

赤潮藻塔玛亚历山大藻对褶皱臂尾轮虫生活史特征的影响*

谢志浩^{1,2} 肖慧¹ 蔡恒江¹ 王仁君¹ 唐学玺^{1**}

(¹ 中国海洋大学生态学研究室, 山东青岛 266003; ² 宁波大学生命科学与生物工程学院, 浙江宁波 315211)

摘要 采用生命表方法,研究了不同浓度塔玛亚历山大藻对褶皱臂尾轮虫生命周期中各发育阶段历时以及种群增长参数的影响。结果表明:塔玛亚历山大藻对褶皱臂尾轮虫的生长发育有明显影响,使轮虫的繁殖前期和世代时间延长,繁殖期、繁殖后期和平均寿命缩短,产卵量和繁殖率降低。轮虫的净生殖率和内禀增长率均低于对照。不同藻浓度下轮虫能够维持一定的种群增长。

关键词 塔玛亚历山大藻 褶皱臂尾轮虫 生活史 种群特征

文章编号 1001-9332(2007)12-2865-05 中图分类号 Q178.1 文献标识码 A

Effects of red tide microalgae *Alexandrium tamarense* on the life history of rotifer *Brachionus plicatilis*. XIE Zhi-hao^{1,2}, XIAO Hui¹, CAI Heng-jiang¹, WANG Ren-jun¹, TANG Xue-xi¹ (¹Marine Ecology Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; ²College of Life Science and Biotechnology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2007, 18(12): 2865-2869.

Abstract: In this paper, life-table method was used to study the effects of different concentration *Alexandrium tamarense* on the durations of different development stages of *Brachionus plicatilis* and the characters of its population growth. The results showed that *A. tamarense* had significant effects on the growth and development of *B. plicatilis* via prolonging the durations of the rotifer's pre-reproduction and generation succession, shortening the durations of its reproduction and post-reproduction and its mean lifespan, and reducing its laying eggs and fecundity. The net reproduction rate and intrinsic increasing rate of *B. plicatilis* decreased significantly, in comparison with those of the control. *B. plicatilis* could maintain definite population increase at the presence of different concentration *A. tamarense*.

Key words: *Alexandrium tamarense*; *Brachionus plicatilis*; life history; population characters.

1 引言

赤潮是某些海洋浮游生物过度增殖的结果,现已成为全球性的海洋生态灾害。近年来,随着养殖环境的恶化和富营养化水平的提高,我国近岸海域赤潮发生的频率、波及范围和危害程度呈上升趋势。其原因种主要有夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)、东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、亚历山大藻(*Alexandrium* sp.)、赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)等^[32]。赤潮对海洋生态

环境、渔业资源和海水养殖业直接或间接地造成了巨大的负面影响。浮游动物作为浮游植物和渔业生产的中间连接环节,在海洋生态系统中扮演着重要的角色。它们直接捕食藻类等浮游植物,影响着海洋初级生产力,同时又为较高营养级消费者提供食物。因此,引发赤潮的赤潮藻势必会对浮游动物造成影响,从而影响到较高级消费者,甚至整个生态系统。王丽平等^[24-25]、邢小丽等^[30]报道了有害赤潮藻对浮游动物存活、繁殖和摄食的影响。已有不少研究^[8-9]证实赤潮藻特别是有毒赤潮藻能够降低浮游动物的摄食率、产卵率和卵的孵化率,影响其生长发育,甚至导致麻痹和死亡。褶皱臂尾轮虫(*Brachionus plicatilis*)是一种微型浮游动物,是海水养殖中多种鱼类、甲壳类极为重要的生物饵料^[4]。本文以褶皱

* 国家自然科学基金项目(30270258, 40506028)和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(03BS120)。

** 通讯作者。E-mail: tangxx@ouc.edu.cn

2006-10-27 收稿 2007-08-21 接受。

臂尾轮虫为实验对象,研究了塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)在不同浓度下对其发育历期和实验种群增长参数的影响,为分析赤潮对海洋生态系统的影响和作用机制提供有价值的参考资料。

2 材料和方法

2.1 供试材料

供试褶皱臂尾轮虫由山东省海水养殖研究所提供,为实验室常年培养种,以小球藻(*Chlorella* sp.)投喂。实验所用的塔玛亚历山大藻取自中国海洋大学微藻培养室,不产麻痹性贝毒(paralytic shellfish poisoning, PSP)。取指数生长期的微藻藻液接种在250 ml培养液中,培养液采用f/2营养盐配方,培养条件为温度(20±1)℃,光照强度3 000 lx,光暗周期12L:12D。实验用海水为煮沸后的0.45 μm滤膜海水,盐度通过加蒸馏水调节至30±1,用ATAGO手提式盐度计测定。HI 991000型pH计测定水体pH值。

2.2 培养方法和条件

取指数生长期的塔玛亚历山大藻,鲁哥氏液固定,血球计数板计数并计算细胞浓度。在预实验的基础上实验共设5个浓度梯度,用煮沸后的0.45 μm滤膜海水稀释,藻细胞浓度分别为2.5、5.0、10.0、15.0、20.0($\times 10^4$ cells·ml⁻¹);以 2.0×10^6 cells·ml⁻¹的小球藻作为对照[共设0.5、1.0、2.0、5.0、8.0($\times 10^6$ cells·ml⁻¹)5个浓度梯度,以内禀增长率 r_m 和净生殖率 R_0 最高的 2.0×10^6 cells·ml⁻¹作为对照]。实验中pH值为8.0±0.2。实验在特制的24孔塑料培养板中进行,正式实验前,将轮虫放于相应浓度的藻液中预培养48 h,吸取刚出生4 h以内的幼体,单个培养于每孔中,加入1 ml测试藻液。每浓度组使用12个轮虫幼体。实验在光照培养箱中进行,培养条件同藻细胞。实验时每隔4~6 h观察、记录轮虫的产卵数、孵化出的幼体数及母体的存活

数。移走新孵出的幼体,并轻轻吹动沉于培养孔底部的藻细胞。每隔24 h更换1次培养液,以保证较为准确的藻浓度,实验至全部个体死亡时为止。

2.3 观测参数与计算方法

生活史参数:胚胎发育时间,指从卵的产出到幼体孵出所经历的时间;繁殖前期,指从幼体孵出到其产出第1枚卵所经历的时间;繁殖期,指从第1枚卵产出到最后一枚卵产出所经历的时间;繁殖后期,指轮虫产出最后一枚卵到其死亡所经历的时间;平均寿命,为繁殖前期、繁殖期和繁殖后期之和。计算方法参照Walz^[23]、Korstad^[14]和Schmid-Araya^[18]的方法。种群增长参数:特定年龄存活率(I_x)为X年龄组开始时存活个体的百分数;特定年龄繁殖率(m_x)为X年龄组平均每个个体所产的雌性后代数;净生殖率(R_0)为种群经过一个世代后的净增长率;内禀增长率(r_m)为种群在特定实验条件下的最大增长率;周限增长率(λ)为一段时间内种群的增长倍数。计算方法参照Birch^[3]和Sarma等^[17]的方法。实际观察值均采用平均值±标准误表示。用SPSS 13.0统计软件包处理统计数据。

3 结果与分析

3.1 不同藻浓度下轮虫主要发育阶段历时和产卵量

由表1可以看出,塔玛亚历山大藻对轮虫的繁殖前期、繁殖期和平均寿命有显著的影响。各浓度组的繁殖前期均较对照组明显延长($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),而繁殖期和平均寿命则显著缩短($P < 0.01$),繁殖后期除 20.0×10^4 cells·ml⁻¹组外,也较对照组明显缩短($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。塔玛亚历山大藻对轮虫的胚胎发育时间无显著影响($P > 0.05$)。除15.0和 20.0×10^4 cells·ml⁻¹组外,其他浓度组轮虫的产卵量明显下降,与对照组存在极显著差异($P < 0.01$)。

表1 不同藻浓度下褶皱臂尾轮虫各发育阶段历时、平均寿命与产卵量

Tab.1 Duration of developmental stages, mean lifespan and number of eggs of *B. plicatilis* at different algal concentrations (mean ± SD)

浓度 Concentration ($\times 10^4$ cells·ml ⁻¹)	胚胎发育 Embryonic development (h)	繁殖前期 Pre-reproductive period (h)	繁殖期 Reproductive period (h)	繁殖后期 Post-reproductive period (h)	平均寿命 Mean lifespan (h)	产卵量 Number of eggs (eggs·ind ⁻¹)
对照 CK	13.58 ± 3.23	35.82 ± 5.47a	180.43 ± 28.35a	62.49 ± 17.32a	278.74 ± 46.12a	21.90 ± 5.84a
2.5	12.81 ± 2.19	48.14 ± 1.77b	61.60 ± 22.12b	26.75 ± 13.90b	136.49 ± 15.73b	9.73 ± 3.88b
5.0	13.63 ± 1.52	43.93 ± 2.72b	71.36 ± 17.27b	24.53 ± 12.68b	139.82 ± 9.86b	10.10 ± 3.94b
10.0	13.57 ± 1.70	42.62 ± 1.55b	73.77 ± 14.02b	28.55 ± 9.25b	144.97 ± 10.58b	10.75 ± 1.46b
15.0	14.67 ± 3.84	48.81 ± 3.26b	84.62 ± 26.97b	32.80 ± 4.84b	166.23 ± 17.76b	16.43 ± 4.43
20.0	16.67 ± 4.82	49.11 ± 5.64b	82.79 ± 18.52b	39.38 ± 24.13	171.28 ± 21.89b	15.80 ± 3.76

同列数据不同字母表示处理间差异显著($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$)。Data with different letters at the same row were statistically different at 0.01 or 0.05 levels.下同 The same below.

3.2 不同藻浓度对轮虫存活率和繁殖率的影响

由图 1 可以看出,不同浓度组轮虫存活率开始下降的时间有所不同。 5.0×10^4 和 10.0×10^4 cells · ml⁻¹ 组在第 48 小时, 2.5×10^4 、 15.0×10^4 和 20.0×10^4 cells · ml⁻¹ 组在第 72 小时,均远远早于对照组的第 192 小时。轮虫的存活时间以 20.0×10^4 cells · ml⁻¹ 组最短,仅 192 h; 5.0×10^4 和 10.0×10^4 cells · ml⁻¹ 组为 216 h, 2.5×10^4 和 15.0×10^4 cells · ml⁻¹ 组为 240 h,均明显低于对照组的 360 h。在第 72 小时,各浓度组的轮虫繁殖率均达到一峰值,以高浓度组为高,低浓度组的峰值较低,呈现出一定的浓度效应,但均低于对照组的 7.5。72 h 后,各浓度组的繁殖率总体呈下降趋势。

3.3 不同藻浓度下轮虫的主要种群增长参数

不同藻浓度下,轮虫的主要种群增长参数见表 2。轮虫种群的净生殖率(R_0)在一定藻浓度范围内随藻浓度升高而增大,于 15.0×10^4 cells · ml⁻¹ 时达到最大,为 14.07,远高于 2.5×10^4 cells · ml⁻¹ 组的 7.58。但当藻浓度高于 15.0×10^4 cells · ml⁻¹ 时, R_0 又有减小趋势。各藻浓度下的 R_0 值均显著低于对照组 ($P < 0.01$)。世代时间(T)在藻浓度为 15.0×10^4

表 2 不同藻浓度下褶皱臂尾轮虫的种群增长参数

Tab.2 Parameters of population growth of *B. plicatilis* at different algal concentrations (mean ± SD)

浓度 Concentration ($\times 10^4$ cells · ml ⁻¹)	净生殖率 Net reproductive rate (ind ⁻¹)	世代时间 Generation time (d)	周限增长率 Finite rate of increase (d ⁻¹)	内禀增长率 Intrinsic rate of increase (d ⁻¹)
CK	18.53 ± 1.79a	3.28 ± 0.13a	2.4332 ± 0.1553a	0.8892 ± 0.0615a
2.5	7.58 ± 0.14b	3.81 ± 0.17b	1.7015 ± 0.1534b	0.5315 ± 0.0817b
5.0	7.99 ± 0.15bc	3.44 ± 0.18ac	1.8305 ± 0.2103bc	0.6046 ± 0.0769bc
10.0	9.92 ± 0.17cd	3.38 ± 0.22ac	1.9721 ± 0.1426bc	0.6791 ± 0.1208cd
15.0	14.07 ± 1.79e	4.35 ± 0.23d	1.8368 ± 0.1217bc	0.6080 ± 0.0421be
20.0	10.68 ± 1.31f	3.31 ± 0.20ce	2.0460 ± 0.1346cd	0.7159 ± 0.0782f

cells · ml⁻¹ 时最大,其它浓度组随藻浓度的升高而缩短,各浓度组的世代时间均高于对照组,其中 2.0×10^4 和 15.0×10^4 cells · ml⁻¹ 组与对照组存在极显著差异 ($P < 0.01$)。塔玛亚历山大藻对轮虫种群的周限增长率和内禀增长率有显著影响,各浓度组的周限增长率和内禀增长率均与对照组差异显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

4 讨 论

4.1 塔玛亚历山大藻对褶皱臂尾轮虫发育和种群增长的影响

关于轮虫的发育历期和种群增长参数的研究国内外报道较多^[5,15-18,21,28],但主要集中在食物种类、饵料浓度和污染因子(如除草剂、杀虫剂和重金属等)对其影响上,有关赤潮微藻对其影响目前的报道很少。Awaiss 等^[2]、席貽龙等^[29]发现,温度、食物的种类和浓度、培养液 pH 值等能够显著影响轮虫的胚胎发育时间和生殖前期历时。本实验结果显示,与对照组相比,塔玛亚历山大藻对褶皱臂尾轮虫各发育阶段历时、平均寿命和每雌产卵量有显著的影响 ($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$),而对胚胎发育时间无明显影响(表 1)。Pourriot^[15]认为,种群的增殖速率不仅与其净生殖率有关,而且与胚胎发育速率、生命的早期阶段历时以及存活率等有关。在轮虫孤雌生殖的过程中,在食物充足的条件下,轮虫的繁殖前期历时和胚胎发育时间比轮虫净生殖率对轮虫种群增长速率的影响更大。Xi 等^[28]在研究甲基托布津对萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)生殖的影响时发现,繁殖前期的延长可能是导致轮虫种群增长率降低的主要原因之一。本实验中不同浓度的藻液延缓了轮虫的生长发育,使轮虫的繁殖前期延长,最终可能影响了轮虫的种群增长。 R_0 均低于对照组,分别是对照组的 0.41~0.76 倍,各浓度组的世代时

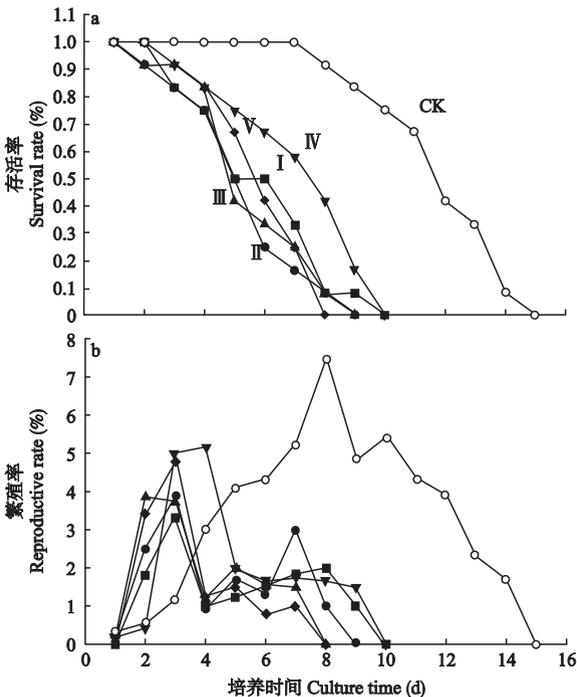


图 1 不同藻浓度下褶皱臂尾轮虫种群的存活率(a)和繁殖率(b)

Fig.1 Survival (a) and reproductive rates (b) of *B. plicatilis* population at different algal concentrations.

I : 2.5×10^4 cells · ml⁻¹; II : 5×10^4 cells · ml⁻¹; III : 10×10^4 cells · ml⁻¹; IV : 15×10^4 cells · ml⁻¹; V : 20×10^4 cells · ml⁻¹; CK : 对照 Control.

间 T 较对照组有所延长,而周限增长率(λ)和内禀增长率(r_m)值均低于对照组。Xi 等^[28]、Rao 等^[16]和 Day 等^[7]认为,轮虫种群 r_m 是监测低浓度水体污染物毒性的一个敏感指标,但是 Janssen 等^[12]发现, r_m 值并不总是最敏感的指标, R_0 有时具有更低的 LO-EC 值。本实验中的 R_0 和 r_m 反映了赤潮微藻对轮虫种群增长的影响,实际运用中应根据所监测的藻类和受试生物种类等不同情况来具体确定种群增长参数中某一个或几个指标作为影响种群增长的最佳指标。

4.2 塔玛亚历山大藻影响褶皱臂尾轮虫发育和种群增长的原因分析

目前的研究表明,甲藻亚历山大藻对浮游动物的影响表现出较大的差异和种的特异性。浮游动物能够摄食甲藻而不产生致死作用^[19, 26-27]。Adams 等^[1]证实,植食性浮游动物能积极地摄食产 PSP 的有毒甲藻;Dutz^[9]发现,改变亚历山大藻(*Alexandrium lusitanicum*)的藻细胞浓度并不能显著地影响桡足类 *Acartia clausi* 的产卵;有些浮游动物对亚历山大藻保持着较高的摄食率并没有显现出明显的生理上的影响^[10, 20]。相反,也有不少研究证实亚历山大藻能够降低浮游动物的摄食率、产卵率和卵的孵化率,甚至导致麻痹和死亡^[8-9]。

颜天等^[31]初步研究了赤潮异弯藻的毒性及其来源,发现藻液、藻细胞悬浮液和藻细胞碎片对卤虫(*Artemia salina*)的活力有显著抑制作用,推断毒性物质来源于藻细胞表面。研究表明,赤潮异弯藻对褶皱臂尾轮虫的存活或生长繁殖有不利影响^[22]。王丽平等^[24]发现,塔玛亚历山大藻(ATHK)藻细胞对褶皱臂尾轮虫的生殖和种群增长有明显的影 响,导致轮虫繁殖力和种群数量的下降,并证实藻细胞表面产生的非 PSP 的未知毒素对轮虫种群数量没有影响,也即轮虫对这种毒素不敏感。Kim 等^[13]研究发现,甲藻(*Heterocapsa circularisquama*)对褶皱臂尾轮虫具有致死作用,并呈现一定的浓度效应,据此提出这种毒害作用是由于藻细胞和轮虫之间发生频繁碰撞而影响了轮虫体内某些生理功能,并刺激了位于藻细胞表面的毒素物质的释放。据报道,轮虫所摄食饲料的最大直径为 22~30 μm ,以 15 μm 以下为理想^[22]。本实验所用藻细胞近球形,ESD(equivalent spherical diameter)为 17~35 μm ,实验中观察到培养于藻细胞悬浮液中的轮虫只能少量摄食藻细胞,其身体基本呈透明状。另外,食物中如果缺乏必要的多不饱和脂肪酸就会影响浮游动物的生长、产卵和

卵的发育,而赤潮爆发时往往是某些单一藻种占绝对优势,势必会造成浮游动物营养成分单一,对浮游动物的生命活动可能产生影响^[11, 25]。本实验所用亚历山大藻株虽然不产 PSP,但可能在与轮虫的频繁碰撞中释放了对轮虫有害的物质,轮虫吞噬后影响了消化或者由于体内需要降解有害物质而消耗能量使得其它方面的可利用能量减少^[7],对轮虫的生理机能造成了影响。这些影响因素的作用最终导致了轮虫平均寿命的缩短和世代时间的延长,产卵量、净生殖率和内禀增长率下降。这也可能是造成轮虫种群增长率降低的主要原因,具体的毒性作用机制有待于进一步研究。

本实验结果表明,不同藻浓度下褶皱臂尾轮虫维持了一定的种群增长,同时,赤潮藻对轮虫的种群增长亦产生了不利影响,使其净生殖率和内禀增长率下降,种群增长率降低。研究表明,浮游动物种群对有害赤潮藻的长期性暴露和进化抵抗力是决定有害赤潮藻是否对其产生危害和不利影响的重要因素^[6]。浮游动物的摄食和数量变化将直接影响到浮游植物的生长,与有害赤潮的发生及其生态效应存在着密切的关系;同时,有害赤潮藻对浮游动物的摄食、繁殖和生长也产生了直接或间接的影响,从而造成了浮游生物在食物链中物质和能量传递、流动的障碍。因此,有害赤潮藻和浮游动物关系的进一步研究对于我们了解其对海洋生态系统的影响和作用机制具有重要意义。

参考文献

- [1] Adams JA, Seaton DD, Buchanan JB, et al. 1968. Biological observations associated with the toxic phytoplankton bloom of the East Coast. *Nature*, **220**: 24-25
- [2] Awaisi A, Kestemont P. 1992. An investigation into the mass production of the freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas. 2. Influence of temperature on the population dynamics. *Aquaculture*, **105**: 337-344
- [3] Birch LC. 1948. The intrinsic rate of natural increase of an insect population. *Journal of Animal Ecology*, **17** (1): 15-26
- [4] Chen M-Y (陈明耀). 1995. The Culture for Living Food. Beijing: China Agricultural Press (in Chinese)
- [5] Chu Z-X (储昭霞), Xi Y-L (席贻龙), Xu X-P (徐晓平), et al. 2005. Effects of glyphosate on life history characteristics of freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **16**(6): 1142-1145 (in Chinese)
- [6] Colin SP, Dam HG. 2002. Latitudinal differentiation in the effects of the toxic dinoflagellate *Alexandrium* spp. on the feeding and reproduction of populations of the copepod *Acartia hudsonica*. *Harmful Algae*, **1**: 113-125
- [7] Day K, Kaushik NK. 1987. An assessment of the chro-

- nic toxicity of the synthetic pyrethroid, fenvalerate, to *Daphnia galeatmendocina*, using life table. *Environmental Pollution*, **13**: 13–26
- [8] Delgado M, Alcaraz M. 1999. Interactions between red tide microalgae and herbivorous zooplankton: The noxious effects of *Gyrodinium corsicum* (Dinophyceae) on *Acartia grani* (Copepoda: Calanoida). *Journal of Plankton Research*, **21**: 2361–2371
- [9] Dutz J. 1998. Repression of fecundity in the meritic copepod *Acartia clausi* exposed to the toxic dinoflagellate *Alexandrium lusitanicum*: Relationship between feeding and egg production. *Marine Ecology – Progress Series*, **175**: 97–107
- [10] Frangópulos M, Guisande C, Maneiro I, et al. 2000. Short-term and long-term effects of the toxic dinoflagellate *Alexandrium minimum* on the copepod *Acartia clausi*. *Marine Ecology – Progress Series*, **203**: 161–169
- [11] Ianora A, Poulet SA, Miralto A. 1995. A comparative study of the inhibitory effect of diatoms on the reproductive biology of the copepod *Temora stylifera*. *Marine Biology*, **121**: 533–539
- [12] Janssen CR, Persoone G, Snell TW. 1994. Cyst-based toxicity test. VIII. Short-chronic toxicity test with the freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus*. *Aquatic Toxicology*, **28**: 243–258
- [13] Kim D, Sato Y, Oda T, et al. 2000. Specific toxic effect of dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* on the rotifer *Brachionus plicatilis*. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, **64**(12): 2719–2722
- [14] Korstad J. 1989. Life history characteristics of *Brachionus plicatilis* (Rotifera) fed different algae. *Hydrobiologia*, **186/187**: 43–50
- [15] Pourriot R. 1986. Les rotifers: Biology// Barnabé G, ed. *Aquaculture Vol. 1. Technique et Documentation*. Lavoisier, Paris: Tec. & Doc: 201–221
- [16] Rao TR, Sarma SSS. 1986. Demographic parameters of *Brachionus patulus* Muller (Rotifera) exposed to sublethal DDT concentrations at low and high food levels. *Hydrobiologia*, **139**: 193–200
- [17] Sarma SSS, Nandini S. 2001. Life table demography and population growth of *Brachionus variabilis* Hempel 1896 in relation to *Chlorella vulgaris* densities. *Hydrobiologia*, **446/447**: 75–83
- [18] Schmid-Araya J. 1991. The effect of food concentration on the life histories of *Brachionus plicatilis* (O. F. M.) and *Enicentrum linnhei* Scott. *Archiv für Hydrobiologie*, **121**: 87–102
- [19] Sun J(孙 军), Wang X-D(王小冬), Song S-Q(宋书群). 2007. Selective feeding of *Calanus sinicus* on harmful algal blooms species in East China Sea in spring. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **18**(1): 151–157 (in Chinese)
- [20] Teegarden GJ, Cembella AD. 1996. Grazing of toxic dinoflagellates *Alexandrium* spp. by adult copepods of coastal Maine: Implications for the fate of paralytic shellfish toxins in marine food webs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **196**: 145–176
- [21] Teresa RP, Sarma SSS, Nandini S. 2004. Effects of mercury on the life table demography of the rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas (Rotifera). *Ecotoxicology*, **13**: 535–544
- [22] Turner JT, Tester PA, Hansen PJ. 1998. Interactions between toxic marine phytoplankton and metazoan and protistan grazers// Anderson DM, Cembella AD, Hallegraeff GM, eds. *Physiological Ecology of Harmful Algal Blooms*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag: 453–474
- [23] Walz N. 1983. Individual culture and experimental population dynamics of *Keratella cochlearis* (Rotatoria). *Hydrobiologia*, **107**: 35–45
- [24] Wang L-P(王丽平), Yan T(颜 天), Tan Z-J(谭志军), et al. 2003. Effects of *Alexandrium tamarense* and *Prorocentrum donghaiense* on rotifer *Brachionus plicatilis* population. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(7): 1151–1155 (in Chinese)
- [25] Wang L-P(王丽平), Yan T(颜 天), Tan Z-J(谭志军), et al. 2003. Research advance in effects of harmful algal bloom species on zooplankton. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(7): 1191–1196 (in Chinese)
- [26] Wang Y(王 岩), Zhang H-Y(张鸿雁). 1999. Ingestion of copepods on *Prorocentrum micans* in seawater experimental enclosures. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **10**(4): 489–491 (in Chinese)
- [27] Watras CJ, Garcon VC, Olson RJ, et al. 1985. The effect of zooplankton grazing on estuarine blooms of the toxic dinoflagellate *Gonyaulax tamarensis*. *Journal of Plankton Research*, **6**: 891–908
- [28] Xi YL, Hu HY. 2003. Effect of thiophanate-methyl on the reproduction and survival of the freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **71**: 722–728
- [29] Xi Y-L(席怡龙), Huang X-F(黄祥飞), Wang B-Q(汪本勤). 2000. The effect of environmental factors on the population dynamics of *Brachionus calyciflorus*. *Journal of Anhui Normal University* (Natural Sciences) (安徽师范大学学报·自然科学版), **23**(4): 334–338 (in Chinese)
- [30] Xing X-L(邢小丽), Gao Y-H(高亚辉), Lin R-C(林荣澄). 2003. Advances of research on effects of red tide algae on the feeding, egg production and hatching of copepods. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (台湾海峡), **22**(3): 369–376 (in Chinese)
- [31] Yan T(颜 天), Zhou M-J(周名江), Fu M(傅萌), et al. 2003. The preliminary study on toxicity of *Heterosigma akashiwo* and the toxicity source. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **34**(1): 50–55 (in Chinese)
- [32] Zhou M-J(周名江), Zhu M-Y(朱明远), Zhang J(张 经). 2001. Status of harmful algal blooms and related research activities in China. *Chinese Bulletin of Life Science* (生命科学), **13**(2): 54–59 (in Chinese)

作者简介 谢志浩 男, 1968 年生, 博士, 副教授. 主要从事生态毒理学研究, 发表论文 20 余篇. E-mail: xiezhihao@nbu.edu.cn

责任编辑 肖 红