

三种甲壳纲浮游动物与萼花臂尾轮虫的种间关系

张文萍 徐吉洋 李少南*

浙江大学农药与环境毒理研究所 杭州 310029

摘要: 为研究隆线蚤 (*Daphnia carinata*)、锯缘真剑水蚤 (*Eucyclops serrulatus*) 及中华薄壳介 (*Dolerocypris sinensis*) 3 种甲壳纲动物种群与萼花臂尾轮虫 (*Brachionus calyciflorus*) 种群的相互关系, 作者分别将其以不同接种密度与萼花臂尾轮虫 (接种密度为 350 ind/L) 进行混合培养。轮虫种群密度增长率自混合培养后的第 3 或 4 天开始下降, 且随着甲壳纲动物接种密度的增加轮虫种群受到的抑制作用增大。当轮虫接种密度为 350 ind/L 时, 3 种甲壳纲动物的种群变化有所不同: (1) 当隆线蚤起始密度低于 150 ind/L 时, 其种群生长受到轮虫的明显抑制; 而当隆线蚤起始密度达到 350 ind/L 时, 其在混合培养与单独培养下的种群变化基本一致, 这表明轮虫对隆线蚤种群生长无抑制作用。(2) 与隆线蚤不同, 锯缘真剑水蚤和中华薄壳介在混合培养下的种群数量持续增长。但与锯缘真剑水蚤相比, 中华薄壳介在混合培养下的种群增长速度较慢。

关键词: 隆线蚤; 萼花臂尾轮虫; 锯缘真剑水蚤; 中华薄壳介; 相互作用

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2016) 04-561-12

Interspecific Interaction between Three Species of Crustacean Zooplankton and Rotifer *Brachionus calyciflorus*

ZHANG Wen-Ping XU Ji-Yang LI Shao-Nan*

Institute of Pesticide and Environmental Toxicology, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

Abstract: In this study, three species of crustacean zooplankton i.e. Daphnids (*Daphnia carinata*), Cyclopoida (*Eucyclops serrulatus*), and Ostracods (*Dolerocypris sinensis*) were selected to investigate their interspecific relationship between each of them with Rotifers (*Brachionus calyciflorus*). Each species of Crustacean zooplankton was cultured at seven initial densities with Rotifers at density of 350 ind/L. The principal response curve (PRC) and multiple comparisons were employed to indicate the effects of crustacean zooplankton on Rotifer. The population of Rotifer was suppressed by all these three species of crustacean zooplankton. The suppression was enhanced with increasing of their initial inoculation density. The

基金项目 浙江省自然科学基金项目 (No. LY12B07008);

* 通讯作者, E-mail: snli@zju.edu.cn;

第一作者介绍 张文萍, 女, 硕士; 研究方向: 生态毒理学; E-mail: zhangwenping191@126.com.

收稿日期: 2015-04-25, 修回日期: 2015-12-21 DOI: 10.13859/j.cjz.201604007

suppression appeared on the fourth day after inoculating of Daphnid at the highest density and the eighth day after inoculating of Daphnid at the lowest density (Table 1). Moreover, the population difference of Rotifer between mixed cultivation group and mono-cultured group reached the largest on the eleventh day, and then decreased as the prolongation of culture time (Fig. 1). The similar phenomenon existed between Cyclopoida and Rotifer in which, the suppression of Rotifer appeared on the fourth day (Table 2), and the difference in population between mixed cultivation group and mono-cultured group reached the largest on the ninth day (Fig. 3). Similarly, Table 3 and Fig. 5 showed the population changes of Rotifer as it mixed with Ostracod. The suppression of Rotifer appeared on the third day (Table 3) and the difference in population of Rotifer between mixed and mono-cultured reached the largest on the eighth day (Fig. 5). The population of Daphnid, Cyclopoida, and Ostracod changed differently compared with their respective controls, as they were cultured with the Rotifer. For Daphnid, at initial density lower than 150 ind/L, its population was inhibited by the Rotifer, but the population was not affected by Rotifer at initial density higher than 200 ind/L (Fig. 2). However, both populations of the Cyclopoida and the Ostracod were promoted as they were cultured with the Rotifer at all the inoculating density (Fig. 4 and Fig. 6). Our results together suggested a competitive relationship existed between the Daphnid and the Rotifer, and the relationships between the Ostracod and Rotifer and that between the Cyclopoida and Rotifer were not competitive.

Key words: *Daphnia carinata*; *Brachionus calyciflorus*; *Eucyclops serrulatus*; *Dolerocypris sinensis*; Interspecific interaction

轮虫和枝角类、剑水蚤、介形虫是水体中常见的浮游动物,它们虽然处在食物链的底层,但是在水生生态系统的物质循环和能量传递中起着重要作用。由于轮虫和枝角类的食性和生态位相似,它们之间会不可避免地发生食物资源的竞争,因而其种间关系受到广泛关注。研究发现,大部分枝角类生物和轮虫均可以藻类为食,因而二者共存时,对食物资源的竞争激烈。在两者的食物竞争中,由于枝角类的摄食率较高,耐饥饿能力较强,通常会压制轮虫种群的增长(Burns et al. 1986, Conde-Porcuna et al. 2000, Obertegger et al. 2010)。除生物种类、食物、温度等影响因素外,有迹象表明轮虫和枝角类的相对起始密度也会对其种间竞争结局产生影响(Huang 2014),而有关相对起始密度对隆线蚤(*Daphnia carinata*)和萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)种间关系影响的研究迄今为止仍属少见。

与大部分枝角类不同,剑水蚤和介形虫的食物具有多样性,这两类浮游动物不仅可以取

食绿藻,还可以捕食轮虫、纤毛虫、小型枝角类等。已有研究表明,桡足类可以捕食身体柔软的轮虫(Monakov 2003, Dhanker et al. 2012)。但是有关介形虫与轮虫的种间关系的研究迄今为止相对较少。

基于上述背景,笔者选取隆线蚤、锯缘真剑水蚤(*Eucyclops serrulatus*)、中华薄壳介(*Dolerocypris sinensis*)和萼花臂尾轮虫,研究这4种浮游动物各自的种群变化及前3种与萼花臂尾轮虫间的相互作用,为这4种浮游动物的室内培养和预测其在自然环境中的群落变化提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验生物与食物

实验所用隆线蚤、锯缘真剑水蚤、中华薄壳介和萼花臂尾轮虫均采自浙江大学华家池校区,并在实验室分离纯化半年以上。其中,中华薄壳介由华东师范大学生命科学学院鉴定,其余3种生物由南开大学鉴定。

实验中以蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 为供试生物的食物。藻细胞采用 L9 培养液 (基本组成成分为: NH_4Cl 0.15 g/L, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.12 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.18 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.15 g/L, KH_2PO_4 0.016 g/L, NaHCO_3 0.50 g/L, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.8 mg/L, $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 mg/L 和微量元素) 培养, 收集指数生长期的细胞, 经 Anke DL-5-B 离心机 (上海飞鸽公司) 4 000 r/min 离心浓缩后冷藏于 4℃ 冰箱中备用 (保存时间不超过一周)。使用时, 用 M4 培养液 (基本组成为: $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 293.8 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 123.3 mg/L, KCl 5.8 mg/L, NaHCO_3 64.8 mg/L, Na_2SiO_3 4.295 mg/L, KH_2PO_4 0.143 mg/L, K_2HPO_4 0.184 mg/L, NaNO_3 0.143 mg/L 等) 稀释成密度为 6×10^9 cells/L 的藻液。

1.2 实验方法

1.2.1 实验生物预培养 预培养温度为 (25 ± 2) °C, 光暗比为 16:8, 光强度为 1 000 ~ 2 000 lx, 培养液均为 M4, 食物为蛋白核小球藻稀释液, 培养容器为 100 ml 烧杯。轮虫预培养: 于烧杯中接入 35 只带孤雌生殖卵的健康轮虫, 每天投喂 2 ml 藻液, 培养 4 d 后收集备用。隆线蚤预培养: 于烧杯中接种 10 只同一母蚤所产大小相同的带卵隆线蚤, 每天投喂 4 ml 藻液, 取出生 6 ~ 24 h 的幼蚤用于混合培养实验。锯缘真剑水蚤预培养: 于烧杯中接种 1 只带卵母蚤, 同时接种 35 只轮虫以刺激母蚤产蚤, 每天投喂 2 ml 藻液, 将母蚤所产幼蚤培养至成体后, 收集其中的带卵雌蚤用于混合培养。中华薄壳介预培养: 于烧杯中接种成体介形虫 5 只, 同时接种 35 只轮虫以刺激介形虫产出幼体, 每天投喂 2 ml 藻液, 将母体所产幼体培养至其完成两次以上蜕皮后, 收集备用。

1.2.2 实验生物的混合培养 混合培养条件与预培养相同, 但在 250 ml 的烧杯中进行, 实验体积为 200 ml。实验期间不更换培养液, 每天添加 1 ml 小球藻液。

隆线蚤与萼花臂尾轮虫的混合培养: 设置

7 个混合培养组, 其中隆线蚤的起始密度分别为 50、100、150、200、250、300 和 400 ind/L, 萼花臂尾轮虫起始密度均为 350 ind/L, 另设置对应起始密度的 7 个隆线蚤单独培养组和 1 个轮虫单独培养组作为对照。各组均设 5 个重复。实验期间每天计数隆线蚤与轮虫数量, 实验进行 23 d。

锯缘真剑水蚤与萼花臂尾轮虫的混合培养: 设置 7 个混合培养组, 锯缘真剑水蚤的起始密度分别为 5、10、50、100、150、200、250 ind/L, 萼花臂尾轮虫起始密度均为 350 ind/L, 另设置对应起始密度的 7 个锯缘真剑水蚤单独培养组和 1 个轮虫单独培养组作为对照。各组均设 5 个重复。实验期间每天计数剑水蚤与轮虫数量, 实验进行 16 d。

中华薄壳介与萼花臂尾轮虫的混合培养: 设置 7 个混合培养组, 中华薄壳介的起始密度分别为 10、50、100、150、200、250、300 ind/L, 萼花臂尾轮虫起始密度均为 350 ind/L, 另设置对应起始密度的 7 个中华薄壳介单独培养组和 1 个轮虫单独培养组作为对照。各组均设 5 个重复。实验期间每天计数中华薄壳介与轮虫数量, 实验进行 15 d。

1.3 计数方法与数据处理

计数方法: 对甲壳纲生物, 实验开始时计数其全部个体, 待种群数量超过 500 ind/L 后取 20 ml 水样计数, 每个重复计数 3 次后求平均值。轮虫采用抽样计数方法, 自实验开始第 2 天起, 每次将培养液充分混匀, 随机取 1 ml 水样, 采用 Nikon SMZ1500 体视显微镜计数, 重复计数 3 次, 取平均值作为轮虫种群的密度。

数据处理: 以甲壳纲生物接种密度为解释变量, 采用 Canoco[®]5.0 软件分析 3 种甲壳纲生物对轮虫种群增长的影响, 做出主效应曲线 (principle response curve, PRC)。利用 DPS[®] 软件分析轮虫种群密度在甲壳纲生物不同接种密度下的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 蓴花臂尾轮虫与隆线溞种间相互影响

隆线溞不同接种密度下轮虫种群密度随时间的变化见表 1。图 1 是基于表 1 数据的主效应曲线。隆线溞对蓴花臂尾轮虫有明显的压制作用 ($F = 13\ 633$, $P = 0.002$), 隆线溞接种密度越高, 轮虫种群受到的压制也越大。在最高接种密度组 (400 ind/L), 隆线溞对轮虫种群的压制作用在培养开始后的第 4 天开始显现; 在最低接种密度组 (50 ind/L), 压制作用在培养开始后的第 8 天显现。在培养开始后的第 11 天, 轮虫在单独培养组的种群密度达到最大, 此时, 轮虫种群密度在混合培养组和单独培养组之间的差值亦达到最大; 随着培养时间的延长, 轮虫种群密度在混合培养组和单独培养组之间的差值减小; 培养结束时, 轮虫在各混合培养组的“种群密度”(因为实验结束时, 混合培养组的大多数已经没有轮虫的存在, 不能称之为种群, 而为与对照组进行比较, 特将其进行区分, 下同) 趋于一致且明显低于单独培养

组, 仅单独培养组轮虫此时仍有存活。

混合培养和单独培养隆线溞的种群增长曲线见图 2。当隆线溞接种密度低于 150 ind/L 时, 其种群受到轮虫抑制。当接种密度为 150 ind/L 时, 单独培养条件下隆线溞种群的最大密度为 1 788 ind/L, 而混合培养条件下为 1 274 ind/L, 前者为后者的 1.4 倍。当隆线溞接种密度达到 250 ind/L 或更高时, 轮虫对其抑制作用趋于消失, 隆线溞在混合培养下的种群增长趋势和单独培养下的基本相同。

2.2 蓴花臂尾轮虫与锯缘真剑水蚤的种间相互影响

锯缘真剑水蚤不同接种密度下轮虫种群密度随时间的变化见表 2。图 3 是基于表 2 数据的主效应曲线。与隆线溞类似, 锯缘真剑水蚤对蓴花臂尾轮虫有明显的压制作用 ($F = 28\ 215$, $P = 0.002$), 锯缘真剑水蚤接种密度越高, 轮虫种群受到的压制也越大。锯缘真剑水蚤对轮虫种群的压制作用在培养开始后的第 4

表 1 蓴花臂尾轮虫在隆线溞不同接种密度下的种群消长

Table 1 Population growth of Rotifer along with different inoculation of Daphnid

隆线溞接种 密度 Inoculation density of Daphnid (ind/L)	蓴花臂尾轮虫种群密度 Population density of Rotifer (ind/L)					
	1 d	4 d	8 d	11 d	13 d	16 d
0	1 200 ± 290 ^a	20 060 ± 4 090 ^a	117 260 ± 20 310 ^a	144 930 ± 19 090 ^a	57 660 ± 6 570 ^a	30 860 ± 3 060 ^a
50	860 ± 380 ^a	18 730 ± 3 830 ^a	89 130 ± 11 170 ^b	71 260 ± 11 800 ^b	17 200 ± 4 860 ^b	0 ± 0 ^b
100	1 660 ± 520 ^a	18 930 ± 2 120 ^a	63 060 ± 9 450 ^c	36 530 ± 8 590 ^c	280 ± 860 ^c	0 ± 0 ^b
150	1 460 ± 500 ^a	16 060 ± 1 750 ^a	56 200 ± 8 780 ^c	19 460 ± 4 780 ^{cd}	1 200 ± 180 ^c	0 ± 0 ^b
200	1 460 ± 500 ^a	19 930 ± 6 070 ^a	54 460 ± 9 320 ^c	9 660 ± 1 730 ^{de}	460 ± 310 ^c	0 ± 0 ^b
250	1 530 ± 500 ^a	18 400 ± 4 380 ^a	24 860 ± 2 910 ^d	4 200 ± 1 320 ^{de}	260 ± 270 ^c	0 ± 0 ^b
300	1 260 ± 430 ^a	16 000 ± 1 020 ^a	13 800 ± 1 900 ^d	730 ± 640 ^e	0 ± 0 ^c	0 ± 0 ^b
400	1 660 ± 400 ^a	7 930 ± 1 180 ^b	6 330 ± 2 160 ^d	330 ± 330 ^e	0 ± 0 ^c	0 ± 0 ^b

同一列中上标不同字母的数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

Values in a row that are marked by different letter are statistically different ($P < 0.05$).

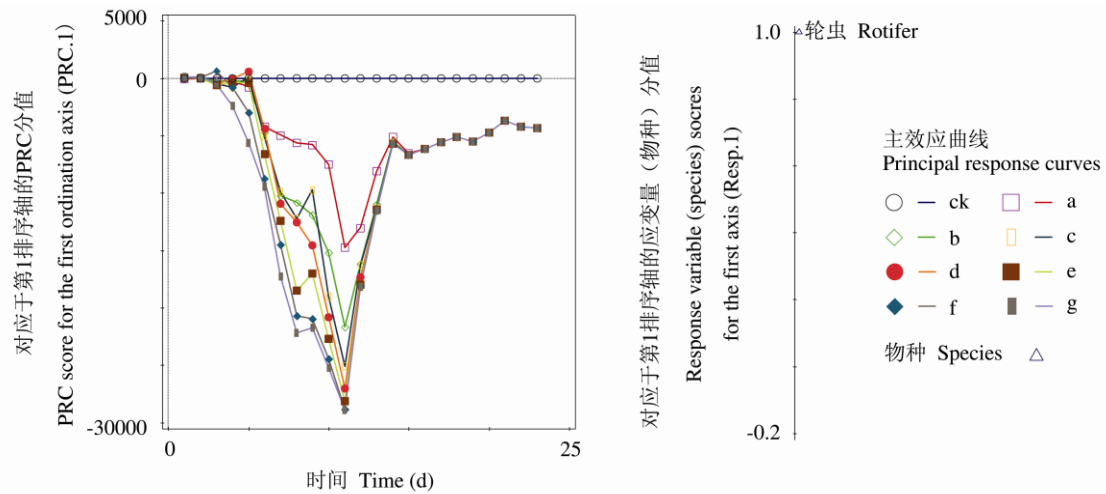


图 1 基于萼花臂尾轮虫和隆线蚤混合种群的主效应曲线

Fig. 1 Principal response curves (PRC) resulting from the dataset of Rotifer and Daphnid

此图显示隆线蚤接种密度对轮虫种群数量的影响，反映了混合培养下轮虫种群随时间的变化。右侧单物种权重 (b_k) 用于解释轮虫与 PRC 间的相关性。由于只有轮虫为因变量，故右图中只有一个数据点，它与左侧 PRC 上的数据点结合可以定量分析不同时间点轮虫受到的影响。

The figure indicated the effect of inoculation of Daphnid on population density Rotifer. The lines represent the course of the treatment levels in time. The species weight (b_k) can be interpreted as the affinity of the taxon with the principal response curves.

ck. 隆线蚤接种密度为 0 ind/L, 即对照组; a. 隆线蚤接种密度为 50 ind/L 组; b. 隆线蚤接种密度为 100 ind/L 组; c. 隆线蚤接种密度为 150 ind/L 组; d. 隆线蚤接种密度为 200 ind/L 组; e. 隆线蚤接种密度为 250 ind/L 组; f. 隆线蚤接种密度为 300 ind/L 组; g. 隆线蚤接种密度为 400 ind/L 组。

ck. The inoculation density of Daphnid was 0 ind/L, the mono-cultured group of Rotifer; a. The inoculation density of Daphnid was 50 ind/L, b. The inoculation density of Daphnid was 100 ind/L; c. The inoculation density of Daphnid was 150 ind/L, d. The inoculation density of Daphnid was 200 ind/L; e. The inoculation density of Daphnid was 250 ind/L, f. The inoculation density of Daphnid was 300 ind/L; g. The inoculation density of Daphnid was 400 ind/L.

天开始显现；培养开始后第 9 天，轮虫在单独培养组的种群密度达到最大（117 460 ind/L），此时，轮虫种群密度在混合培养组和单独培养组之间的差值亦达到最大；随着培养时间的延长，轮虫种群密度在混合培养组和单独培养组之间的差值减小；培养结束时，轮虫在混合培养组的“种群密度”仍明显低于单独培养组，除了最低接种密度组（5 ind/L），轮虫在其他混合培养组已经消失或接近消失。

混合培养下锯缘真剑水蚤的种群增长曲线见图 4。与对隆线蚤不同，轮虫对于剑水蚤的

种群增长没有抑制，相反它可以促进剑水蚤的种群增长。无论接种密度如何，剑水蚤在混合培养组的种群增长速度总是高于单独培养。在整个培养过程中，剑水蚤始终处于种群增长状态。

2.3 萼花臂尾轮虫与中华薄壳介的种间相互影响

中华薄壳介不同接种密度下轮虫种群密度随时间的变化见表 3。图 5 是基于表 3 数据的主效应曲线。与隆线蚤和锯缘真剑水蚤类似，中华薄壳介对萼花臂尾轮虫种群有明显的压制

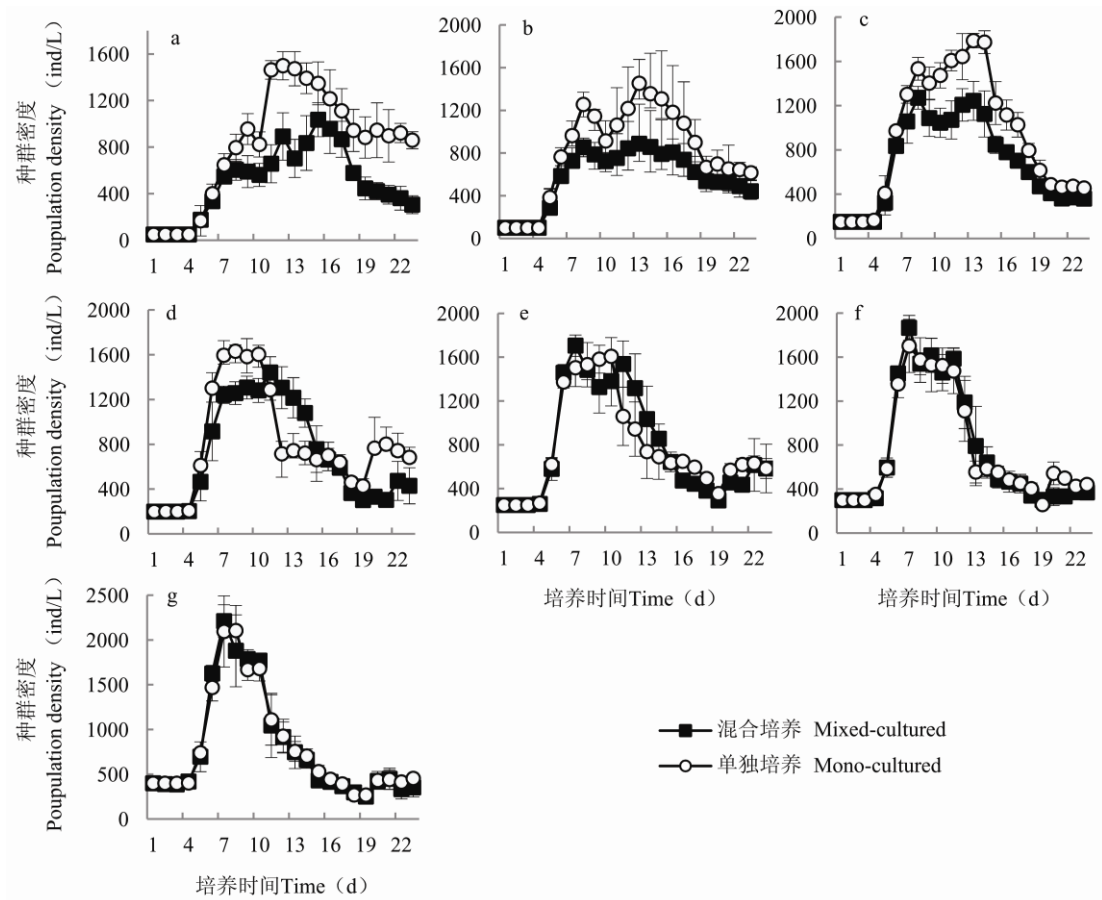


图 2 隆线蚤的种群密度变化

Fig. 2 Population growth curves of Daphnid alone (control) and in presence of Rotifer

a. 隆线蚤接种密度为 50 ind/L 组; b. 隆线蚤接种密度为 100 ind/L 组; c. 隆线蚤接种密度为 150 ind/L 组; d. 隆线蚤接种密度为 200 ind/L 组; e. 隆线蚤接种密度为 250 ind/L 组; f. 隆线蚤接种密度为 300 ind/L 组; g. 隆线蚤接种密度为 400 ind/L 组。

a. The inoculation density of Daphnid was 50 ind/L; b. the inoculation density of Daphnid was 100 ind/L; c. The inoculation density of Daphnid was 150 ind/L, d. the inoculation density of Daphnid was 200 ind/L; e. The inoculation density of Daphnid was 250 ind/L; f. the inoculation density of Daphnid was 300 ind/L; g. The inoculation density of Daphnid was 400 ind/L.

作用 ($F = 17\ 597$, $P = 0.002$), 中华薄壳介接种密度越高, 轮虫种群受到的压制也越大。中华薄壳介对轮虫的压制作用在培养开始后的第 3 天开始显现; 培养开始后第 8 天, 轮虫在单独培养组的种群密度达到最大 (109 930 ind/L), 此时, 轮虫种群密度在混合培养组和单独培养组之间的差值比较明显; 随着培养时间的延长, 轮虫在单独培养组的种群密度开始下降; 培养结束时, 轮虫单独培养组的种群密度仍明显高

于混合培养组, 除了最低接种密度组 (10 ind/L), 轮虫在其他混合培养组已经消失或接近消失。

混合培养下中华薄壳介的种群增长曲线见图 6。与对锯缘真剑水蚤一样, 轮虫可以促进中华薄壳介的种群增长。无论接种密度如何, 中华薄壳介在混合培养组的种群增长速率总是高于单独培养组; 总体而言, 中华薄壳介在整个培养过程中处于种群增长状态, 但增长幅度

表 2 萼花臂尾轮虫在锯缘真剑水蚤不同接种密度下的种群消长

Table 2 Population growth of Rotifer along with different inoculation density of Cyclopoida

锯缘真剑水蚤接种密度 Inoculation density of Cyclopoida (ind/L)	萼花臂尾轮虫种群密度 Population density of Rotifer (ind/L)					
	1 d	4 d	7 d	9 d	11 d	13 d
0	860 ± 290 ^a	13 260 ± 3 030 ^a	51 530 ± 9 520 ^a	117 460 ± 14 090 ^a	71 000 ± 6 170 ^a	54 800 ± 4 650 ^a
5	860 ± 290 ^a	11 060 ± 2 460 ^{ab}	46 400 ± 4 210 ^a	59 330 ± 6 250 ^b	46 400 ± 6 800 ^b	11 930 ± 2 690 ^b
10	730 ± 270 ^a	11 060 ± 2 440 ^{ab}	45 130 ± 3 090 ^a	56 200 ± 10 050 ^b	31 400 ± 6 140 ^c	800 ± 380 ^c
50	800 ± 380 ^a	11 660 ± 1 770 ^{ab}	33 600 ± 3 460 ^b	10 660 ± 1 560 ^c	22 660 ± 2 430 ^{cd}	460 ± 180 ^c
100	730 ± 430 ^a	7 930 ± 2 600 ^b	3 460 ± 600 ^c	7 060 ± 1 580 ^c	18 060 ± 2 480 ^{de}	200 ± 180 ^c
150	800 ± 380 ^a	3 600 ± 270 ^c	2 930 ± 640 ^c	9 260 ± 1 460 ^c	9 530 ± 860 ^{def}	0 ± 0 ^c
200	730 ± 360 ^a	1 060 ± 270 ^c	1 260 ± 270 ^c	1 860 ± 380 ^c	6 200 ± 1 620 ^{ef}	0 ± 0 ^c
250	730 ± 430 ^a	60 ± 140 ^c	860 ± 440 ^c	1 800 ± 640 ^c	13 800 ± 4050 ^f	0 ± 0 ^c

同一列中上标不同字母的数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

Values in a row that are marked by different letter are statistically different ($P < 0.05$).

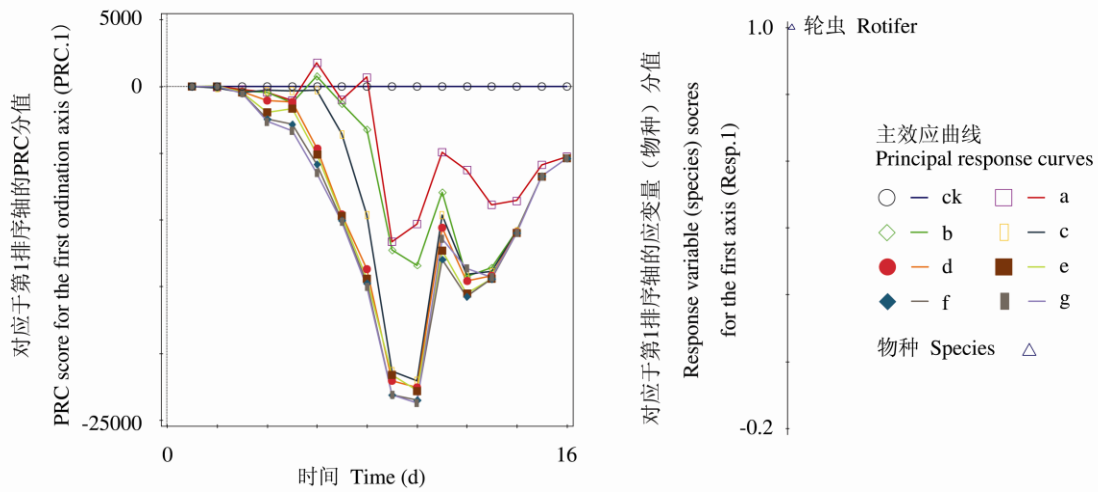


图 3 基于萼花臂尾轮虫和锯缘真剑水蚤混合种群的主效应曲线

Fig. 3 Principal response curves (PRC) resulting from the dataset of Rotifer and Cyclopoida

此图显示锯缘真剑水蚤接种密度对轮虫种群数量的影响，反映了不同混合培养下轮虫种群随时间的变化。右侧单物种权重 (b_k) 用于解释轮虫与 PRC 间的相关性。由于只有轮虫为因变量，故右图中只有一个数据点，它与左侧 PRC 上的数据点结合可以定量分析不同时间点轮虫受到的影响。

The fig indicated the effect of inoculation of Cyclopoida on population density Rotifer. The lines represent the course of the treatment levels in time. The species weight (b_k) can be interpreted as the affinity of the taxon with the principal response curves.

ck. 锯缘真剑水蚤接种密度为 0 ind/L, 即轮虫对照组; a. 锯缘真剑水蚤接种密度为 5 ind/L 组; b. 锯缘真剑水蚤接种密度为 (转下页)

(接上页) 10 ind/L 组; c. 锯缘真剑水蚤接种密度为 50 ind/L 组; d. 锯缘真剑水蚤接种密度为 100 ind/L 组; e. 锯缘真剑水蚤接种密度为 150 ind/L 组; f. 锯缘真剑水蚤接种密度为 200 ind/L 组; g. 锯缘真剑水蚤接种密度为 250 ind/L 组。

ck. The inoculation density of Cyclopoida was 0 ind/L, the mono-cultured of Rotifer; a. The inoculation density of Cyclopoida was 5 ind/L; b. The inoculation density of Cyclopoida was 10 ind/L; c. The inoculation density of Cyclopoida was 50 ind/L; d. The inoculation density of Cyclopoida was 100 ind/L; e. The inoculation density of Cyclopoida was 150 ind/L; f. The inoculation density of Cyclopoida was 200 ind/L; g. The inoculation density of Cyclopoida was 250 ind/L.

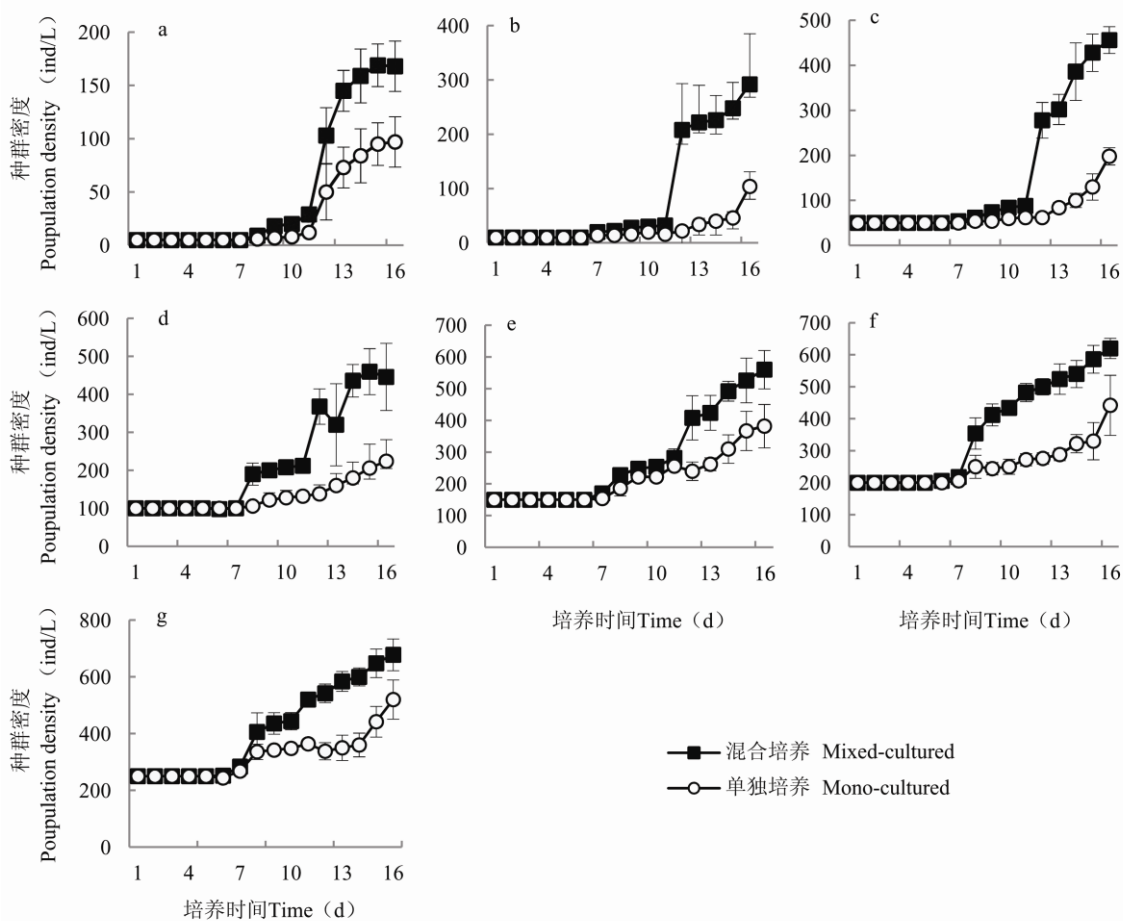


图 4 锯缘真剑水蚤的种群变化

Fig. 4 Population growth curves of Cyclopoida alone (control) and in presence of Rotifer

a. 锯缘真剑水蚤接种密度为 5 ind/L 组; b. 锯缘真剑水蚤接种密度为 10 ind/L 组; c. 锯缘真剑水蚤接种密度为 50 ind/L 组; d. 锯缘真剑水蚤接种密度为 100 ind/L 组; e. 锯缘真剑水蚤接种密度为 150 ind/L 组; f. 锯缘真剑水蚤接种密度为 200 ind/L 组; g. 锯缘真剑水蚤接种密度为 250 ind/L 组。

a. The inoculation density of Cyclopoida was 5 ind/L; b. The inoculation density of Cyclopoida was 10 ind/L; c. The inoculation density of Cyclopoida was 50 ind/L; d. The inoculation density of Cyclopoida was 100 ind/L; e. The inoculation density of Cyclopoida was 150 ind/L; f. The inoculation density of Cyclopoida was 200 ind/L; g. The inoculation density of Cyclopoida was 250 ind/L.

表 3 萼花臂尾轮虫在中华薄壳介不同接种密度下的种群消长

Table 3 Population growth of Rotifer along with different inoculation density of Ostracod

中华薄壳介接种密度 Inoculation density of Ostracod (ind/L)	萼花臂尾轮虫种群密度 Population density of Rotifer (ind/L)					
	1 d	3 d	5 d	8 d	11 d	15 d
0	930 ± 270 ^a	12 130 ± 1 040 ^a	45 130 ± 6 200 ^a	109 930 ± 11 780 ^a	91 530 ± 26 860 ^a	24 260 ± 1 930 ^a
10	860 ± 290 ^a	12 400 ± 1 360 ^a	49 130 ± 3 730 ^a	86 000 ± 12 030 ^b	21 800 ± 3 990 ^b	3 130 ± 830 ^b
50	1 000 ± 400 ^a	12 530 ± 3 130 ^a	14 660 ± 3 240 ^b	38 530 ± 3 640 ^c	9 730 ± 3 090 ^{bc}	130 ± 180 ^c
100	1 060 ± 430 ^a	6 860 ± 2 930 ^b	6 200 ± 1 740 ^c	9 530 ± 2 320 ^d	6 730 ± 3 250 ^{bc}	0 ± 0 ^c
150	1 130 ± 380 ^a	2 330 ± 740 ^c	1 060 ± 430 ^{cd}	2 330 ± 970 ^d	800 ± 380 ^c	0 ± 0 ^c
200	1 060 ± 270 ^a	730 ± 430 ^c	400 ± 270 ^{cd}	330 ± 230 ^d	0 ± 0 ^c	0 ± 0 ^c
250	1 130 ± 290 ^a	60 ± 140 ^c	0 ± 0 ^d	0 ± 0 ^d	0 ± 0 ^c	0 ± 0 ^c
300	860 ± 500 ^a	0 ± 0 ^c	0 ± 0 ^d	0 ± 0 ^d	0 ± 0 ^c	0 ± 0 ^c

同一列中上标不同字母的数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

Values in a row that are marked by different letter are statistically different ($P < 0.05$).

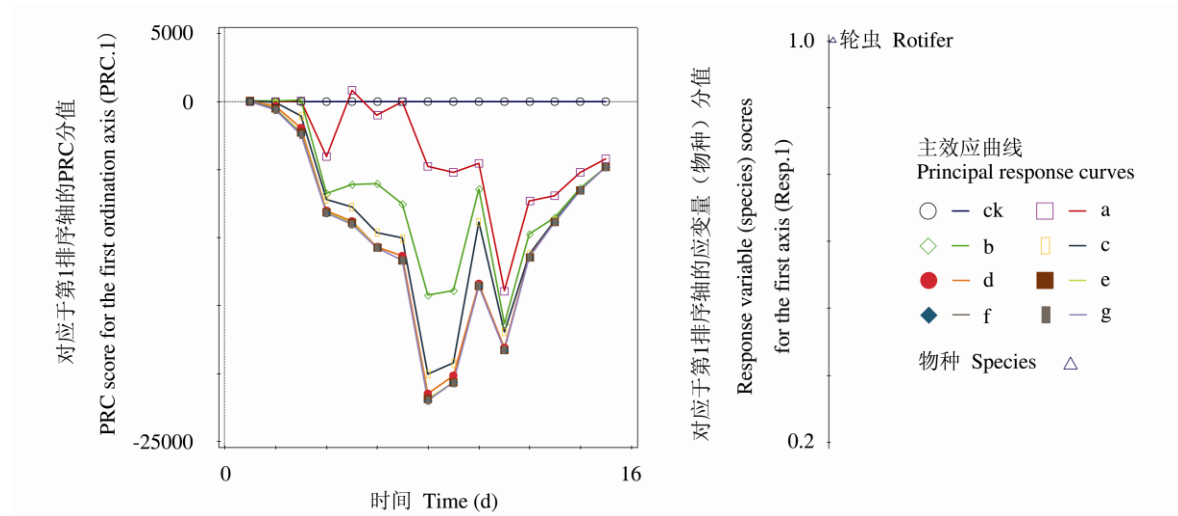


图 5 基于萼花臂尾轮虫和中华薄壳介混合种群的主效应曲线

Fig. 5 Principal response curves (PRC) resulting from the dataset of Rotifer and Ostracod

此图显示中华薄壳介接种密度对轮虫种群数量的影响，反映了不同混合培养下轮虫种群随时间的变化。右侧物种权重 (b_k) 用于解释轮虫与 PRC 间的相关性。由于只有轮虫为因变量，故右图中只有一个数据点，它与左侧 PRC 上的数据点结合可以定量分析不同时间点轮虫受到的影响。

The fig indicated the effect of inoculation of Ostracod on population density Rotifer. The lines represent the course of the treatment levels in time.

The species weight (b_k) can be interpreted as the affinity of the taxon with the Principal Response Curves.

ck. 中华薄壳介接种密度为 0 ind/L, 即轮虫对照组; a. 中华薄壳介接种密度为 10 ind/L 组; b. 中华薄壳介接种密度为 50 ind/L 组; c. 中华薄壳介接种密度为 100 ind/L 组; d. 中华薄壳介接种密度为 150 ind/L 组; e. 中华薄壳介接种密度为 200 ind/L 组; f. 中华薄壳介接种密度为 250 ind/L 组; g. 中华薄壳介接种密度为 300 ind/L 组。(转下页)

(接上页)ck. The inoculation density of Ostracod was 0 ind/L, the mono-cultured of Rotifer; a. The inoculation density of Ostracod was 10 ind/L; b. The inoculation density of Ostracod was 50 ind/L; c. The inoculation density of Ostracod was 100 ind/L; d. The inoculation density of Ostracod was 150 ind/L; e. The inoculation density of Ostracod was 200 ind/L; f. The inoculation density of Ostracod was 250 ind/L; g. The inoculation density of Ostracod was 300 ind/L.

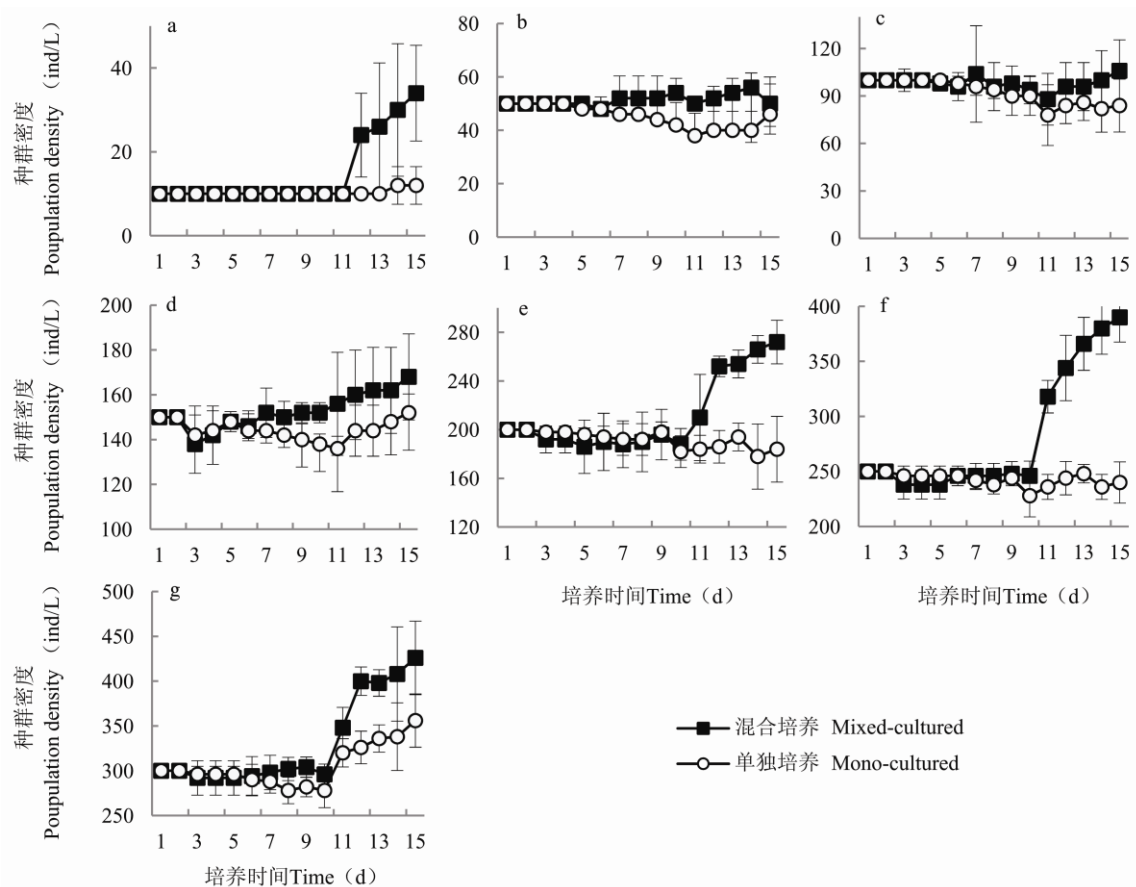


图 6 中华薄壳介的种群变化

Fig. 6 Population growth curves of Ostracod alone (control) and in presence of Rotifer

a. 中华薄壳介接种密度为 10 ind/L 组; b. 中华薄壳介接种密度为 50 ind/L 组; c. 中华薄壳介接种密度为 100 ind/L 组; d. 中华薄壳介接种密度为 150 ind/L 组; e. 中华薄壳介接种密度为 200 ind/L 组; f. 中华薄壳介接种密度为 250 ind/L 组; g. 中华薄壳介接种密度为 300 ind/L 组。

a. The inoculation density of Ostracod was 10 ind/L; b. The inoculation density of Ostracod was 50 ind/L; c. The inoculation density of Ostracod was 100 ind/L; d. The inoculation density of Ostracod was 150 ind/L; e. The inoculation density of Ostracod was 200 ind/L; f. The inoculation density of Ostracod was 250 ind/L; g. The inoculation density of Ostracod was 300 ind/L.

不及锯缘真剑水蚤。

3 讨论

轮虫和一些小型甲壳纲动物是浮游生物的重要组成部分，它们利用相同的生存空间，分

享共同的食物资源。环境中的生物因素和非生物因素均可影响它们的生长速率和群落结构。生物间的相互作用即是其中的一个重要因素。有研究表明, 甲壳纲中体型较大的枝角类可通过对同一食物资源的资源掠夺或机械干扰, 或通过两者共同作用而强烈抑制轮虫的种群增长 (Gilbert 1988)。但也有报道称, 褶皱臂尾轮虫 (*B. plicatilis*) 会对微型裸腹溞 (*Moina micrura*) (Bonou et al. 1998) 和蒙古裸腹溞 (*M. mongolica*) (陈桃英等 2004) 产生压制。这表明浮游动物的种类不同, 它们的种间关系也有所不同。

本文研究发现, 3 种属于甲壳纲的浮游动物对萼花臂尾轮虫均有压制作用, 这种作用随着甲壳纲浮游动物接种密度的增加而增大; 但是轮虫对这 3 种动物的影响有所不同: 1) 轮虫与隆线溞之间只存在单纯的竞争关系, 隆线溞接种密度低时其受到轮虫的影响较大, 随着接种密度的增加, 混合培养和单独培养下的隆线溞种群增长基本一致, 未受到轮虫存在的影响, 这表明在与隆线溞的竞争, 轮虫不占据优势; 2) 轮虫可以促进锯缘真剑水蚤的种群生长; 3) 与锯缘真剑水蚤类似, 中华薄壳介的种群生长也受到轮虫的促进, 但与锯缘真剑水蚤相比, 中华薄壳介受到的促进较弱。

轮虫和溞类在很多方面相似, 如以孤雌生殖为主, 发育过程中无幼体阶段。类似的生活策略和食性, 使得它们之间的竞争作用尤为突出 (Xi et al. 2007)。但是竞争结果与所涉及的物种有关, 如红臂尾轮虫 (*B. rubens*) 的生长进程不受隆线溞的竞争干扰 (Iyer et al. 1993); 缺刺秀体溞 (*Diaphanosoma aspinosum*) 的存在亦未对圆形臂尾轮虫 (*B. rotundiformis*) 产生干扰 (Cheng et al. 2011); 而中型的六腕轮虫 (*Hexarthra intermedia*) 则会对长额象鼻溞 (*Bosmina longirostris*) 产生伤害 (Jaramillo-Londoño et al. 2010)。有学者发现模

糊网纹溞 (*Ceriodaphnia dubia*) 和多刺裸腹溞 (*M. macrocopa*) 会对十指臂尾轮虫 (*B. patulus*) 的种群产生压制 (Nini et al. 2002)。还有学者发现, 新生的萼花臂尾轮虫和角突臂尾轮虫 (*B. angularis*) 会受到蚤状溞 (*Daphnia pulex*) 的影响 (Diéguez et al. 2011), 而枝角类当中的尖额溞 (*Alona glabra*) 和三刺粗毛溞 (*Macrothrix triserialis*) 也会压制大肚须足轮虫 (*Euchlanis dilatata*) 的种群增长, 但未造成轮虫的消亡 (Espinosa-Rodríguez et al. 2012)。在本实验中, 萼花臂尾轮虫受到隆线溞的压制, 这可能与隆线溞体型较大, 繁殖率较高, 对藻类的取食能力较强有关。

与溞类多进行孤雌生殖不同, 桡足类多进行两性生殖, 且不同发育阶段的食性也有所不同 (Nandini et al. 2007), 所以桡足类与萼花臂尾轮虫的种间关系更为复杂。在桡足类压制轮虫的因素中, 捕食比竞争起的作用更大 (Diéguez et al. 2002)。桡足类的捕食通常会受到种类、性别、发育阶段、个体游泳速度等因素的影响 (Brandl 2005, Nagata et al. 2006)。当圆形臂尾轮虫分别与短角异剑水蚤 (*Apocyclops royi*) 和安氏伪镖水蚤 (*Pseudodiaptomus annandalei*) 两种桡足类生物混合培养时, 仅后者会对轮虫种群产生压制, 原因是后者能够捕食并且快速消化掉轮虫; 短角异剑水蚤并未对轮虫产生干扰, 主要原因是其本身体型较小 (Cheng et al. 2011)。本实验中的萼花臂尾轮虫受到锯缘真剑水蚤的压制, 原因可能是后者体型较大。

介形虫和轮虫之间存在捕食关系, 但捕食效率与二者的种类、形态特征、大小等均有关 (Liperovskaya 1948)。有研究表明, 介形虫 (*Cypris pubera*) 在体长小于 2.2 μm 时, 不会捕食热带龟甲轮虫 (*Keratella tropica*), 但当体长超过 2.2 μm 时, 就会对热带龟甲轮虫种群产生抑制 (Gilbert 2012)。本实验中, 中华薄壳

介之所以受到萼花臂尾轮虫的促进, 可能也是体型的原因, 其可以后者为食物。

参 考 文 献

- Bonou C A, Saint-Jean L. 1998. The regulation mechanisms and yield of brackish water populations on *Moina micrura* reared in tanks. *Aquaculture*, 160(1): 69–79.
- Brandl Z. 2005. Freshwater copepods and Rotifers: predators and their prey. *Hydrobiologia*, 546(15): 475–489.
- Burns C W, Gilbert J J. 1986. Effect of *Daphnia* size and density on interference between *Daphnia* and *Keratella cochlearis*. *Limnology and Oceanography*, 31(4): 848–858.
- Cheng S H, KâS, Kumar R, et al. 2011. Effects of salinity, food level, and the presence of micro crustacean zooplankters on the population dynamics of Rotifer *Brachionus rotundiformis*. *Hydrobiologia*, 666(1): 289–299.
- Conde-Porcuna J M. 2000. Relative importance of competition with *Daphnia* (Cladocera) and nutrient limitation on *Anuraeopsis* (Rotifer) population dynamics in a laboratory study. *Freshwater Biology*, 44(3): 423–430.
- Dhanker R, Kumar R, Hwang J S, et al. 2012. Predation by *Pseudodiaptomus annandalei* (Copepoda: Calanoida) on Rotifer prey: size selection, egg predation and effect of algal diet. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 414/415(1731): 44–53.
- Diéguez M C, Gilbert J J. 2002. Suppression of the Rotifer *Polyarthra remata* by the omnivorous copepod *Tropocyclops extensus*: predation or competition. *Journal of Plankton Research*, 24(4): 359–369.
- Diéguez M C, Gilbert J J. 2011. *Daphnia*-Rotifer interactions in Patagonian communities. *Hydrobiologia*, 662(1): 189–195.
- Espinosa-Rodríguez C A, Sarma S S S, Nandini S. 2012. Interactions between the Rotifer *Euchlanis dilatata* and the cladocerans *Alona glabra* and *Macrothrix triserialis* in relation to diet type. *Limnologica*, 42(1): 50–55.
- Gilbert J J. 1988. Susceptibilities of ten Rotifer species to interference from *Daphnia pulex*. *Ecology*, 69(1): 1826–1838.
- Gilbert J J. 2012. Effects of an Ostracod (*Cypris pubera*) on the Rotifer *Keratella tropica*: Predation and Reduced Spine Development. *International Review of Hydrobiology*, 97(5): 445–453.
- Huang L, Xi Y L. 2014. Competitive outcome between the Rotifer *Brachionus calyciflorus* and the cladoceran *Moina macrocopa* depends on algal density but not temperature. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 50(2): 109–119.
- Iyer N, Rao T R. 1993. Effect of the epizoic Rotifer *Brachionus rubensoni* on the population growth of three cladoceran species. *Hydrobiologia*, 255/256(1): 325–332.
- Jaramillo-Londoño J C, Pintocoelho R M. 2010. Interaction between *Hexarthra intermedia* (Rotifera) and *Bosmina longirostris* (Cladocera): a case of opportunistic nutrition or interference competition? *Journal of Plankton Research*, 32(6): 961–966.
- Liperovskaya E S. 1948. On the feeding of freshwater Ostracods. *Zoology*, 27(2): 125–136.
- Monakov A V. 2003. Feeding of Freshwater Invertebrates. Ghent, Belgium: Kenobi Productions.
- Nagata T, Hanazato T. 2006. Different predation impacts of two cyclopoid species on a small-sized zooplankton community: an experimental analysis with mesocosms. *Hydrobiologia*, 556(1): 233–242.
- Nandini S, Sarma S S S. 2007. Effect of algal and animal diets on life history of the freshwater copepod *Eucyclops serrulatus* (Fischer, 1851). *Aquatic Ecology*, 41(1): 75–84.
- Nini S, Sarma S S S, Hurtado-Bocanegra M D. 2002. Effect of four species of cladocerans (Crustacea) on the population growth of *Brachionus patulus* (Rotifera). *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 30(2/3): 101–107.
- Obertegger U, Borsato A, Flaim G. 2010. Rotifer-crustacean interactions in a pseudokarstic lake: influence of hydrology. *Aquatic Ecology*, 44(1): 121–130.
- Xi Y L, Hagiwara A. 2007. Competition between the Rotifer *Brachionus calyciflorus* and the Cladoceran *Moina macrocopa* in relation to algal food concentration and initial rotifer population density. *Journal of Freshwater Ecology*, 22(3): 421–427.
- 陈桃英, 王岩, 黄长智, 等. 2004. 蒙古裸腹蚤与褶皱臂尾轮虫的种间关系. *应用生态学报*, 15(7): 1253–1256.