

Pb²⁺ 浓度和藻类食物密度对多刺裸腹蚤生命表统计学参数的影响

刘 宁, 席贻龙*, 沈 鹏, 杨 胜, 宋 鑫, 孙天宝

(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; 安徽芜湖 241000)

摘要: 采用 48 h 急性毒性试验研究了 Pb²⁺ 对多刺裸腹蚤 (*Moina macrocopa*) 的 48 h-LC₅₀ 值, 采用生命表试验方法在 0.5 × 10⁶、1.0 × 10⁶、2.0 × 10⁶ 个细胞/mL 的斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 密度下研究了浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/L 的 Pb²⁺ 对多刺裸腹蚤生命表统计学参数的影响。结果表明, Pb²⁺ 对多刺裸腹蚤 48 h-LC₅₀ 值为 10.5 mg/L。与各食物密度下的对照组相比, 除了 0.5 × 10⁶、1.0 × 10⁶ 个细胞/mL 下 0.2 mg/L 的 Pb²⁺ 显著延长了多刺裸腹蚤的生命期望, 0.5 × 10⁶ 个细胞/mL 的食物密度下 0.4 mg/L 的 Pb²⁺ 显著提高了多刺裸腹蚤的净生殖率, 0.4—0.8 mg/L 的 Pb²⁺ 显著提高了种群内禀增长率外, 较高浓度的 Pb²⁺ 显著缩短了多刺裸腹蚤的生命期望, 降低了净生殖率、总生殖率和种群内禀增长率; 且随着食物密度的升高, 使净生殖率和总生殖率显著降低的 Pb²⁺ 浓度阈值呈降低的趋势, 但使世代时间显著缩短的 Pb²⁺ 浓度阈值则呈升高的趋势。Pb²⁺ 浓度、食物密度以及它们间的交互作用对多刺裸腹蚤的各主要生命表统计学参数均有显著的影响 ($P < 0.05$)。0.5 × 10⁶、1.0 × 10⁶ cells/mL 食物密度下, Pb²⁺ 浓度与多刺裸腹蚤的各主要生命表统计学参数间均有显著的剂量-效应关系; 2.0 × 10⁶ cells/mL 食物密度下, Pb²⁺ 浓度与多刺裸腹蚤的生命期望、总生殖率和净生殖率间均有显著的剂量-效应关系。多刺裸腹蚤的生命期望、净生殖率和内禀增长率对 Pb²⁺ 污染的敏感性因食物密度的不同而存在着差异。

关键词: 食物密度; Pb²⁺ 浓度; 多刺裸腹蚤; 48h 半数致死浓度; 生命表统计学参数

Effects of lead concentration and algal density on life table demography of *Moina macrocopa*

LIU Ning, XI Yilong*, SHEN Peng, YANG Sheng, SONG Xin, SUN Tianbao

Provincial Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui, College of Life Sciences, Anhui Normal University; Wuhu 241000, China

Abstract: The 48 h-LC₅₀ of Pb²⁺ to *M. macrocopa* was determined by an acute toxicity test, and the effects of different concentrations (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 mg/L) of Pb²⁺ at three densities (0.5 × 10⁶, 1.0 × 10⁶, 2.0 × 10⁶ cells/mL) of algae *Scenedesmus obliquus* on life table demography of *M. macrocopa* was studied by a life table experiment. The result showed that the 48 h-LC₅₀ of Pb²⁺ to *M. macrocopa* was 10.5 mg/L. Compared with the controls at every algal concentrations, except that Pb²⁺ at 0.2 mg/L prolonged significantly the life expectancy at birth of *M. macrocopa* cultured at the algal densities of 0.5 × 10⁶ and 1.0 × 10⁶ cells/mL, and Pb²⁺ at 0.4 mg/L increased the net reproductive rate and Pb²⁺ at 0.4—0.8 mg/L increased the intrinsic rate of population growth of the animals cultured at the algal density of 0.5 × 10⁶ cells/mL, Pb²⁺ at higher concentrations shortened the life expectancy at birth, decreased the gross reproductive rate, the net reproductive rate and the intrinsic rate of population growth. With the rise of the algal density, the threshold of Pb²⁺ concentration decreasing the gross reproductive rate and the net reproductive rate had a decline tendency, but the reverse was also true for that shortening the generation time. Pb²⁺ concentration, algal density, and their interactions had

基金项目: 国家自然科学基金(30470323); 教育部科学技术研究重点项目基金(051286); 安徽省优秀青年基金(08040106904); 安徽省教育厅自然科学基金重点项目(2003kj032zd); 重要生物资源的保护和利用研究安徽省重点实验室专项基金

收稿日期: 2009-08-16; 修订日期: 2009-11-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylx1965@yahoo.com.cn

significant effects on all the life table demography of *M. macrocopa* ($P < 0.05$). When the algal densities were 0.5×10^6 and 1.0×10^6 cells/mL, there were significant dose-effect relationships between Pb^{2+} concentration and each of all the life table demography. When the algal density was 2.0×10^6 cells/mL, there were dose-effect relationships between Pb^{2+} concentration and the life expectancy at birth, the gross reproductive rate as well as the net reproductive rate. The life expectancy at birth, the net reproductive rate and the intrinsic rate of population increase of *M. macrocopa* had different sensitivities to Pb^{2+} pollution with different food densities.

Key Words: algae density; Pb^{2+} concentration; *Moina macrocopa*; 48 h-LC₅₀; life table demography

随着当今工业生产的快速发展,工业废弃物中的重金属等无机物质逐渐增多^[1]。这类废弃物不仅污染土壤,而且对水环境造成了严重的危害,进而威胁着水生生物的生存与繁殖。无机铅及其化合物化学性质十分稳定,当这类污染物进入水体后在水体中积累,从而对水环境造成污染,最终对水生生物产生毒害作用。虽然铅常被认为是一种毒性较小的重金属,对弹尾目昆虫、纤毛虫和蚤等淡水浮游动物有较高的 LC_{50} 值和 EC_{50} 值^[1-3];但广泛存在于工业废水中的铅对水环境中的枝角类、桡足类等浮游动物的生长和繁殖有重要影响^[3]。

枝角类是生活在水生态系统中的一类甲壳动物,在生物量方面占据优势^[4],是水生食物链中不可缺少的组成成分^[5]。枝角类的密度和物种多样性一般受生物因素(如食物的可得性、鱼类和无脊椎动物等的捕食)和非生物因素(如温度、pH 值、溶解氧、氨氮、污染物种类和浓度等)的影响^[4]。由于枝角类具有繁殖快、生活周期短、材料来源广泛、室内容易培养等优点,已被广泛应用于毒性试验^[6];枝角类的生命表统计学参数常被用来评价水质,包括重金属污染的生物毒性^[7]。已有研究资料表明,在一定食物密度范围内,枝角类抵抗毒物的能力随着食物密度的增加而提高;而当食物密度超过一定范围时,食物(藻类)会增加毒物对枝角类的毒性作用^[1,8-16]。

多刺裸腹蚤(*M. macrocopa*)是水体中较常见的枝角类动物。由于多刺裸腹蚤对许多毒物(特别是重金属)的敏感性比鱼强,当水体受污染时,常导致多刺裸腹蚤大量死亡,使鱼类失去合适饵料,从而影响渔业生产。因此,在制定渔业水质标准和工业废水排放标准时,以多刺裸腹蚤为受试生物毒性试验也应该作为一个重要的依据^[6]。因此,本研究以斜生栅藻(*S. obliquus*)为多刺裸腹蚤的食物,研究不同密度下 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的生命表统计学参数的影响,旨在揭示污染物与食物可得性之间的关系。

1 材料与方法

1.1 多刺裸腹蚤的来源与培养

实验用多刺裸腹蚤系日本 Nagasaki University 馈赠,实验室内在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、自然光照条件下进行克隆培养,所用的培养液为曝气自来水,饵料为由 HB-4 培养基培养的、处于指数增长期的斜生栅藻,离心浓缩后经显微计数使用^[17]。实验前,对多刺裸腹蚤进行预培养。预培养过程中,每天投喂密度分别为 0.5×10^6 、 1.0×10^6 、 2.0×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻,并半数更换多刺裸腹蚤培养液。

1.2 测试液的配置

实验所用硝酸铅购于西安化学试剂厂,纯度 $\geq 99.0\%$ 。测试液按母液稀释法配置,试验前用蒸馏水配制 1.4 g/L 的原液,再用蒸馏水稀释成 10 mg/L 的母液,于 4°C 冰箱中备用。母液 3 d 配制 1 次;实验时用曝气的自来水将其配制成所需浓度的测试液。

1.3 急性毒性实验

根据水生生物毒性试验方法^[6],预实验时先设置 100.0、56.0、32.0、18.0、10.0 mg/L 共 5 个 Pb^{2+} 浓度组,另设一个空白对照组,每组设置 3 个重复。根据水生生物毒性检测国家标准(GB/T 16310.1-1996),随机挑取 10 个龄长小于 12 h 的健康多刺裸腹蚤幼体放入容积为 50 mL 的塑料烧杯中,加入 50 mL 测试液。试验在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的光照培养箱内进行,试验期间不投喂饵料,24 h 和 48 h 后观察并记录每个烧杯中多刺裸腹蚤的

死亡数目,以晃动烧杯 15 s 后不运动为急性毒性试验的死亡标准^[6],得出 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的最小全致死浓度为 32.0 mg/L,不致死浓度为空白对照组。在预实验基础上再设置 32.0、28.0、24.0、20.0、16.0、12.0、8.0、4.0 mg/L 共 8 个 Pb^{2+} 浓度组,另设一个空白对照组,每组设置 3 个重复。以同样方法进行实验,用机率单位法求出 Pb^{2+} 的 48 h- LC_{50} 。

1.4 慢性毒性试验

实验设置斜生栅藻的密度为 0.5×10^6 、 1.0×10^6 、 2.0×10^6 个细胞/mL;根据急性毒性实验得出的 LC_{50} 值的 $1/8$ — $1/100$ ^[18],设置 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/L 共 5 个 Pb^{2+} 浓度组;另设一个空白对照组;每组 3 个重复,每个重复放 10 个龄长小于 12 h 的幼体。实验也在容积为 50 mL 的塑料烧杯中进行,每个烧杯中加入含有相应密度的斜生栅藻的 50 mL 测试液。实验开始后,每 24 h 观察并记录每个烧杯中的母体存活数和新生的幼体数,然后将母体转移到装有 25 mL 新鲜测试液和 25 mL 原测试液的干净烧杯中,并移出幼体。实验持续到母体全部死亡为止。

1.5 相关参数的定义和计算

特定年龄存活率(l_x)是指 X 年龄组开始时存活个体的百分数;特定年龄繁殖率(m_x)是指 X 年龄组平均每个个体所产的雌性后代数;净生殖率(R_0)指种群经过一个世代后的净增长率;世代时间(T)指从亲代出生到子代出生所经历的时间;生命期望(e_0)指出生后的个体平均能活多长时间的估计值;总生殖率(G_0)指母体一生中所产的后代数;内禀增长率(r_m)指种群在特定实验条件下的最大增长率, r_m 的精确值是在粗略计算的基础上根据方程 $\sum_{x=0}^n e^{-rx} l_x m_x = 1$,在计算机中运算求得。

1.6 数据的统计与分析

采用 SPSS 13.0 软件和 Excel 对各生命表统计学参数进行统计分析。对慢性毒性试验所得数据进行正态性检验,对符合正态分布的各组数据采用单因素、双因素方差分析和 LSD 多重比较。用生存分析中的 Kaplan-Meier 模型计算各组多刺裸腹蚤的平均存活时间,并分析各测试组和对照组间多刺裸腹蚤的存活时间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 Pb^{2+} 浓度对多刺裸腹蚤的急性毒性

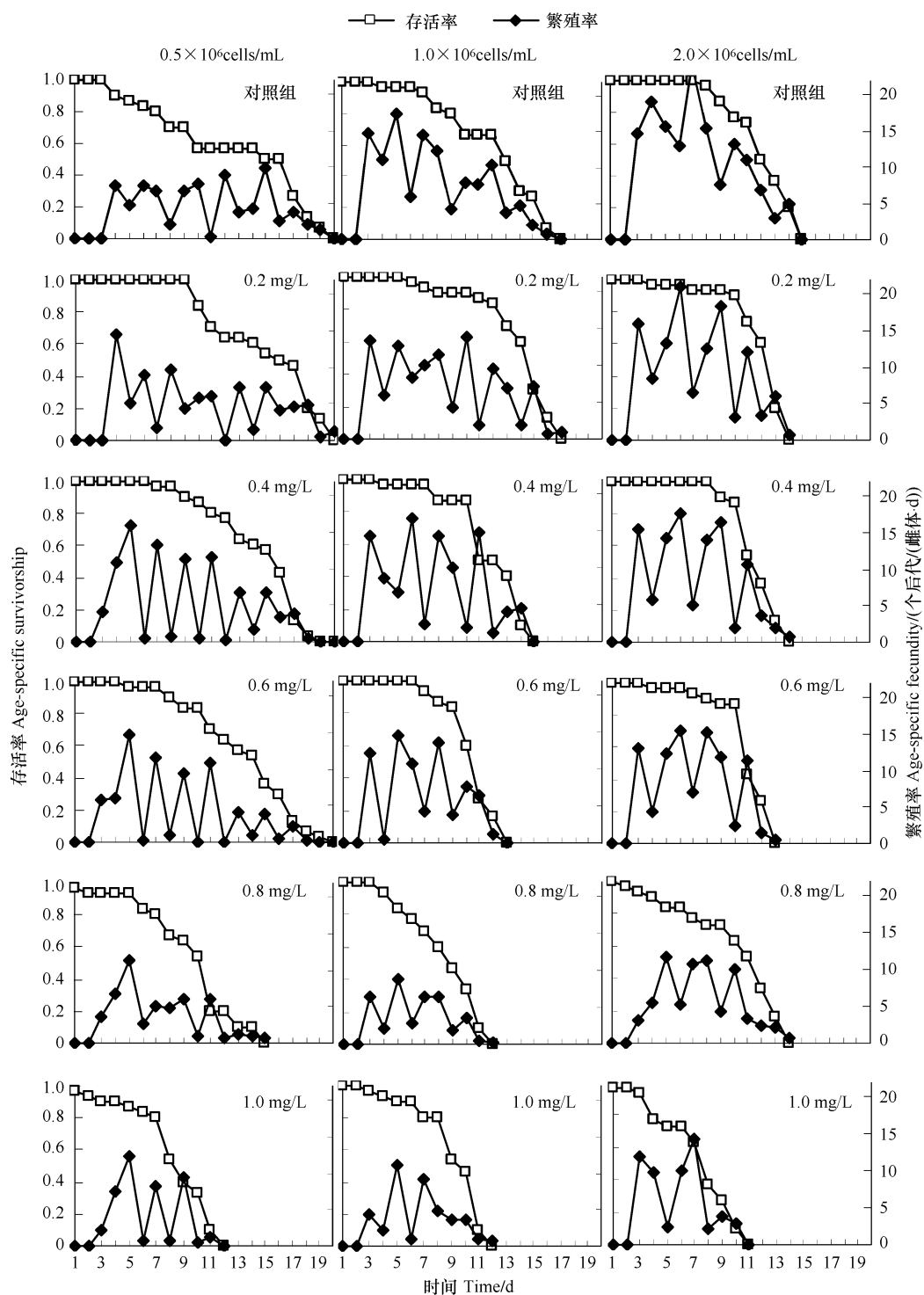
急性毒性实验结果表明,多刺裸腹蚤的死亡率与 Pb^{2+} 浓度具有显著的剂量-效应关系,回归方程为 $y = 0.09 + 0.03x$ ($R^2 = 0.9$, $P < 0.01$)。 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的 48 h- LC_{50} 值是 10.5 mg/L,95% 置信限为 6.1—18.0 mg/L。

2.2 Pb^{2+} 浓度对多刺裸腹蚤的存活和生殖的影响

3 个食物密度下, Pb^{2+} 浓度对多刺裸腹蚤的存活率和繁殖率均有显著的影响($P < 0.05$)。与各食物密度下的对照组相比,在 0.5×10^6 个细胞/mL 食物密度下,0.2、0.4、0.6 mg/L 的 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的存活率没有显著影响,而 0.8、1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 使多刺裸腹蚤的存活率显著下降;0.4 mg/L 的 Pb^{2+} 使多刺裸腹蚤的繁殖率显著升高,但其它浓度的 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的繁殖率没有显著影响。在 1.0×10^6 个细胞/mL 食物密度下,0.2、0.4 mg/L 的 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的存活率和繁殖率没有显著影响,而 0.6、0.8、1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 使多刺裸腹蚤的存活率和繁殖率显著下降。在 2.0×10^6 个细胞/mL 食物密度下,0.2、0.4、0.8 mg/L 的 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的存活率没有显著影响,而 0.6、1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 使多刺裸腹蚤的存活率显著降低;0.2 mg/L 的 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的繁殖率没有显著影响,0.4—1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 使多刺裸腹蚤的繁殖率显著下降(图 1)。

2.3 Pb^{2+} 浓度对多刺裸腹蚤各主要生命表统计学参数的影响

3 个食物密度下, Pb^{2+} 浓度对多刺裸腹蚤各主要生命表统计学参数均有显著的影响($P < 0.05$)。与各食物密度下的对照组相比,0.5 个细胞/mL 食物密度下,0.2 mg/L 的 Pb^{2+} 显著延长了多刺裸腹蚤的生命期望,而 0.8、1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 则相反;0.4—1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 显著降低了多刺裸腹蚤的总生殖率,缩短了其

图1 3个食物密度和不同 Pb^{2+} 浓度下多刺裸腹蚤的存活率和繁殖率Fig. 1 Age-specific survivorship and fecundity of *M. macrocopa* exposed to different concentrations of Pb^{2+} at three algal densities

世代时间;0.4 mg/L 的 Pb^{2+} 显著提高了多刺裸腹蚤的净生殖率,而 0.8、1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 则相反;0.4—0.8 mg/L 的 Pb^{2+} 显著提高了多刺裸腹蚤的内禀增长率。1.0 $\times 10^6$ cells/mL 食物密度下,0.2 mg/L 的 Pb^{2+} 显著延长了多刺裸腹蚤的生命期望,而 0.6—1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 则相反;0.4—1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 显著降低了多刺裸腹蚤的总生殖率和净生殖率,缩短了其世代时间;0.8、1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 显著降低了多刺裸腹蚤的内禀增长率。2.0 $\times 10^6$ cells/mL 食物密度下,0.8、1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 显著缩短了多刺裸腹蚤的生命期望,降低了其内禀增长

率;各浓度的 Pb^{2+} 显著降低了多刺裸腹蚤的总生殖率和净生殖率;1.0 mg/L 的 Pb^{2+} 显著缩短了多刺裸腹蚤的世代时间(表 1)。

表 1 3 个食物密度下不同浓度 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的生命期望(e_0)、总生殖率(G_0)、净生殖率(R_0)、世代时间(T)和内禀增长率(r_m)的影响
Table 1 Effects of different Pb^{2+} concentrations on life expectancy at birth (e_0), gross reproductive rate (G_0), net reproductive rate (R_0), generation time (T) and intrinsic rate of population increase (r_m) of *M. macrocopa* at three algal densities

食物密度/ ($\times 10^6$ 个细胞/mL) Food density	Pb^{2+} 浓度 /(mg/L) Pb^{2+} concentrations	生命期望 e_0 /d Life expectancy at birth	总生殖率 G_0 /个 Gross reproductive rate	净生殖率 R_0 /个 Net reproductive rate	世代时间 T /d Generation time	内禀增长率 r_m /d $^{-1}$ Intrinsic rate of population increase
0.5	0	12.6 $\pm$ 0.7	128.0 $\pm$ 6.7	70.6 $\pm$ 1.7	10.2 $\pm$ 0.2	0.68 $\pm$ 0.05
	0.2	14.7 $\pm$ 1.0 *	121.6 $\pm$ 6.1	79.6 $\pm$ 2.5	9.5 $\pm$ 0.2	0.74 $\pm$ 0.02
	0.4	14.2 $\pm$ 0.8	111.0 $\pm$ 4.7 *	84.3 $\pm$ 4.7 *	8.4 $\pm$ 0.2 *	0.84 $\pm$ 0.01 *
	0.6	13.3 $\pm$ 0.7	88.6 $\pm$ 4.7 *	65.8 $\pm$ 4.8	7.8 $\pm$ 0.3 *	0.82 $\pm$ 0.03 *
	0.8	9.3 $\pm$ 0.4 *	75.2 $\pm$ 6.3 *	43.4 $\pm$ 1.5 *	6.5 $\pm$ 0.2 *	0.76 $\pm$ 0.02 *
	1.0	8.1 $\pm$ 0.4 *	58.5 $\pm$ 2.0 *	38.0 $\pm$ 1.0 *	6.0 $\pm$ 0.2 *	0.73 $\pm$ 0.01
1.0	0	12.1 $\pm$ 0.6	143.3 $\pm$ 5.0	111.4 $\pm$ 4.9	7.4 $\pm$ 0.1	1.02 $\pm$ 0.01
	0.2	13.5 $\pm$ 0.6 *	127.0 $\pm$ 6.8	102.1 $\pm$ 1.5	7.9 $\pm$ 0.2	0.97 $\pm$ 0.01
	0.4	11.5 $\pm$ 0.1	116.5 $\pm$ 5.8 *	88.0 $\pm$ 3.6 *	6.9 $\pm$ 0.2 *	0.99 $\pm$ 0.02
	0.6	10.2 $\pm$ 0.3 *	83.8 $\pm$ 3.3 *	66.2 $\pm$ 1.5 *	6.3 $\pm$ 0.1 *	0.92 $\pm$ 0.02
	0.8	8.2 $\pm$ 0.3 *	53.3 $\pm$ 5.9 *	34.7 $\pm$ 4.1 *	6.1 $\pm$ 0.1 *	0.75 $\pm$ 0.06 *
	1.0	8.9 $\pm$ 0.6 *	55.1 $\pm$ 9.7 *	37.4 $\pm$ 9.4 *	6.2 $\pm$ 0.08 *	0.71 $\pm$ 0.07 *
2.0	0	11.9 $\pm$ 0.6	164.9 $\pm$ 9.3	142.1 $\pm$ 7.6	7.0 $\pm$ 0.5	1.05 $\pm$ 0.05
	0.2	11.6 $\pm$ 0.5	131.5 $\pm$ 6.0 *	114.2 $\pm$ 7.2 *	6.9 $\pm$ 0.2	1.02 $\pm$ 0.02
	0.4	11.3 $\pm$ 0.2	119.6 $\pm$ 4.9 *	98.8 $\pm$ 1.6 *	6.7 $\pm$ 0.1	1.01 $\pm$ 0.02
	0.6	10.6 $\pm$ 0.3	105.6 $\pm$ 1.3 *	87.2 $\pm$ 3.1 *	6.6 $\pm$ 0.1	0.96 $\pm$ 0.03
	0.8	9.9 $\pm$ 0.9 *	93.0 $\pm$ 3.4 *	63.5 $\pm$ 7.8 *	7.3 $\pm$ 0.1	0.74 $\pm$ 0.02 *
	1.0	6.9 $\pm$ 0.6 *	86.7 $\pm$ 10.8 *	50.4 $\pm$ 3.9 *	5.5 $\pm$ 0.1 *	0.68 $\pm$ 0.05 *

* 与同一食物密度下的对照组相比有显著差异($P < 0.05$)

双因素方差分析结果表明,食物密度、 Pb^{2+} 浓度以及两者间的交互作用对多刺裸腹蚤的各主要生命表统计学参数均有显著的影响($P < 0.05$)(表 2)。

表 2 食物密度和 Pb^{2+} 浓度对多刺裸腹蚤各主要生命表统计学参数影响的双因素方差分析结果

Table 2 Two-way analysis on the effects of algal density and Pb^{2+} concentration on the life-table demographic parameters of *M. macrocopa*

参数 Parameters	来源 Source	MS	SS	df	F	P
e_0	食物密度 Algal density	13.3	26.7	2	13.9	< 0.01
	Pb^{2+} 浓度 Pb^{2+} concentrations	38.2	191.1	5	39.7	< 0.01
	食物密度 $\times$ Pb^{2+} 浓度 Algal density $\times$ Pb^{2+} concentration	3.1	31.0	10	3.2	< 0.01
G_0	食物密度 Algal density	2419.9	4839.8	2	21.1	< 0.01
	Pb^{2+} 浓度 Pb^{2+} concentrations	8616.5	43082.3	5	75.1	< 0.01
	食物密度 $\times$ Pb^{2+} 浓度 Algal density $\times$ Pb^{2+} concentration	245.8	2457.6	10	2.1	< 0.05
R_0	食物密度 Algal density	3955.5	7910.9	2	59.3	< 0.01
	Pb^{2+} 浓度 Pb^{2+} concentrations	6740.1	33700.5	5	101.0	< 0.01
	食物密度 $\times$ Pb^{2+} 浓度 Algal density $\times$ Pb^{2+} concentration	454.0	4540.3	10	6.8	< 0.01
T	食物密度 Algal density	10.5	21.0	2	89.1	< 0.01
	Pb^{2+} 浓度 Pb^{2+} concentrations	7.1	35.5	5	60.2	< 0.01
	食物密度 $\times$ Pb^{2+} 浓度 Algal density $\times$ Pb^{2+} concentration	1.9	18.8	10	15.9	< 0.01
r_m	食物密度 Algal density	0.2	0.3	2	52.3	< 0.01
	Pb^{2+} 浓度 Pb^{2+} concentrations	0.06	0.3	5	17.6	< 0.01
	食物密度 $\times$ Pb^{2+} 浓度 Algal density $\times$ Pb^{2+} concentration	0.02	0.2	10	6.8	< 0.01

2.4 Pb²⁺ 浓度与多刺裸腹蚤各主要生命表统计学参数之间的关系

0.5 × 10⁶ 和 1.0 × 10⁶ 个细胞/mL 食物密度下,Pb²⁺ 浓度与多刺裸腹蚤的各主要生命表统计学参数间均有显著的剂量-效应关系; 2.0 × 10⁶ 个细胞/mL 食物密度下,Pb²⁺ 浓度与多刺裸腹蚤的生命期望、总生殖率和净生殖率间均有显著的剂量-效应关系(表 3)。

表 3 3 个食物密度下多刺裸腹蚤的的生命期望(*e*₀)、总生殖率(*G*₀)、净生殖率(*R*₀)、世代时间(*T*) 和内禀增长率(*r*_{*m*}) 与 Pb²⁺ 浓度(*X*, mg/L) 间的关系

Table 3 The relationships between life expectancy at birth (*e*₀), gross reproductive rate (*G*₀), net reproductive rate (*R*₀), generation time (*T*) as well as intrinsic rate of population increase (*r*_{*m*}) of *M. macrocopa* at three algal densities and Pb²⁺ concentrations (*X*, mg/L)

食物密度 Algal density /(10 ⁶ 个细胞/mL)	参数 Parameters	回归方程 Regressive equation	显著性差异 Significant test
0.5	<i>e</i> ₀	<i>e</i> ₀ = -3.6 <i>X</i> ² + 7.9 <i>X</i> + 13.1	<i>R</i> ² = 0.80, <i>P</i> < 0.01
	<i>G</i> ₀	<i>G</i> ₀ = -28.1 <i>X</i> ² - 44.6 <i>X</i> + 129.7	<i>R</i> ² = 0.90, <i>P</i> < 0.01
	<i>R</i> ₀	<i>R</i> ₀ = -80.3 <i>X</i> ² + 38.9 <i>X</i> + 73.6	<i>R</i> ² = 0.80, <i>P</i> < 0.01
	<i>T</i>	<i>T</i> = 0.2 <i>X</i> ² - 4.6 <i>X</i> + 10.3	<i>R</i> ² = 0.90, <i>P</i> < 0.01
	<i>r</i> _{<i>m</i>}	<i>r</i> _{<i>m</i>} = -0.5 <i>X</i> ² + 0.5 <i>X</i> + 0.7	<i>R</i> ² = 0.60, <i>P</i> < 0.05
1.0	<i>e</i> ₀	<i>e</i> ₀ = -1.5 <i>X</i> ² - 3.3 <i>X</i> + 12.9	<i>R</i> ² = 0.70, <i>P</i> < 0.01
	<i>G</i> ₀	<i>G</i> ₀ = 4.9 <i>X</i> ² - 104.1 <i>X</i> + 146.8	<i>R</i> ² = 0.90, <i>P</i> < 0.01
	<i>R</i> ₀	<i>R</i> ₀ = -4.4 <i>X</i> ² - 80.5 <i>X</i> + 115.1	<i>R</i> ² = 0.90, <i>P</i> < 0.01
	<i>T</i>	<i>T</i> = 0.6 <i>X</i> ² - 2.3 <i>X</i> + 7.7	<i>R</i> ² = 0.70, <i>P</i> < 0.01
	<i>r</i> _{<i>m</i>}	<i>r</i> _{<i>m</i>} = -0.3 <i>X</i> ² - 0.03 <i>X</i> + 1.02	<i>R</i> ² = 0.80, <i>P</i> < 0.01
2.0	<i>e</i> ₀	<i>e</i> ₀ = -6.7 <i>X</i> ² - 2.3 <i>X</i> + 11.7	<i>R</i> ² = 0.80, <i>P</i> < 0.01
	<i>G</i> ₀	<i>G</i> ₀ = 59.2 <i>X</i> ² - 133.5 <i>X</i> + 161.9	<i>R</i> ² = 0.90, <i>P</i> < 0.01
	<i>R</i> ₀	<i>R</i> ₀ = 18.3 <i>X</i> ² - 107.2 <i>X</i> + 139.6	<i>R</i> ² = 0.90, <i>P</i> < 0.01

3 讨论

3.1 受试生物的相对敏感性和污染物的相对毒性

已有研究结果表明,25℃ 下,Pb²⁺ 对模糊网纹蚤(*Ceriodaphnia dubia*)、隆线蚤(*Daphnia carinata*)、蚤状蚤(*Daphnia pulex*) 的 48 h-*LC*₅₀ 值分别为 20.9 mg/L^[13]、0.4 mg/L^[13]、0.05 mg/L^[19]; 23.2℃ 下,Pb²⁺ 对蚤(*Daphnia* sp.) 的 48 h-*LC*₅₀ 值为(1.9 ± 0.06) mg/L^[20]。本研究中,25℃ 下,Pb²⁺ 对多刺裸腹蚤的 48 h-*LC*₅₀ 值为 10.5 mg/L,这表明多刺裸腹蚤对 Pb²⁺ 的敏感性强于模糊网纹蚤,但弱于隆线蚤和蚤状蚤等蚤类。另有研究显示,25℃ 下,DBP 和 DDT 对多刺裸腹蚤的 48 h-*LC*₅₀ 值为 9.7 mg · L⁻¹^[21] 和 324.0 μg/L^[22],马拉硫磷(malathion)对多刺裸腹蚤的 48 h-*LC*₅₀ 值为 5.0—10.0 μg/L^[23]; 26℃,S-烯虫酯(S-methoprene)对多刺裸腹蚤的 48 h-*LC*₅₀ 值为 0.3 mg/L^[24]。相比较而言,本研究结果表明,在相同或相近的温度下,Pb²⁺ 对多刺裸腹蚤的毒性弱于 DBP、DDT、马拉硫磷和 S-烯虫酯。

3.2 食物密度和污染物浓度对枝角类存活的影响

食物密度对大型蚤(*Daphnia magna*)、多刺裸腹蚤、短腹平直蚤(*Pleuroxus aduncus*)、老年低额蚤(*Simocephalus vetulus*)、角突网纹蚤(*Ceriodaphnia cornuta*) 和模糊网纹蚤(*Ceriodaphnia cf. dubia*) 等枝角类的存活具有显著影响,主要表现为较低或较高的食物密度使其存活时间缩短^[25-31]。研究资料显示,密度高于 2.0 × 10⁶ 个细胞/mL 的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*) 使多刺裸腹蚤存活率降低^[32]。本研究中,0.5 × 10⁶ 个细胞/mL 的斜生栅藻使多刺裸腹蚤的存活率显著低于 1.0 × 10⁶ 和 2.0 × 10⁶ 个细胞/mL 的斜生栅藻,而两者间无显著的差异。

大多数污染物对枝角类的存活都具有不利的影响;本研究中,较高浓度的 Pb²⁺ 也不利于多刺裸腹蚤的存活。但当温度为(25 ± 2)℃ 时 5.0 × 10⁴ 个细胞/mL 的蛋白核小球藻下 0.01 μg/L 的马拉硫磷和 0.2 × 10⁶ 个细胞/mL 的蛋白核小球藻下 0.02 mg/L 的 Cr²⁺ 以及 0.01 mg/L 的 Zn²⁺、当温度为(26 ± 2)℃ 时 1.0 × 10⁶ 个细

胞/mL 的蛋白核小球藻下 0.005 和 0.01 mg/L 的 S-烯虫酯均对多刺裸腹蚤的存活具有促进作用^[213-24,33];当温度为 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 时, 0.5×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻下 0.2 mg/L 的二氯丙酰苯胺 (propanil) 对大型蚤的存活也具有促进作用^[34]。与上述研究结果相似,本研究中,在 0.5×10^6 和 1.0×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻密度下,较低浓度 (0.2 mg/L) 的 Pb^{2+} 也显著延长了多刺裸腹蚤的生命期望。可见,较低的食物密度下较低浓度的某些污染物会促进枝角类的存活。这是因为 0.5×10^6 和 1.0×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻是多刺裸腹蚤存活的适宜密度;而在此密度下,0.2 mg/L 的 Pb^{2+} 表现出雌激素活性,对多刺裸腹蚤的存活具有显著的促进作用。黄林等和查春旺等也曾发现具有雌激素活性的、低浓度艾试剂 (aldrin) 和十氯丹 (chlordecone) 对轮虫的存活均具有显著的促进作用^[35-36]。而高食物密度和高污染物浓度不利于多刺裸腹蚤的存活可能主要与较高浓度的污染物对多刺裸腹蚤所具有的毒性作用有关。

3.3 食物密度和污染物浓度对枝角类繁殖的影响

较低或较高的食物密度使大型蚤、多刺裸腹蚤、短腹平直蚤、老年低额蚤、角突网纹蚤和模糊网纹蚤等枝角类的繁殖率显著降低^[25-31]。席贻龙等研究发现,密度为 0.5×10^6 和 4.0×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻使多刺裸腹蚤的繁殖率显著低于密度为 1.0×10^6 和 2.0×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻^[32]。与其相似的是,本研究的 3 个对照组之间,在 $(0.5-2.0) \times 10^6$ 个细胞/mL 范围内,随着斜生栅藻密度的逐渐升高,多刺裸腹蚤的繁殖率 (以净生殖率为指标) 逐渐显著地增大。在适宜范围内,食物密度的升高有利于多刺裸腹蚤获取较多的能量用于生殖,从而提高了它的繁殖率。

大多数污染物对枝角类的繁殖也都具有不利的影响;本研究中, Pb^{2+} 污染总体上也不利于多刺裸腹蚤的繁殖。但 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时 0.2×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻下 20 $\mu\text{g/L}$ 的 Cr^{2+} 、 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ 时 0.5×10^5 个细胞/mL 的蛋白核小球藻下 0.001、0.01、0.1 $\mu\text{g/L}$ 的二嗪农 (Diazinon)、 $(26 \pm 2)^\circ\text{C}$ 时 0.4×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻下 5 和 10 $\mu\text{g/L}$ 的 S-烯虫酯、 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 时 1.0×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻下 1、8、16、32、40 $\mu\text{g/L}$ 的 DDT 均显著提高了多刺裸腹蚤的净生殖率^[22,24,33,37]。本研究中, $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 时 0.5×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻下 0.4 mg/L 的 Pb^{2+} 对多刺裸腹蚤的净生殖率也具有促进作用;但随着食物密度的升高,其促进作用消失。且随着食物密度的升高,对多刺裸腹蚤繁殖起显著抑制作用的 Pb^{2+} 浓度逐渐降低;这与食物密度和 Pb^{2+} 浓度对多刺裸腹蚤的净生殖率具有显著的交互作用有关。

3.4 食物密度和污染物浓度对枝角类种群增长的影响

与 0.5×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻相比, 1.0×10^6 、 2.0×10^6 个细胞/mL 的蛋白核小球藻有利于多刺裸腹蚤的种群增长^[32];与其相似的是,本研究的 3 个对照组之间, 1.0×10^6 和 2.0×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻密度下多刺裸腹蚤的种群内禀增长率无显著的差异,但均显著高于 0.5×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻密度下。

大多数污染物抑制枝角类的种群增长;本研究中, 1.0×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻下,较高浓度 (0.8—1.0 mg/L) 的 Pb^{2+} 显著降低了多刺裸腹蚤的种群内禀增长率; 2.0×10^6 个细胞/mL 的斜生栅藻下, 0.8 mg/L 的 Pb^{2+} 也显著降低了多刺裸腹蚤的种群内禀增长率。然而,已有报道显示,在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下, 5000 $\mu\text{g/L}$ 的邻苯二甲酸二丁酯 (DBP) 显著提高了多刺裸腹蚤的种群内禀增长率^[21]。与其相似的是,本研究中, 0.5×10^6 个细胞/mL 食物密度下, 0.4—0.8 mg/L 的 Pb^{2+} 也显著提高了多刺裸腹蚤的种群内禀增长率。Bertarm 和 Hart^[38] 发现,枝角类的种群内禀增长率主要受其第一和第二窝所产幼体数的影响。本研究中, 0.5×10^6 个细胞/mL 的食物密度下 0.8 mg/L 的 Pb^{2+} 使多刺裸腹蚤的第一和第二窝所产幼体数显著高于 1.0×10^6 、 2.0×10^6 个细胞/mL 的食物密度下,这可能是 0.5×10^6 个细胞/mL 的食物密度下 0.8 mg/L 的 Pb^{2+} 使多刺裸腹蚤的种群内禀增长率显著高于 1.0×10^6 、 2.0×10^6 个细胞/mL 的食物密度下的主要原因。

3.5 不同实验终点的敏感性

暴露在 0.08 mg/L Cd^{2+} 中 6h 的多刺裸腹蚤,其生命期望缩短了 35%;而净生殖率下降更多,达到 65%;因此其繁殖参数对 Cd^{2+} 污染的敏感性比存活参数强^[39]。内禀增长率是比净生殖率较敏感的指标,能在较低

的浓度下监测出 DBP 对多刺裸腹蚤种群增长的影响^[21]。本研究首次发现,多刺裸腹蚤的生命期望、净生殖率和内禀增长率对 Pb^{2+} 污染的敏感性因食物密度的不同而存在着差异。在较低食物密度(0.5×10^6 个细胞/mL)下,多刺裸腹蚤的生命期望对 Pb^{2+} 污染的敏感性强于净生殖率和内禀增长率,而后两者的敏感性相似;在中等食物密度(1.0×10^6 个细胞/mL)下,多刺裸腹蚤的生命期望、净生殖率和内禀增长率对 Pb^{2+} 污染的敏感性逐渐下降;在较高的食物密度(2.0×10^6 个细胞/mL)下,多刺裸腹蚤的净生殖率对 Pb^{2+} 污染的敏感性强于生命期望和内禀增长率,而后两者的敏感性相似。

References:

- [1] Son J, Ryoo M I, Jung J, Cho K. Effects of cadmium, mercury and lead on the survival and instantaneous rate of increase of *Paronychiurus kimi* (Lee) (Collembola). *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(2): 404-411.
- [2] Madoni P, Romeo M G. Acute toxicity of heavy metals towards freshwater ciliated protists. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1): 1-7.
- [3] Baudouin M F, Scoppa P. Acute toxicity of various metals to freshwater zooplankton. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1974, 12(6): 745-751.
- [4] Downing J A, Rigler F H. A manual on methods for the assessment of secondary productivity in fresh waters. IBP Hand Book 17. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1984: 286-289.
- [5] Deng D G, Jin Y, Liu M, Yuan L X. Effects of temperature and food concentration on the growth and reproduction of *Simocephalus vetulus*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(3): 298-303.
- [6] Zhou Y X, Zhang Z S. The toxicity test method of aquatic organisms. Beijing: Agriculture Press, 1989: 65-68.
- [7] Stark J D, Banks J E. Population-level effects of pesticides and other toxicants on arthropods. *Annual Review of Entomology*, 2003, 48(1): 505-519.
- [8] Sarma S S S, Nandini S, Flores J. Effect of methyl parathion on the population growth of the rotifer *Brachionus patulus* (O. F. M ller) under different algal food (*Chlorella vulgaris*) densities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 48(2): 190-195.
- [9] Martínez-Jer nimo F, García-González R. Effect of food concentration on the chronic toxicity of sodium dodecyl sulphate to *Daphnia magna*. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery* (Formerly *Journal of Aquatic Ecosystem Health*), 1994, 3(4): 247-253.
- [10] Nandini S, Sarma S S S. Life table demography of four cladoceran species in relation to algal food (*Chlorella vulgaris*) densities. *Hydrobiologia*, 2000, 435(1): 117-126.
- [11] Barata C, Baird D J, Soares A. Demographic responses of a tropical cladoceran to cadmium: effects of food supply and densities. *Ecological Applications*, 2002, 12(2): 552-564.
- [12] Mangas-Ramírez E, Sarma S, Nandini S. Acute and chronic toxicity of ammonium chloride to the cladoceran *Daphnia pulex* Leydig in relation to algal food densities. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 67(6): 834-840.
- [13] Cooper N L, Bidwell J R, Kumar A. Toxicity of copper, lead, and zinc mixtures to *Ceriodaphnia dubia* and *Daphnia carinata*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(5): 1523-1528.
- [14] Yang D Q, Xi Y L, Yao S, Liu L. Effect of p-BHC on the life table demography of cladoceran *Moina macrocopa*. *Chinese Journal of Zoology*, 2007, 42(5): 157-160.
- [15] Luis Gama-Flores J, Sarma S, Nandini S. Acute and chronic toxicity of the pesticide methyl parathion to the rotifer *Brachionus angularis* (Rotifera) at different algal (*Chlorella vulgaris*) food densities. *Aquatic Ecology*, 2004, 38(1): 27-36.
- [16] Barry M J, Logan D C, Ahokas J T, Holdway D A. Effect of algal food concentration on toxicity of two agricultural pesticides to *Daphnia carinata*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1995, 32(3): 273-279.
- [17] Zhang Z S, Huang X F. Method for Study on Freshwater Plankton. Beijing: Science Press, 1991: 410-411.
- [18] Zou E. Effects of sublethal exposure to zinc chloride on the reproduction of the water flea, *Moina irrita* (Cladocera). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1997, 58(3): 437-441.
- [19] Jing T S, Xu J B. The toxicity of benzene, phenol and heavy metal ions to the fleas. *Songliao Journal (Natural Science)*, 2000, 3: 18-22.
- [20] Offem B O, Ayotunde E O. Toxicity of lead to freshwater invertebrates (water fleas: *Daphnia magna* and *Cyclop* sp) in fish ponds in a tropical floodplain. *Water, Air & Soil Pollution*, 2008, 192(1): 39-46.
- [21] Wang J X, Xi Y L, Liu X B, Chen Y, He Z W. Toxicity of dibutyl phthalate to cladoceran *Moina macrocopa*. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7): 1335-1339.
- [22] Liu X B, Xi Y L, Wang J X, Hu K. Acute toxicity of DDT and its effects on life table demography of *Moina macrocopa*. *Chinese Journal of Applied*

- Ecology, 2008, 19(6): 1343-1348.
- [23] Wong C K, Chu K H, Shum F F. Acute and chronic toxicity of malathion to the freshwater cladoceran *Moina macrocopa*. Water, Air & Soil Pollution, 1995, 84(3): 399-405.
- [24] Chu K H, Wong C K, Chiu K C. Effects of the insect growth regulator (S)-methoprene on survival and reproduction of the freshwater cladoceran *Moina macrocopa*. Environmental Pollution, 1997, 96(2): 173-178.
- [25] Martínez-Jerónimo F, García-González R. Effect of food concentration on the chronic toxicity of sodium dodecyl sulphate to *Daphnia magna*. Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery (Formerly Journal of Aquatic Ecosystem Health), 1994, 3(4): 247-253.
- [26] Nandini S, Sarma S. Life table demography of four cladoceran species in relation to algal food (*Chlorella vulgaris*) density. Hydrobiologia, 2000, 435(1): 117-126.
- [27] Rose R M, Warne M, Lim R P. Life history responses of the cladoceran *Ceriodaphnia cf. dubia* to variation in food concentration. Hydrobiologia, 2000, 427(1): 59-64.
- [28] Enserink L, Luttmer W, Maas-Diepeveen H. Reproductive strategy of *Daphnia magna* affects the sensitivity of its progeny in acute toxicity tests. Aquatic Toxicology, 1990, 17(1): 15-25.
- [29] Glazier D S. Effects of food, genotype, and maternal size and age on offspring investment in *Daphnia magna*. Ecology, 1992, 73(3): 910-926.
- [30] Gliwicz Z M, Guisande C. Family planning in *Daphnia*: resistance to starvation in offspring born to mothers grown at different food levels. Oecologia, 1992, 91(4): 463-467.
- [31] Nandini S, Mayeli S M, Sarma S. Effect of stress on the life table-demography of *Moina macrocopa*. Hydrobiologia, 2004, 526(1): 245-254.
- [32] Xi Y L, Hagiwara A, Sakakura Y. Combined effects of food level and temperature on life table demography of *Moina macrocopa* Straus (Cladocera). International Review of Hydrobiology, 2005, 90(5-6): 546-554.
- [33] Wong C K. Effects of chromium, copper, nickel, and zinc on longevity and reproduction of the cladoceran *Moina macrocopa*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1993, 50(5): 633-639.
- [34] Villarreal M J, Sancho E, Ferrando M D, Andreu E. Acute, chronic and sublethal effects of the herbicide propanil on *Daphnia magna*. Chemosphere, 2003, 53(8): 857-864.
- [35] Huang L, Xi Y L, Zha C W, Zhao L L. Effect of aldrin on life history characteristics of rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 79(5): 524-528.
- [36] Zha C W, Xi Y L, Huang L, Zhao L L. Effect of sublethal exposure to chlordecone on life history characteristics of freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus* Pallas. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, (1): 79-83.
- [37] Wong C K. Effects of diazinon on some population parameters of *Moina macrocopa* (Cladocera). Water, Air & Soil Pollution, 1997, 94(3): 393-399.
- [38] Bertram P E, Hart B A. Longevity and reproduction of *Daphnia pulex* (De Geer) exposed to cadmium-contaminated food or water. Environmental Pollution, 1979, 19: 295-305.
- [39] Gama-Flores J L, Sarma S, Nandini S. Exposure time-dependent cadmium toxicity to *Moina macrocopa* (Cladocera): a life table demographic study. Aquatic Ecology, 2007, 41(4): 639-648.

参考文献:

- [5] 邓道贵, 靳英, 柳明, 原丽霞. 温度和食物浓度对老年低额蚤生长与生殖的影响. 水生生物学报, 2006, 30(3): 298-303.
- [6] 周永欣, 章宗涉. 水生生物毒性试验方法. 北京: 农业出版社, 1989: 65-68.
- [14] 杨冬青, 席贻龙, 姚胜, 刘罗. β -六六六对多刺裸腹蚤生命表统计学参数的影响. 动物学杂志, 2007, 42(5): 157-160.
- [17] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 410-411.
- [21] 王金霞, 席贻龙, 刘晓波, 陈艳, 何忠文. 邻苯二甲酸二丁酯对多刺裸腹蚤的毒性. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1335-1339.
- [22] 刘晓波, 席贻龙, 王金霞, 胡柯. DDT 对多刺裸腹蚤的急性毒性和生命表参数的影响. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1343-1348.