub>分别为在温度T<sub>2</sub>和T<sub>1</sub>下的种群增长率<sup>[8]</sup>.

鉴于本文实验用纤毛虫在17 ℃和27 ℃下种群增长率与 温度呈直线关系,故将该两温度下的增长率代入上式,以获 得Q<sub>10</sub>值.

## 2 结 果

#### 2.1 3种纤毛虫在4种温度下的种群增长情况

2.1.1 **缩原克鲁虫的种群增长情况** 实验结果(图1-A)表明: 1)17 ℃组缩原克鲁虫纤毛虫种群增长的停滞期与指数期均 较长(分别为48 h和168 h),增长缓慢,种群最高密度为1.93 ×10<sup>3</sup> ind/mL,稳定期平均密度为1.83×10<sup>3</sup> ind/mL,实验周期 内未出现明显的衰退期;2)22 ℃组种群增长明显快于17 ℃ 组,停滞期与指数期分别为24 h和144 h,种群最高密度为1.58 ×10<sup>4</sup> ind/mL,稳定期平均密度为1.44×10<sup>4</sup> ind/mL;3)27 ℃组 纤毛虫种群经过48 h的停滞期开始指数增长,指数增长期持 续168 h达到种群最大密度(1.42×10<sup>4</sup> ind/mL),随后进入稳定 期,平均密度为1.34×10<sup>4</sup> ind/mL;4)32 ℃组种群增长明显快 于前3组,其停滞期和指数期分别为24 h和96 h,种群最高密 度和稳定期平均密度均低于22 ℃组和27 ℃组,分别为7.27×



Fig. 1 Population growth curves of the three marine ciliates under different temperatures

#### 表13种纤毛虫在4种培养温度下种群增长稳定期最大种群密度 和平均种群密度One-way ANOVA检验

Table 1 One-way ANOVA test of the maximum/means densities of the three ciliates at equilibrium phase under four temperatures

iour temperatures								
纤毛虫 Ciliate	<i>θ</i> /°С	17	22	27	32			
缩原克鲁虫 P. contrax	17	-	-0.917 <sup>b</sup> *	-0.894 <sup>b</sup> *	-0.560 <sup>b</sup> *			
	22	-0.993a*	-	0.023 <sup>b</sup>	0.357 <sup>b</sup>			
	27	-0.927 <sup>a</sup> *	0.066ª	-	0.334 <sup>b</sup>			
	32	-0.574 <sup>a</sup> *	0.419 <sup>a</sup>	0.353ª	-			
拉氏游仆虫 E. raikovi	17	-	-0.579 <sup>b</sup> *	-0.712 <sup>b</sup> *	-0.681b*			
	22	-0.595 <sup>a</sup> *	-	0.133 <sup>b</sup>	0.102 <sup>b</sup>			
	27	-0706 <sup>a</sup> *	-0.111ª	-	-0.031 <sup>b</sup>			
	32	-0.692 <sup>a</sup> *	-0.097ª	0.014ª	-			
中华游仆虫 E. sinica	17	-	-	-	-			
	22	-1.606 <sup>a</sup> *	-	0.294 <sup>b</sup> *	-			
	27	-1.199 a*	$0.407^{a}$	-	-			
	32	0.088ª	1.694ª*	1.287ª*	-			

\*最大种群密度, b平均种群密度;\*差异显著(P<0.05)

<sup>a</sup> The maximum population densities; <sup>b</sup> The average population densities.

\* Significant difference at 0.05 level

103 ind/mL和6.70×103 ind/mL.

One-way ANOVA检验表明,4种温度下缩原克鲁虫各组的种群最大密度及稳定期平均密度的分析结果分别为F = 9.735, P < 0.05和F = 11.648, P < 0.05. 各处理组中,17 ℃下的种群最大密度及稳定期平均密度与其余3种温度下的均存在着显著性差异(P < 0.05),其余3种培养温度下的最大密度及平均密度间差异并不显著(表1).

2.1.2 拉氏游仆虫种群增长情况 在各个温度处理组中,拉 氏游仆虫纤毛虫的种群增长曲线和种群密度情况(图1-B)与 缩原克鲁虫相似:1)17 ℃组,种群经过72 h的停滞期后进入 指数增长期,经过144 h的指数增长后达到密度高峰(5.12×10<sup>2</sup> ind/mL),之后进入稳定期(平均密度为4.59×10<sup>2</sup> ind/mL);

2) 22 ℃组增长明显快于17 ℃组,24 h后进入指数增长期,指 数增长120 h后达到最高密度(2.18×10<sup>3</sup> ind/mL),随之进入稳 定期(平均密度为1.88×10<sup>3</sup> ind/mL);3) 27 ℃组经过36 h后进 入指数增长期,指数期长度短于前两组,为108 h,种群最高 密度为2.73×10<sup>3</sup> ind/mL,稳定期平均密度为2.56×10<sup>3</sup> ind/mL;

4) 32 ℃组经过48 h的停滞期后开始指数增长,指数增长期 长96 h,达到最高种群密度(2.62×10<sup>3</sup> ind/mL),随后进入稳 定期,平均密度为2.51×10<sup>3</sup> ind/mL. 4个处理组的指数增长期 长度大小顺序与温度顺序相反,即温度越高,指数增长期越 短,最高温度组(32 ℃)与最低温度组(17 ℃)的指数增长期 相差48 h.

One-way ANOVA检验表明,4种温度下拉氏游仆虫各组的种群最大密度及稳定期平均密度的分析结果分别为F = 41.961, P < 0.01和F = 191.753, P < 0.001.各处理组之间的差异与缩原克鲁虫的相似,其中,17℃下的种群最大密度及稳定期平均密度与其余3种温度下的均存在着显著性差异(P < 0.05),而其余3种培养温度下的最大密度及平均密度间差异并不显著(表1).

2.1.3 **中华游仆虫种群增长情况** 中华游仆虫各处理组中, 种群增长情况(图1-C)与前2种纤毛虫差异较大,在17 ℃、 22 ℃、27 ℃和32 ℃下的种群增长情况存在着明显的差异: 1)22 ℃组种群经72 h的停滞期后开始指数增长,指数期持续120 h后达到最大种群密度(8.50×10<sup>2</sup> ind/mL),稳定期平均密度为6.76×10<sup>2</sup> ind/mL; 2)27 ℃组种群经60 h进入指数增长期,指数期长达144 h,但其种群密度明显低于22 ℃组,最大种群密度为3.17×10<sup>2</sup> ind/mL,稳定期平均密度为3.02×10<sup>2</sup> ind/mL; 3)17 ℃组和32 ℃组纤毛虫种群均未能进入指数增长期和稳定期.然而,在这4个处理中,指数增长期亦相对较短,种群密度在192 h达到最高(8.50×10<sup>2</sup> ind/mL),而后进入衰退期;纤毛虫增长稍慢,204 h达到种群密度高峰(3.17×10<sup>2</sup> ind/mL),并无明显的衰退期.

通过One-way ANOVA检验,中华游仆虫各组的种群最 大密度及稳定期平均密度的分析结果分别为F = 97.096, P < 0.001和F = 278.143, P < 0.001.关于种群最大密度,除17 ℃组 和32 ℃组之间、22 ℃组和27 ℃组之间外,其余各处理组之 间的种群最大密度值均存在着显著性差异(P < 0.05);因17 ℃组和32 ℃组未出现稳定期,故没有稳定期平均密度,而22 ℃组和27 ℃组间的稳定期平均密度值差异显著(表1).

# 2.2 3种海洋纤毛虫在4种温度下的种群增长率及世代 时间

2.2.1 **缩原克鲁虫的种群增长率及世代时间** 缩原克鲁虫在4种 培养温度中的种群增长率大小顺序为: 32 ℃组>27 ℃组>22 ℃组>17 ℃组(图2-A),种群增长世代时间大小顺序为: 32 ℃组<27 ℃组<22 ℃组<17 ℃组(图2-D). One-way ANOVA 检验结果为F = 109.733, P<0.001, 具体数据表明,除27 ℃组 与22 ℃组和32 ℃组之间的种群增长率外,其余各处理组的 种群增长率均表现出显著性差异(P<0.05,表2).

2.2.2 拉氏游仆虫的种群增长率及世代时间 在各处理组中, 拉氏游仆虫的种群增长率及世代时间随温度的变化情况与 缩原克鲁虫相似,即其种群增长率大小顺序为:32 ℃组>27 ℃组>22 ℃组>17 ℃组(图2-B),世代时间大小顺序为32 ℃ 组<27 ℃组<22 ℃组<17 ℃组(图2-E).One-way ANOVA检



Fig. 2 The population growth rates (A, B, C) and generation time (D, E, F) of the three marine ciliates under different temperatures

表2	<b>小</b> 同温度卜缩原克鲁虫种群增长率的
	One-way ANOVA检验

 
 Table 2
 One-way ANOVA test among population growth rates of the three ciliates under different temperatures

纤毛虫 Ciliate	$\theta$ /°C	22	27	32
皖西古鱼山	17	-0.280*	-0.324*	-0.394*
细尿兄音虫 P. contrax	22	-	-0.044	-0.114*
	27		-	-0.069
	17	-0.231*	-0.255*	-0.297*
拉氏研作虫 E. raikovi	22	-	-0.024	-0.066
	27		-	-0.041
由化游八市	17	1.489*	1.373*	1.373*
中午研作虫	22	-	115	-1.159*
E. sinica	27		-	-1.044*

\*差异显著 (P<0.05) \* Significant difference at 0.05 level

验结果为F = 19.870, P<0.01, 只有17 ℃组的温度系数与22 ℃ 组、27 ℃组和32 ℃组之间存在显著性差异(P<0.05), 其余 处理组间的温度系数差异不显著(表2).

2.2.3 **中华游仆虫的种群增长率及世代时间** 4种温度下,中 华游仆虫的种群增长率、世代时间及其变化情况与前2种纤 毛虫有显著差异.其在4种温度下的种群增长率大小顺序为 22 ℃组> 27 ℃组> 32 ℃组> 17 ℃组(图2-C),世代时间顺 序为22 ℃组< 27 ℃组< 32 ℃组< 17 ℃组(图2-F).One-way ANOVA分析结果为F=21.363, P<0.01,除22 ℃组和27 ℃组、 17 ℃组和32 ℃组之间的种群增长率外,其余各处理组之间 均表现出显著性差异(P<0.05)(表2).

#### 2.3 3种海洋纤毛虫的温度系数

3种海洋纤毛虫的温度系数大小顺序为: 缩原克鲁虫<拉氏游仆虫<中华游仆虫(表3). One-way ANOVA检验结果表明, 3种海洋纤毛虫的温度系数有着不同程度的差异(F=45.371, P < 0.01). 其中,只有拉氏游仆虫的温度系数与缩原克鲁虫和拉氏游仆虫之间存在着显著性差异外(P<0.05),其余处理组间的温度系数差异不显著(表3).

#### 表3 3种海洋纤毛虫的温度系数及One-way ANOVA检验 Table 3 Temperature coefficient ( $Q_{10}$ ) of the three ciliates and One-way ANOVA test

纤毛虫 Ciliate	缩原克鲁虫 P. contrax	拉氏游仆虫 E. raikovi	中华游仆虫 E. sinica
缩原克鲁虫 P. contrax	-	< 0.001	-1.049*
拉氏游仆虫 E. raikovi	< 0.001	-	-1.049*
中华游仆虫 E. sinica	-1.049*	-1.049*	-
$Q_{10}$	2.11	2.56	22.22

# 3 讨论

本实验所采用的3种海洋纤毛虫均属于菌食性种类,故 培养方法是按照国际通用的培养方法,将饵料细菌与纤毛虫 混合培养,在这一混合体系中,细菌增长所需的碳、氮源和 能量均来自于米粒培养液<sup>[5-8]</sup>.

对种群增长曲线的分析表明,3种纤毛虫在不同温度 下的种群增长均符合逻辑斯蒂增长曲线,即分为明显的停 滞期、指数增长期、稳定期和衰退期,但三者的最大种群密 度、稳定期平均密度和指数期长度随纤毛虫种类和培养温 度的不同有很大变化.其中拉氏游仆虫的种群密度高峰值和 平均密度值在27℃时最大,分别为2.56×10<sup>9</sup> ind/mL和2.73×10<sup>3</sup> ind/mL;而缩原克鲁虫和中华游仆虫均在22℃下最大,缩原 克鲁虫分别为1.58×10<sup>4</sup> ind/mL和1.44×10<sup>4</sup> ind/mL,中华游仆虫 分别为8.50×10<sup>2</sup> ind/mL和6.76×10<sup>2</sup> ind/mL;同时,三者的指数 增长期均随着培养温度的升高而变短.缩原克鲁虫和拉氏游 仆虫在22 ℃、27 ℃时均达到较高的种群增长率,缩原克鲁 虫分别为1.22 d<sup>-1</sup>和1.30 d<sup>-1</sup>,拉氏游仆虫分别为1.01 d<sup>-1</sup>和1.31 d<sup>-1</sup>. 该结果表明,22 ℃、27 ℃均可用于缩原克鲁虫和拉氏游仆虫 的迅速扩大和富集化培养;而中华游仆虫在22 ℃时种群增 长率达到最大(0.63 d<sup>-1</sup>),说明其最佳富集培养温度是在22 ℃附近.

纤毛虫种群自然增长率及世代时间是种群生态学研究 中的重要参数,对于研究水体生态系的物质循环和能量流 动、种群增长与繁殖以及纤毛虫对环境胁迫的适应情况等问 题均具有重要意义<sup>[9-12]</sup>.种群自然增长率及世代时间在不同 环境条件下有很大变化,初始密度、温度、食物和盐度等4种 环境因子中,除盐度外(限于10‰和60‰范围内),均对其增 长影响显著.本文结果表明,3种海洋纤毛虫具有不同的最适 种群增长温度,如在17~32 ℃的4种温度下,缩原克鲁虫和拉 氏游仆虫的种群增长率均随着温度的升高而升高,并在此范 围内于32 ℃时达到最高值;而中华游仆虫呈现出先升高后降 低的趋势,并在22 ℃时出现峰值.由此可见,中华游仆虫对 温度的适应范围性小于前二者.

徐润林等曾探讨了若干淡水浮游纤毛虫世代时间与其体积和水温之间的关系,并推出其表达式为lg G = a + 0.216 lg V, a = 0.818 - 0.027T<sup>[13]</sup>.本研究中,3种海洋纤毛虫中,中华 游仆虫的体积最大,为6.25×10<sup>4</sup> µm<sup>3</sup>,缩原克鲁虫和拉氏游仆 虫的体积分别为2.32×10<sup>4</sup> µm<sup>3</sup>和6.07×10<sup>3</sup> µm<sup>3</sup>.由此,本文支持 了纤毛虫增长率与其体积成反相关的结论.

温度对纤毛虫的影响与其它原生动物及藻类类似,即 温度每升高10 ℃,化学过程的速率即加快大约2倍,以温度 系数 $Q_{10}$ 来表示温度升高后的反应速率与原来速率的比值.原 生动物结构比较简单,探讨 $Q_{10}$ 的生物指标一般为种群自然 增长率<sup>[8,14]</sup>.本实验结果显示,温度对海水纤毛虫的种群增 长率影响显著,所得出的 $Q_{10}$ 随纤毛虫的种类不同而存在着 不同程度的差异,其中缩原克鲁虫和拉氏游仆虫的体积较 小, $Q_{10}$ 分别为2.11和2.56,与Fenchel于1968年报道的需氧海洋 纤毛虫的 $Q_{10}$ 在2.3~3.5之间相印证;因中华游仆虫在17 ℃下 的种群增长率已经很低,故计算出的17~27 ℃间的 $Q_{10}$ 值显著 高于其他2种纤毛虫<sup>[15]</sup>,这在一定程度上表明中华游仆虫对 温度的敏感性很高.

#### References

- Song WB (宋微波), Shi XL (施心路), Xu KD (徐奎栋), Hu XZ (胡晓钟), Lei YL (类彦丽), Wei J (魏军), Chen ZG (陈子桂), Shi XB (史新柏), Wang M (王梅). Progress in Protozoology. Qingdao, China: Qingdao Ocean University Press (青岛: 青岛海洋大学出版社), 1999
- 2 Song WB (宋微波), Warren A, Hu XZ (胡晓钟). Free-living Ciliates in the Bohai and Yellow Seas, China. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 2009
- 3 Fenchel T, Finlay BJ. Anaerobic free-living protozoa: Growth efficiencies and the structure of anaerobic communities. *Fems Microbiol Ecol*, 1990, 74: 269~276

- 4 Song WB (宋微波), Zhao YJ (赵元莙), Xu KD (徐奎栋), Hu XZ (胡晓钟), Gong J (龚骏). Pathogenic Protozoa in Mariculture. Beijing, China: Science Press (北京: 科学出版社), 2003
- 5 Xu HL, Song WB, Warren A, Khaled ASA, Saleh A. Planktonic protist communities in a semi-ehclosed mariculture pond: Structural variation and correlation with environmental conditions. *J Mar Biol Assoc UK*, 2008, 88 (7): 1353~1362
- 6 Xu HL, Song WB, Zhu MZ, Wang M, Ma HG, Hu XZ. Ecological functions of ciliated protozoa in marine ecosystem: Effects on accumulation of ambient ammonia. *High Technol Lett*, 2005, **11** (1): 101~106
- 7 Xu HL, Song WB, LU L, Warren A. Tolerance of ciliated protozoan Paramecium bursaria (Protozoa, Ciliophora) to ammonia and nitrite. Chin J Oceanol & Limnol, 2005, 23 (3): 349~353
- 8 Xu HL (许恒龙), Zhou LS (周丽沙), Yu L (于丽), Zhou XS (周晓苏), Jiang JG (江居国), Tian YJ (田玉娟), Miao YL (苗月丽). Experimental ecological study on marine Ciliates IV: Effects of media and temperature on population growth of *Euplotes vannus*. Chin J Appl Environ Biol (应 用与环境生物学报), 2007, 13 (1): 41~45
- 9 Taylor WD, Berger, J. Growth of *Colpidium campylum* in monoxenic batch culture. *Can J Zool*, 1975, **54**: 392~398

- 10 Wang M (王梅), Xu HL (许恒龙), Tao ZC (陶振铖), Ma HG (马洪钢), Zhu MZ (朱明壮), Song WB (宋微波). Experimental ecological study on marine ciliates I: Effects of different concentrations of glucose. *Chin* J Appl Environ Biol (应用与环境生物学报), 2003, 9 (6): 627~630
- 11 Xu HL (许恒龙), Wang M (王梅), Zhu MZ (朱明壮), Song WB (宋微 波). Experimental ecological study on marine ciliates Ⅲ: Grazing stress of marine ciliated protozoan on the growth of *Vibrio* sp. population. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2004, 1: 75~78
- 12 Xu HL (许恒龙), Wang M (王梅), Zhu MZ (朱明壮), Song WB (宋微波). Effects of population growth of marine ciliates on the ammonia accumulation at different concentrations of glucose. Acta Zool Sin (动物学报), 2004, 50 (4): 551~557
- 13 Xu RL (徐润林), Bai QS (白庆笙). Establishment of relationships between ciliates generation times and their sizes. Act Sci Nat Univ Sunyatseni (中山大学学报自然科学版), 1993, 32: 247~251
- 14 Zhang SL (张绍丽), Song WB (宋微波). Ecological studies on marine ciliate Paranophrys magna II: Effects of temperature and salinity on population growth. Chin J Appl Environ Biol (应用与环境生物学报), 2000, 6 (3): 227~231
- 15 Fenchel T. The ecology of marine microbenthos III: The reproductive potential of ciliates. *Ophelia*, 1968, 5: 123~136

6期