

## 温度和食物密度对裂足臂尾轮虫 (*Brachionus diversicornis*) 生命表统计学参数的影响\*

宁乐锋, 席贻龙\*\*, 孙 强, 周 澳

(安徽师范大学生命科学学院, 安徽省高校生物环境与生态安全省级重点实验室, 芜湖 241000)

**摘 要:** 运用单个体培养方法研究了温度(15、20、25 和 30℃)和斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)密度( $1.0 \times 10^6$ 、 $3.0 \times 10^6$  和  $5.0 \times 10^6$  cells/ml)对裂足臂尾轮虫(*Brachionus diversicornis*)出生时的生命期望、世代时间、总生殖率、净生殖率、种群内禀增长率和后代混交率等生活史参数的影响。结果表明,温度对轮虫出生时的生命期望、世代时间、净生殖率和总生殖率均有显著的影响,但对种群内禀增长率和后代混交率无显著的影响;食物密度对轮虫的净生殖率和总生殖率均有显著的影响,但对轮虫出生时的生命期望、世代时间、种群内禀增长率和后代混交率均无显著的影响;食物密度与温度之间的交互作用对轮虫所有生命表统计学参数均无显著影响。轮虫出生时的生命期望和世代时间均随着温度的升高而逐渐显著缩短。轮虫的净生殖率在 15℃ 下最低,30℃ 下最高,20 和 25℃ 间无显著差异;轮虫的总生殖率在 15℃ 下较低,20、25 和 30℃ 下较高且三者间无显著差异;轮虫的净生殖率和总生殖率均在  $3.0 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下较高, $1.0 \times 10^6$  和  $5.0 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下较低且两者间无显著差异。

**关键词:** 裂足臂尾轮虫;温度;食物密度;生活史特征;单个体培养

## Combined effects of temperature and algal food density on life table demography of *Brachionus diversicornis* (Rotifera)

NING Lefeng, XI Yilong, SUN Qiang & ZHOU Ao

(Provincial Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, P. R. China)

**Abstract:** Effects of temperature (15, 20, 25 and 30°C) and *Scenedesmus obliquus* density ( $1.0 \times 10^6$ ,  $3.0 \times 10^6$  and  $5.0 \times 10^6$  cells/ml) on life history parameters including life expectancy at hatching, generation time, gross reproductive rate, net reproductive rate, intrinsic rate of population increase and proportion of sexual offspring of *Brachionus diversicornis* were studied by means of individual culture. Results showed that temperature affected significantly life expectancy at hatching, generation time, gross reproductive rate, net reproductive rate and intrinsic rate of population increase, but did not affect proportion of sexual offspring. Food level affected markedly gross reproductive rate and net reproductive rate, but had no effect on life expectancy at hatching, generation time, intrinsic rate of population increase and proportion of sexual offspring. The interaction between food level and temperature did not significantly influence all the life table demographic parameters. Both the life expectancy at hatching and the generation time decreased with increasing temperature. The lowest and highest net reproductive rate was obtained at 15 and 30°C, respectively; while with no difference between 20 and 25°C. The gross reproductive rate was lower at 15°C than those at 20, 25 and 30°C, and no difference was observed among those at the latter three temperatures. Both the net reproductive rate and the gross reproductive rate were higher at  $3.0 \times 10^6$  cells/ml than those at  $1.0 \times 10^6$  and  $5.0 \times 10^6$  cells/ml of *Scenedesmus obliquus*, and those at the two latter food levels were similar.

**Keywords:** *Brachionus diversicornis*; temperature; algal density; life history characteristics; individual culture

\* 国家自然科学基金项目(31170395)、安徽省高校生物环境与生态安全省级重点实验室专项基金项目(2004sys003)和重要生物资源保护和利用研究安徽省重点实验室专项项目联合资助。2012-04-05 收稿;2012-07-17 收修改稿。宁乐锋,男,1987年生,硕士研究生;E-mail: ninglf@126.com.

\*\* 通信作者;E-mail: ylx1965@yahoo.com.cn.

温度和食物密度是影响轮虫生活史特征的两个重要的生态因子<sup>[1]</sup>. 有关温度或食物密度对轮虫存活、生殖和种群增长等的影响研究, 已有较多的报道; 在自然水体中, 温度和食物密度通常是同时起作用的. 因此, 研究温度和食物密度对轮虫生活史特征的复合作用具有重要意义. 遗憾的是, 有关上述两个生态因子复合作用的研究则相对较少<sup>[2,4]</sup>. 已有的研究表明, 温度和食物密度以及两者间的交互作用对轮虫生命表统计学参数的影响常因轮虫种类的不同而异<sup>[2,4]</sup>.

裂足臂尾轮虫是典型的、栖息于浅水湖泊和池塘中的浮游性轮虫. 马杰等<sup>[5]</sup>曾分别就温度和藻类食物密度对不等棘刺型和等棘刺型裂足臂尾轮虫的生活史特征和后代形态型的影响进行研究; 但有关温度和食物密度对该种轮虫生命表统计学参数的复合作用研究至今未见报道. 因此, 本文运用单个体培养方法, 研究了温度和食物密度对裂足臂尾轮虫生命表统计学参数的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 轮虫的来源

实验所用裂足臂尾轮虫于 2010 年 8 月中旬采自芜湖市汀棠湖. 采样后, 随机挑取轮虫非混交雌体(忽略形态型的区分), 于  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、自然光照(光照强度约 130 lx)条件下进行克隆培养. 轮虫培养液采用 Gilbert 配方<sup>[6]</sup>(pH = 7.3), 所用的饵料为 HB-4 培养基<sup>[7]</sup>培养的、处于指数增长期的斜生栅藻.

### 1.2 轮虫的预培养

实验前, 将裂足臂尾轮虫分别置于温度为 15、20、25 和  $30^\circ\text{C}$ , 斜生栅藻密度为  $1.0 \times 10^6$ 、 $3.0 \times 10^6$  和  $5.0 \times 10^6$  cells/ml 的条件下进行为期 1 周的预培养. 预培养过程中, 每 12 h 悬浮沉积于试管底部的藻类食物; 每 24 h 更换轮虫培养液并投喂饵料 1 次, 同时通过去除一部分个体使得轮虫种群始终处于指数增长期.

### 1.3 单个体培养实验

将携带非混交卵的轮虫单个培养于带凹穴的塑料板中, 培养液体积为 0.5 ml. 之后, 每间隔 4 h 在解剖镜下检查轮虫卵的孵化情况, 取刚孵化出的幼体开始实验. 实验过程中, 每间隔 12 h 观察 1 次( $30^\circ\text{C}$  下每 8 h 观察一次), 记录轮虫所产的幼体数及母体的存活情况; 并移出所产幼体, 在相同的条件下继续培养待其产卵后确定雌体类型; 每间隔 24 h 更换 1 次培养液并投喂藻类食物. 每个温度和食物密度组合下使用轮虫个体 15 个, 实验设置 4 个重复. 实验条件与预培养时相同, 实验至全部母体死亡为止.

### 1.4 生活史参数的定义和计算方法

生活史参数的定义和计算参照胡柯等的方法<sup>[8]</sup>.

(1) 特定年龄存活率:  $x$  年龄组开始时存活个体百分数,  $l_x$ ;

(2) 特定年龄繁殖率:  $x$  年龄组平均每个个体所产的雌性后代数,  $m_x = \text{后代数} / (\text{母体数} \times 24 \text{ h})$ ;

(3) 出生时的生命期望: 每个个体出生时能活多久的估计值;

(4) 平均寿命: 所有个体平均能活多久的观察值;

(5) 总生殖率: 每个个体一生所产的雌性后代数,  $G_0 = \sum m_x$ ;

(6) 净生殖率: 种群经过一个世代后的净增长率,  $R_0 = \sum l_x m_x$ ;

(7) 世代时间: 完成一个世代所需要的时间,  $T = \sum l_x m_x x / R_0$ ;

(8) 种群内禀增长率: 种群在特定试验条件下的最大增长率; 根据方程  $r = \ln R_0 / T$  在粗略计算的基础上, 再根据方程  $\sum_{x=0}^n e^{-rx} l_x m_x = 1$  在 Excel 中试算求得种群内禀增长率的精确值.

(9) 后代混交率: 所有雌性后代中混交雌体所占的比率.

### 1.5 数据的处理和分析

采用 SPSS 统计分析软件对上述数据进行统计分析. 对所得的各生活史参数进行正态分布检验后, 对符合正态分布的数据进行方差分析以揭示温度、食物密度以及两者间的交互作用对轮虫各生命表统计学参数的影响, 采用多重比较(SNK-q 检验法)对同一温度各食物密度间、同一食物密度下各温度间轮虫的各生

活史参数的差异显著性进行分析,运用生存分析中的 Kaplan-Meier 分析同一温度各食物密度间、同一食物密度下各温度间轮虫的生存时间的差异显著性.

## 2 结果与分析

### 2.1 轮虫的存活率和繁殖率

各食物密度下,轮虫的存活率均随着温度的升高而显著降低( $P < 0.01$ );但各温度下,食物密度对轮虫的存活时间无显著影响( $P > 0.05$ )(图1).各食物密度下,轮虫的繁殖率高峰值随着温度的升高而增大,但繁殖时间却逐渐缩短.各温度下,轮虫的繁殖率在3个食物密度间无显著差异( $P > 0.05$ )(图1).

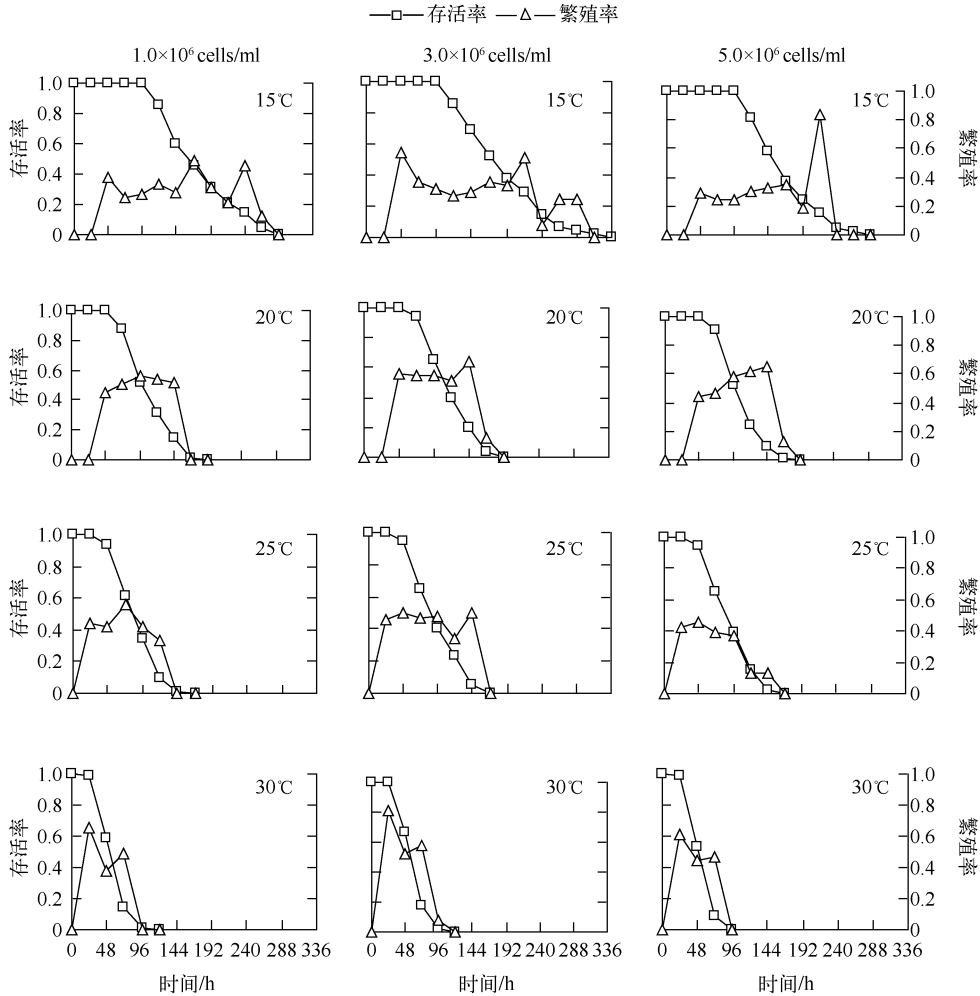


图1 不同温度和食物密度下裂足臂尾轮虫的存活率和繁殖率

Fig. 1 Survivorship and fecundity of *B. diversicornis* cultured under four temperatures and three food levels

### 2.2 轮虫的生命表统计学参数

双因素方差分析结果表明,温度对轮虫出生时的生命期望、世代时间、净生殖率和总生殖率均有显著影响( $P < 0.05$ ),但对种群内禀增长率和后代混交率无显著影响( $P > 0.05$ );食物密度对轮虫的净生殖率和总生殖率均有显著影响( $P < 0.05$ ),但对轮虫出生时的生命期望、世代时间、种群内禀增长率和后代混交率均无显著影响( $P > 0.05$ );食物密度与温度之间的交互作用对轮虫出生时的生命期望、世代时间、净生殖率、总

生殖率、种群内禀增长率和后代混交率均无显著影响( $P > 0.05$ )。多重比较结果显示, 轮虫出生时的生命期望和世代时间均随着温度的升高而逐渐显著缩短。轮虫的净生殖率在 15℃ 下最低, 30℃ 下最高, 20、25℃ 间无显著差异; 轮虫的总生殖率在 15℃ 下较低, 20、25 和 30℃ 下较高且三者间无显著差异; 轮虫的净生殖率和总生殖率均在  $3.0 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下较高,  $1.0 \times 10^6$  和  $5.0 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下较低且两者间无显著差异(表 1)。

表 1 不同温度和食物密度下裂足臂尾轮虫的生命表统计学参数\*

Tab. 1 Life demographic parameters of *B. diversicornis* cultured under four temperatures and three food levels

参数	食物密度/ ( $\times 10^6$ cells/ml)	15℃	20℃	25℃	30℃
生命期望/h	1.0	177.0 $\pm$ 8.3 <sup>a</sup>	98.8 $\pm$ 0.9 <sup>b</sup>	87.3 $\pm$ 4.3 <sup>b</sup>	60.7 $\pm$ 2.6 <sup>c</sup>
	3.0	192.0 $\pm$ 3.5 <sup>a</sup>	107.5 $\pm$ 2.9 <sup>b</sup>	84.8 $\pm$ 1.4 <sup>c</sup>	58.9 $\pm$ 3.5 <sup>d</sup>
	5.0	185.5 $\pm$ 8.3 <sup>a</sup>	97.0 $\pm$ 1.2 <sup>b</sup>	88.0 $\pm$ 4.4 <sup>b</sup>	56.7 $\pm$ 5.6 <sup>c</sup>
世代时间/h	1.0	117.7 $\pm$ 4.7 <sup>a</sup>	72.6 $\pm$ 1.7 <sup>b</sup>	54.1 $\pm$ 1.0 <sup>c</sup>	27.8 $\pm$ 3.2 <sup>d</sup>
	3.0	117.3 $\pm$ 4.0 <sup>a</sup>	74.7 $\pm$ 1.1 <sup>b</sup>	51.9 $\pm$ 2.0 <sup>c</sup>	28.3 $\pm$ 2.4 <sup>d</sup>
	5.0	122.4 $\pm$ 4.8 <sup>a</sup>	71.9 $\pm$ 0.8 <sup>b</sup>	47.8 $\pm$ 4.1 <sup>c</sup>	23.7 $\pm$ 2.2 <sup>d</sup>
总生殖率/ind.	1.0	3.1 $\pm$ 0.2 <sup>a</sup>	5.2 $\pm$ 0.4 <sup>bcd</sup>	4.4 $\pm$ 0.3 <sup>abc</sup>	4.6 $\pm$ 0.6 <sup>c</sup>
	3.0	3.6 $\pm$ 0.2 <sup>a</sup>	5.9 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>	5.6 $\pm$ 0.6 <sup>b</sup>	6.0 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>
	5.0	2.8 $\pm$ 0.5 <sup>a</sup>	5.4 $\pm$ 0.8 <sup>b</sup>	4.4 $\pm$ 0.4 <sup>ab</sup>	4.6 $\pm$ 0.4 <sup>b</sup>
净生殖率	1.0	1.8 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>	2.9 $\pm$ 0.2 <sup>bc</sup>	2.9 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	3.6 $\pm$ 0.4 <sup>c</sup>
	3.0	2.2 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>	3.6 $\pm$ 0.1 <sup>bc</sup>	3.2 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	4.2 $\pm$ 0.5 <sup>c</sup>
	5.0	1.5 $\pm$ 0.1 <sup>a</sup>	2.9 $\pm$ 0.1 <sup>b</sup>	3.0 $\pm$ 0.3 <sup>b</sup>	3.6 $\pm$ 0.5 <sup>b</sup>
种群内禀增长率/d	1.0	0.1328 $\pm$ 0.0181 <sup>a</sup>	0.1914 $\pm$ 0.0075 <sup>a</sup>	0.2962 $\pm$ 0.0120 <sup>a</sup>	0.2539 $\pm$ 0.1907 <sup>a</sup>
	3.0	0.1859 $\pm$ 0.0193 <sup>a</sup>	0.2164 $\pm$ 0.0154 <sup>a</sup>	0.2884 $\pm$ 0.0561 <sup>a</sup>	0.3030 $\pm$ 0.2269 <sup>a</sup>
	5.0	0.0940 $\pm$ 0.0139 <sup>a</sup>	0.1726 $\pm$ 0.0066 <sup>a</sup>	0.2716 $\pm$ 0.0264 <sup>a</sup>	0.6467 $\pm$ 0.3730 <sup>a</sup>
后代混交率	1.0	0.03 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.02 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.02 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.03 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>
	3.0	0.05 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	0.01 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.04 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.03 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>
	5.0	0.00 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	0.01 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>	0.03 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	0.05 $\pm$ 0.01 <sup>a</sup>

\* 具有相同字母表示同一行数据组间进行多重比较无显著差异。

回归分析显示, 3 个食物密度下轮虫出生时的生命期望、世代时间、平均寿命和净生殖率以及  $3.0 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下的总生殖率与温度间显著相关(表 2)。

表 2 3 个食物密度下裂足臂尾轮虫出生时的生命期望、世代时间、总生殖率和净生殖率与温度的关系

Tab. 2 Relationships between life expectancy at hatching, generation time, gross reproductive and net reproductive rate of *B. diversicornis* cultured under three food levels and four temperatures ( $n = 4$ )

参数	食物密度/( $\times 10^6$ cells/ml)	回归方程	显著性检验
生命期望/h	1.0	$e_0 = 0.517x^2 - 30.463x + 513.589$	$R^2 = 0.920, P < 0.01$
	3.0	$e_0 = 0.586x^2 - 34.814x + 579.115$	$R^2 = 0.969, P < 0.01$
	5.0	$e_0 = 0.572x^2 - 33.658x + 556.521$	$R^2 = 0.907, P < 0.01$
世代时间/h	1.0	$T = 0.188x^2 - 14.246x + 287.277$	$R^2 = 0.962, P < 0.01$
	3.0	$T = 0.190x^2 - 14.366x + 288.877$	$R^2 = 0.977, P < 0.01$
	5.0	$T = 0.264x^2 - 18.310x + 336.255$	$R^2 = 0.969, P < 0.01$
总生殖率/ind.	3.0	$G_0 = -0.020x^2 + 1.027x - 7.254$	$R^2 = 0.589, P < 0.01$
净生殖率	1.0	$R_0 = -0.004x^2 + 0.287x - 1.507$	$R^2 = 0.652, P < 0.01$
	3.0	$R_0 = -0.004x^2 + 0.285x - 1.109$	$R^2 = 0.580, P < 0.01$
	5.0	$R_0 = -0.008x^2 + 0.485x - 3.875$	$R^2 = 0.633, P < 0.01$

### 3 讨论

#### 3.1 温度和食物密度对轮虫存活和发育的影响

25℃下,较高或较低的食物密度均显著缩短萼花臂尾轮虫(*B. calyciflorus*)的平均寿命和世代时间<sup>[9]</sup>;25℃下,变形臂尾轮虫(*B. variabilis*)的平均寿命和出生时的生命期望均在 $1.0 \times 10^6$  cells/ml的小球藻(*Chlorella vulgaris*)密度下最长,高于或低于该密度则显著缩短;世代时间在 $0.5 \times 10^6$  cells/ml的小球藻密度下最长,高于或低于该密度也显著缩短<sup>[10]</sup>;22℃下,食物密度对方形臂尾轮虫(*B. quadridentatus*)的平均寿命无显著影响,但较高( $>8.0 \times 10^6$  cells/ml)或较低( $<1.0 \times 10^6$  cells/ml)的食物密度均使其世代时间显著延长<sup>[11]</sup>;而22℃下,斜生栅藻密度对两种形态型裂足臂尾轮虫出生时的生命期望和世代时间均无显著的影响<sup>[5]</sup>.本研究结果表明,15、25和30℃下,食物密度对裂足臂尾轮虫出生时的生命期望均无显著的影响;但20℃下,裂足臂尾轮虫出生时的生命期望在 $3.0 \times 10^6$  cells/ml下较长,在 $1.0 \times 10^6$ 和 $5.0 \times 10^6$  cells/ml下较短.各温度下,食物密度对裂足臂尾轮虫的世代时间均无显著的影响.可见,食物密度对轮虫存活和发育的影响常因轮虫种类和温度的不同而异.

在所研究的食物密度下,十指臂尾轮虫(*B. patulus*)和哈瓦那臂尾轮虫(*B. havanaensis*)孵化时的生命期望和世代时间均随着温度的升高而逐渐显著缩短<sup>[2,4]</sup>.与其不尽相同的是,尽管在 $1.0 \times 10^6$ 和 $10.0 \times 10^6$  cells/ml的微绿球藻(*Nannochloris oculata*)密度下,月形腔轮虫(*Lecane luna*)和四齿腔轮虫(*L. quadridentata*)的平均寿命和世代时间均随着温度的升高而逐渐显著缩短;但在 $5.0 \times 10^6$  cells/ml的微绿球藻密度下,两种轮虫的平均寿命和世代时间均在20和25℃之间无显著差异<sup>[3]</sup>.本研究中,尽管在 $3.0 \times 10^6$  cells/ml的斜生栅藻密度下裂足臂尾轮虫出生时的生命期望以及3个食物密度下轮虫的世代时间均随着温度的升高而逐渐显著地缩短;但在 $1.0 \times 10^6$ 和 $5.0 \times 10^6$  cells/ml的斜生栅藻密度下其出生时的生命期望均在15℃下最长,30℃下最短,而20和25℃间无显著差异.由此可见,尽管轮虫的存活和发育时间总体上随着温度的升高而缩短,但它们对逐步升高的温度的反应却因轮虫种类和食物密度的不同而异.

#### 3.2 温度和食物密度对轮虫生殖的影响

25℃下,萼花臂尾轮虫的净生殖率在 $3.0 \times 10^6$  cells/ml的小球藻密度下最高,高于或低于该密度则显著降低<sup>[9]</sup>;25℃下,变形臂尾轮虫的净生殖率在 $1.0 \times 10^6$  cells/ml的小球藻密度下最高,高于或低于该密度则显著降低<sup>[10]</sup>;22℃下,方形臂尾轮虫的净生殖率在 $2.0 \times 10^6 \sim 8.0 \times 10^6$  cells/ml的小球藻密度范围内较高,低于或高于该密度范围则显著降低<sup>[11]</sup>.22℃下,斜生栅藻密度对不等棘刺型裂足臂尾轮虫的净生殖率无显著影响,但对等棘刺型裂足臂尾轮虫的净生殖率有显著影响;等棘刺型轮虫的净生殖率在 $6.0 \times 10^6$  cells/ml食物密度下显著小于 $0.75 \times 10^6$ 和 $3.0 \times 10^6$  cells/ml食物密度下, $1.5 \times 10^6$  cells/ml食物密度下与上述3种食物密度间均无显著差异<sup>[5]</sup>.本研究结果表明,15和20℃下,裂足臂尾轮虫的净生殖率均在 $3.0 \times 10^6$  cells/ml下较高, $1.0 \times 10^6$ 和 $5.0 \times 10^6$  cells/ml下较低且两者间无显著差异;但在25和30℃下,食物密度对裂足臂尾轮虫的净生殖率均无显著影响.

Fanestil等<sup>[12]</sup>和Meadow等<sup>[13]</sup>认为,理论上,变温动物的净生殖率应该不随着温度的变化而发生显著变化.但事实上,十指臂尾轮虫、哈瓦那臂尾轮虫、月形腔轮虫、四齿腔轮虫、壶状臂尾轮虫(*B. urceolaris*)、红臂尾轮虫(*B. rubens*)、剪形臂尾轮虫(*B. forcatus*)、尾突臂尾轮虫(*B. caudatus*)以及萼花臂尾轮虫的3个姐妹种等的净生殖率均受温度的显著影响<sup>[2,4,14-16]</sup>.本研究结果表明,3个食物密度下,温度对裂足臂尾轮虫的净生殖率均有显著影响;但裂足臂尾轮虫的净生殖率对温度升高的响应因食物密度的不同而存在差异.在 $1.0 \times 10^6$ 和 $3.0 \times 10^6$  cells/ml的斜生栅藻密度下,裂足臂尾轮虫在20℃下的净生殖率与25和30℃下的净生殖率无显著差异;但在 $5.0 \times 10^6$  cells/ml的斜生栅藻密度下,裂足臂尾轮虫在20、25和30℃下的净生殖率无显著差异.

由上述结果可知,轮虫的生殖常受温度和食物密度的显著影响.本研究中,双因素方差分析结果也证实了上述结论.

#### 3.3 温度和食物密度对轮虫种群增长的影响

25℃下,萼花臂尾轮虫的种群内禀增长率在 $3.0 \times 10^6$  cells/ml的小球藻密度下最高,高于或低于该密度

则显著降低<sup>[9]</sup>; 25℃下, 变形臂尾轮虫的种群内禀增长率在  $1.0 \times 10^6$  cells/ml 的小球藻密度下最高, 高于或低于该密度则显著降低<sup>[10]</sup>; 22℃下, 方形臂尾轮虫的种群内禀增长率在  $2.0 \times 10^6 \sim 8.0 \times 10^6$  cells/ml 的小球藻密度范围内较高, 低于或高于该密度范围则显著降低<sup>[11]</sup>. 22℃下, 斜生栅藻密度对不等棘刺型裂足臂尾轮虫的种群内禀增长率无显著影响, 但对等棘刺型裂足臂尾轮虫的种群内禀增长率有显著的影响; 种群内禀增长率在  $6.0 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下显著小于  $3.0 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下, 但两者均与  $0.75 \times 10^6$  和  $1.5 \times 10^6$  cells/ml 食物密度下无显著的差异<sup>[5]</sup>. 本研究结果表明, 15 和 20℃下,  $3.0 \times 10^6$  cells/ml 下裂足臂尾轮虫的种群内禀增长率均显著高于  $5.0 \times 10^6$  cells/ml 下, 但两者均与  $1.0 \times 10^6$  cells/ml 下的种群内禀增长率间无显著差异; 25 和 30℃下, 食物密度对裂足臂尾轮虫的种群内禀增长率均无显著影响.

种群内禀增长率综合了特定年龄存活率和繁殖率、首次生殖年龄和生殖间隔等, 因此, 温度常对其具有显著的影响<sup>[2,4,14-16]</sup>. 已有的结果表明, 种群内禀增长率对温度升高的反应因轮虫种类的不同而异. 哈瓦那臂尾轮虫、壶状臂尾轮虫、红臂尾轮虫、剪形臂尾轮虫和尾突臂尾轮虫的种群内禀增长率均随着温度的升高而显著升高<sup>[4,14-15]</sup>; 但萼花臂尾轮虫种复合体内姐妹种 LE9 的种群内禀增长率在 28℃下最高, 13 和 18℃下最低且两者间无显著差异; 姐妹种 HE1 的种群内禀增长率在 13、18 和 28℃间无显著差异; 姐妹种 HE3 的种群内禀增长率在 23 和 28℃下最高且两者间无显著差异<sup>[16]</sup>. 与上述研究结果不同, 本研究中, 3 个食物密度下, 温度对裂足臂尾轮虫的种群内禀增长率均无显著的影响. 在较高温度(30℃)下, 裂足臂尾轮虫个体间在存活和生殖等方面的较大差异所导致的种群内禀增长率的较大差异, 这可能是其种群内禀增长率对变化的温度无敏感反应的重要原因.

上述结果表明, 轮虫种群增长所需的最适温度和食物密度常因轮虫种类的不同而异.

### 3.4 温度和食物密度及其交互作用对轮虫生命表统计学参数的影响

温度、食物密度以及两者间的交互作用对十指臂尾轮虫的平均寿命、出生时的生命期望、世代时间、总生殖率、净生殖率和种群内禀增长率均有显著的影响<sup>[2]</sup>. 温度和食物密度均对哈瓦那臂尾轮虫的所有生命表统计学参数有显著的影响, 但温度和食物密度间的交互作用对其却无显著的影响<sup>[4]</sup>. 与上述研究结果不同, 本研究中, 温度仅对裂足臂尾轮虫出生时的生命期望、世代时间、净生殖率和总生殖率有显著影响, 食物密度仅对轮虫的净生殖率和总生殖率有显著影响, 而食物密度与温度之间的交互作用对轮虫所有的生命表统计学参数均无显著影响. 可见, 温度、食物密度以及两者间的交互作用对轮虫生命表统计学参数的影响因种类不同而异.

### 3.5 温度和食物密度对轮虫后代混交率的影响

混交雌体产生是休眠卵形成的前提条件, 受一些内源性和外源性因素的调节<sup>[17-23]</sup>. 22℃下, 斜生栅藻密度对不等棘刺型和等棘刺型裂足臂尾轮虫的后代混交率均无显著影响<sup>[5]</sup>. 本研究结果表明, 3 种食物密度下, 温度对裂足臂尾轮虫的后代混交率均无显著影响; 各温度下, 食物密度对其也均无显著影响. 裂足臂尾轮虫较低的后代混交率可能是其后代混交率对温度和食物密度的变化无敏感反应的主要原因.

## 4 参考文献

- [1] Edmondson WT. Reproductive rate of planktonic rotifers as related to food and temperature. *Ecological Monographs*, 1965, **35**: 61-111.
- [2] Sarma SSS, Rao TR. The combined effects of food and temperature on the life history parameters of *Brachionus patulus* Müller (Rotifera). *International Review of Hydrobiology*, 1991, **76**: 225-239.
- [3] Pérez-Legaspi IA, Rico-Martínez R. Effect of temperature and food concentration in two species of littoral rotifers. *Hydrobiologia*, 1998, **387/388**: 341-348.
- [4] Pavón-Meza EL, Sarma SSS, Nandini S. Combined effects of algal (*Chlorella vulgaris*) food level and temperature on the demography of *Brachionus havanaensis* (Rotifera): a life table study. *Hydrobiologia*, 2005, **546**: 353-360.
- [5] 马杰, 席贻龙, 许丹丹等. 温度和食物密度对两种形态型裂足臂尾轮虫生活史特征和后代形态型的影响. *湖泊科学*, 2011, **23**(4): 597-604.
- [6] Gilbert JJ. Mictic female production in the rotifer *Brachionus calyciflorus*. *Journal of Experimental Zoology*, 1963, **153**: 113-124.

- [ 7 ] 黎尚豪,朱 蕙,夏宜铮等. 单细胞绿藻的大量培养实验. 水生生物学集刊,1959, **4**: 462-472.
- [ 8 ] 胡 柯,席贻龙,王金霞. 不同地理区域湖泊中萼花臂尾轮虫的生活史特征. 湖泊科学,2010, **22**(4): 585-590.
- [ 9 ] 席贻龙,黄祥飞. 食物种类和浓度对壶状臂尾轮虫实验种群动态的影响. 水生生物学报,1999, **23**(3): 227-234.
- [ 10 ] Sarma SSS, Nandini S. Life table demography and population growth of *Brachionus variabilis* Hempel, 1896 in relation to *Chlorella vulgaris* densities. *Hydrobiologia*, 2001, **446/447**: 75-83.
- [ 11 ] 马 蕊,牛翠娟,鲍 蕾等. 食物浓度对方形臂尾轮虫发育历期与实验种群增长参数的影响. 动物学报,2004, **50**(5): 753-758.
- [ 12 ] Fanestil DD, Barrows CH. Aging in the rotifer. *Journal of Gerontology*, 1965, **20**(4): 462-469.
- [ 13 ] Maedow ND, Barrows CH. Studies on aging in a bdelloid rotifer. II. The effects of various environmental conditions and maternal age on longevity and fecundity. *Journal of Gerontology*, 1971, **26**: 302-309.
- [ 14 ] 胡存兵,席贻龙,陶李祥. 红臂尾轮虫和壶状臂尾轮虫生活史特征比较. 生态学报,2008, **28**(12): 5957-5963.
- [ 15 ] 陶李祥,席贻龙,胡存兵. 镰形臂尾轮虫和尾突臂尾轮虫生活史特征的比较研究. 应用生态学报,2008, **19**(5): 1104-1109.
- [ 16 ] 李化炳,席贻龙,程新峰. 萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)种复合体内三个姐妹种生活史特征比较. 生态学报,2009, **29**(2): 581-588.
- [ 17 ] Gilbert JJ. Population density, sexual reproduction and diapause in monogonont rotifers: new data for *Brachionus* and a review. *Journal of Limnology*, 2004, **63**(Suppl. 1): 32-36.
- [ 18 ] Xi YL, Dong LL, Ge YL *et al.* Resting egg production of *Brachionus calyciflorus* (Rotifera) at different water temperatures. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, **19**: 567-573.
- [ 19 ] Stelzer CP, Snell TW. Specificity of the crowding response in the *Brachionus plicatilis* species complex. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**: 125-130.
- [ 20 ] Timmeremeyer N, Stelzer CP. Chemical induction of mixis in the rotifer *Synchaeta tremula*. *Journal of Plankton Research*, 2006, **28**: 1233-1239.
- [ 21 ] Fussmann GF, Gregory K. Incomplete induction of mixis in *Brachionus calyciflorus*: patterns of reproduction at the individual level. *Hydrobiologia*, 2007, **593**: 111-119.
- [ 22 ] Gilbert JJ, Schröder T. Intraclonal variation in propensity for mixis in several rotifers: variation among females and with maternal age. *Hydrobiologia*, 2007, **593**: 121-128.
- [ 23 ] Ma Q, Xi YL, Zhang JY *et al.* Differences in life table demography among eight geographic populations of *Brachionus calyciflorus* (Rotifera) from China. *Limnologica*, 2010, **40**: 16-22.