

pH 与氨的交互作用对壶状臂尾轮虫 (*Brachionus urceolaris*) 种群增长、繁殖及存活的影响

张 舒, 牛翠娟*, 殷旭旺

(教育部生物多样性与生态工程重点实验室, 北京师范大学生命科学院, 北京 100875)

摘要: 观测了 pH 7~10 之间(间隔 1) 与非离子氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$) 浓度分别为 0.5、1、2、5mg $\text{NH}_3\text{-N/L}$ 和 10mg $\text{NH}_3\text{-N/L}$ 水质条件下壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceolaris*) 种群的增长、繁殖和存活率。结果表明, 在没有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在的情况下, 轮虫在 pH 7~10 之间都能存活, pH 7 时种群的净增殖率、内禀增长率都最高, pH 8 时代时间最长。在适宜的 pH 条件下(pH 7、8), $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度小于 2mg/L 时, 轮虫的存活曲线变化不大, 繁殖率几乎不受影响; 在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到 5mg/L 时, 存活时间缩短, 繁殖率明显下降; 当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到 10mg/L 时, 壶状臂尾轮虫在 48~72h 内死亡, 且不产生幼体。在非适宜 pH 条件下加入 $\text{NH}_3\text{-N}$ 后, 种群的内禀增长率变为负值, 净增殖率明显下降, 种群出现负增长。以上结果表明高 pH 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的交互作用对轮虫种群的增长与存活具有严重的负影响。

关键词: 壶状臂尾轮虫; pH; 氨氮; 种群增长; 繁殖; 存活

文章编号: 1000-0933(2008)10-4815-08 中图分类号: Q142, Q145, Q178, Q968 文献标识码: A

Combined effect of pH and un-ionized ammonia on population growth, reproduction and survival rates of the rotifer *Brachionus urceolaris*

ZHANG Shu, NIU Cui-Juan, YIN Xu-Wang

Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, College of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4815 ~ 4822.

Abstract: The population growth, reproduction and survival rates of a rotifer (*Brachionus urceolaris*) population were studied in growth media over a range of pH-values (pH 7–10) and different concentrations of un-ionized ammonia ($\text{NH}_3\text{-N}$: 0.5, 1, 2, 5 and 10mg/L). The results that in the absence of un-ionized ammonia, the rotifers could survive across the entire pH range (pH 7–10). Both the population net reproductive rate and the intrinsic growth rate were highest at pH 7, but the generation time was longest at pH 8. While at a favorable range of pH (pH 7, 8) and at a concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ below 2mg/L, the age-specific survivorship curve and population growth rates similar to the control. At a concentration of 5mg $\text{NH}_3\text{-N/L}$, the age-specific survivorship decreased and the population growth rate a lot declined. Under the 10mg $\text{NH}_3\text{-N/L}$ concentration, the individuals died in 48–72h, carrying no egg. When exposed to un-ionized ammonia at an unfavorable pH, the population's intrinsic growth rate was negative, its reproductive output dropped and the population declined. The above results indicate that a combination of high pH and high concentration of un-ionized ammonia has a

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30470309)

收稿日期: 2007-05-23; 修订日期: 2007-11-23

作者简介: 张舒(1983~), 女, 福建人, 硕士生, 主要从事水生生物学研究. E-mail: fjzs1216@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cjniu@bnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 30470309)

Received date: 2007-05-23; **Accepted date:** 2007-11-23

Biography: ZHANG Shu, Master candidate, mainly engaged in hydrobiology. E-mail: fjzs1216@163.com

clear negative effect on growth and survival of the rotifer, *B. urceolaris*.

Key Words: *Brachionus urceolaris*; pH; un-ionized ammonia; population growth; reproduction

富营养化水体中某些藻类异常繁殖,使得有机物迅速积累,水体化学与生物耗氧量大大增加^[1];沉于水底的死有机物的厌氧分解促使厌氧菌繁殖,产生有毒气体^[2]。高耗氧量造成的水环境中溶氧量降低通常被认为是造成系统中生物体大量死亡的关键因素,此外水华藻类分泌的毒素也是人们分析富营养化湖泊生物死亡的原因之一^[3]。但是,藻类大量发生时其旺盛的光合作用会产生大量氧气,在浅水湖泊中观测富营养化水体的溶氧含量,往往并不是很低。富营养化水体通常氨氮含量很高,藻类旺盛光合作用下往往因为二氧化碳的大量利用导致水体的高 pH 值。氨氮在水体中以离子氨 NH_4^+ 和非离子氨 NH_3 两种形式存在。由于 NH_3 与 NH_4^+ 比较,不带电荷,具有比较高的脂溶性,更容易通过细胞膜扩散到细胞中去,因而它的毒性远大于 NH_4^+ 。高 pH 下氨氮主要以毒性大的 NH_3 形式存在于水体。有关富营养化水体这种高 pH 值、高非离子氨氮胁迫环境对水生动物有何影响,研究报道却很少^[4]。

轮虫是水域生态系统重要的功能类群。大部分滤食性轮虫作为初级消费者,直接以浮游藻类为食,而其自身又是多种水生动物特别是鱼类幼体的重要饵料。轮虫种群数量的动态变化与水生群落结构的改变密切相关。本实验拟通过观测非离子氨与 pH 交互作用对淡水中常见的壶状臂尾轮虫种群增长、繁殖和存活的影响,为水域富营养化研究提供基础数据。另外,鉴于轮虫在水产养殖业作为饵料生物的重要地位,本文结果还可为水产养殖业提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 轮虫的采集和培养

壶状臂尾轮虫(*Brachionus urceolaris*)单克隆种群由底泥休眠卵孵化单只轮虫并经连续培养得到,底泥采自北京市内一池塘(39°57'N;116°21'E)。轮虫培养液根据 Gilbert^[5] 配置。轮虫饵料选用蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*),投喂密度为 4×10^6 cells/ml;小球藻在 SE 培养液中培养,轮虫培养液每 2d 更换一次。轮虫和小球藻的培养在光照培养箱中进行,光照周期为 14L:10D,光照强度为 2500 lx ($\approx 50 \mu\text{Ein}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),培养温度(20 ± 1)℃。每 2d 更换 1 次轮虫培养液,并添加饵料小球藻。

1.2 pH 和非离子氨($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度的设置

pH 分别为 7、8、9、10。在各 pH 条件下,非离子氨($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度分别为 0(对照组)、0.5、1、2、5、10mg/L。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度依靠 NH_4Cl 和 pH 来调节。根据 Emerson 等^[6] 的公式: $\text{NH}_3(\%) = 100/[1 + 10^{(\text{pKa} - \text{pH})}]$,其中, $\text{pKa} = 0.09018 + 2729.92/T$ (T 为开尔文温度)。可以计算出在不同 pH 条件下为达到所设计的非离子氨浓度所需要的 NH_4Cl 的量。用 pHs-3c 型 pH 计测定 pH,用稀酸 HCl(浓度为 1mol/L)和稀碱 NaOH(浓度为 1mol/L)将培养液调至所设计的 pH 浓度后, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度也随之确定。在调节 pH 前后,用盐度计(ATAGO 的 S-10E)测得盐度没有出现显著的变化,可以排除在这一过程中培养液相关成分的变化可能对轮虫产生的影响。

1.3 轮虫生命表数据的获得

在实验之前要收集同步幼轮虫(龄长小于 12h)。温度与光照条件同正常培养。挑选大量带卵的雌轮虫于 24 孔板中(5~7 只/孔),先适应实验设计的 pH 和非离子氨浓度 12h。然后挑出新产出的同步幼轮虫于 96 孔板中(1 只/孔),轮虫培养液体积为 0.2ml/孔,轮虫饵料及培养的环境条件同上。实验期间每天将轮虫转移至新的培养液中,并记录下轮虫的存活数和产幼体数。为了减少小球藻培养液对实验的影响,处于指数增长期的小球藻在 3000 r/min 离心 10 min 浓缩并计数后再加入到轮虫培养液中。每个实验处理下设 3 个重复。

1.4 相关参数的计算

轮虫种群增长参数的计算公式如下:^[7]

$$\text{繁殖率}(m_x) = \frac{N_x}{n_x}$$

$$\text{存活率}(l_x) = n_x/n_{x-1}$$

$$\text{净增殖率}(R_0) = \sum_{x=0}^n l_x m_x$$

$$\text{世代时间}(T) = \frac{\sum_{x=0}^n l_x m_x x}{R_0}$$

$$\text{内禀增长率}(r_m) = \sum_{x=0}^n e^{-rx} l_x m_x = 1$$

$$\text{种群增长率}(r) = \ln R_0 / T$$

式中, x 为年龄; t 为 x 龄(包括 x 龄)以后的各年龄; N_x 为当天新生幼体数; n_x 为各天开始时的存活个体数。

本文实验数据统一采用 spss 11.0 统计学软件包进行分析处理。结果中各组平均值均用平均值 $\pm$ 标准误差表示(Mean $\pm$ SE)。在进一步进行数据分析之前,先用 One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test 检验数据是否符合正态分布,再对 pH 和氨氮这两个因素进行双因素方差分析来检验 pH 和氨氮之间的交互作用对数据的影响是否显著。然后用单因素方差分析(One-Way ANOVA),看在同一非离子氨浓度下,各 pH 浓度处理组间差异是否显著,并选择 S-N-K(Student-Newman-Keuls)复选项进行各组均值间的配对比较。对同一 pH 下,不同非离子氨浓度条件下的各组数据也采用如上方法进行比较。显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 不同的 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫特定年龄存活率、繁殖率的影响

不同的 pH 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 水平壶状臂尾轮虫特定年龄存活率的影响结果见图 1。由对照组实验结果可以看出,壶状臂尾轮虫在较高 pH 条件下如: pH 9、10 时,种群的存活率较 pH 7、8 条件下的存活时间(12 ~ 13d)短 1 ~ 2d。当培养液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度达到 1mg/L 时, pH 10、pH 9 的存活时间(10d)比对照组(11d)缩短了近 1d。当培养液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度达到 2mg/L 时,各 pH 梯度下的存活时间都分别比对照组短,如 pH 7 下的存活时间(11d)短于对照组(13d)。当培养液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度达到 5mg/L 时, pH 10、pH 9 的存活时间(6d)只及对照组的一半。当培养液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到 10mg/L 时, pH 7 条件下,轮虫急性死亡, pH 8 下轮虫的存活时间只能维持到第 6 天。

对繁殖率来说,在没有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在时, pH 7 的平均繁殖率最高,随 pH 升高繁殖率下降。繁殖率在第 3 天出现一个高峰。有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在时, pH 9、10 的繁殖率接近 0。pH 7、8 的繁殖率与对照组相比明显下降,而且没有明显的峰形。在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 5mg/L 时, pH 7 的繁殖率比 pH 8 低。

2.2 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫世代净增殖率的影响

双因素方差分析结果表明(表 1), pH 和非离子氨($\text{NH}_3\text{-N}$),以及二者的交互作用都显著影响种群净增殖率 R_0 (分别为 $P = 0.000$, $P = 0.000$, $P = 0.000$)。不同 pH、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度下种群世代净增殖率 R_0 的结果见图 2。

表 1 对不同 pH 和非离子氨水平下壶状臂尾轮虫净增殖率 R_0 的双因素方差分析

Table 1 Two-way anova of different pH and un-ionized ammonia on net reproduction rate R_0 of *B. urceolaris*

变异来源 Source	离差平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P
NH_3	279.760	5	55.952	60.705	0.0000
pH	615.544	3	205.181	222.611	0.0000
$\text{NH}_3 \times \text{pH}$	286.653	15	19.110	20.734	0.0000
误差 Error	44.242	48	0.922		

先看 pH 对 R_0 的影响。在对照组中, R_0 都 > 1 , 说明种群在增长。对照组在 pH 9 和 10 之间 R_0 差异不显著($P = 0.470$), 都较低, 在 pH 7 和 8 之间差异也不显著($P = 0.510$), 不过, pH 7、8 环境下种群的 R_0 要显著大于 pH 9、10 下的 R_0 ($P = 0.001$)。pH 为 7 时的 R_0 最大。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 0.5mg/L 时, pH 8 下的 R_0 要明显大于 pH 9、10 下的 R_0 , 明显小于 pH 7 下的 R_0 , 差异显著(分别为 $P = 0.0000$, $P = 0.008$)。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 1mg/L 时,

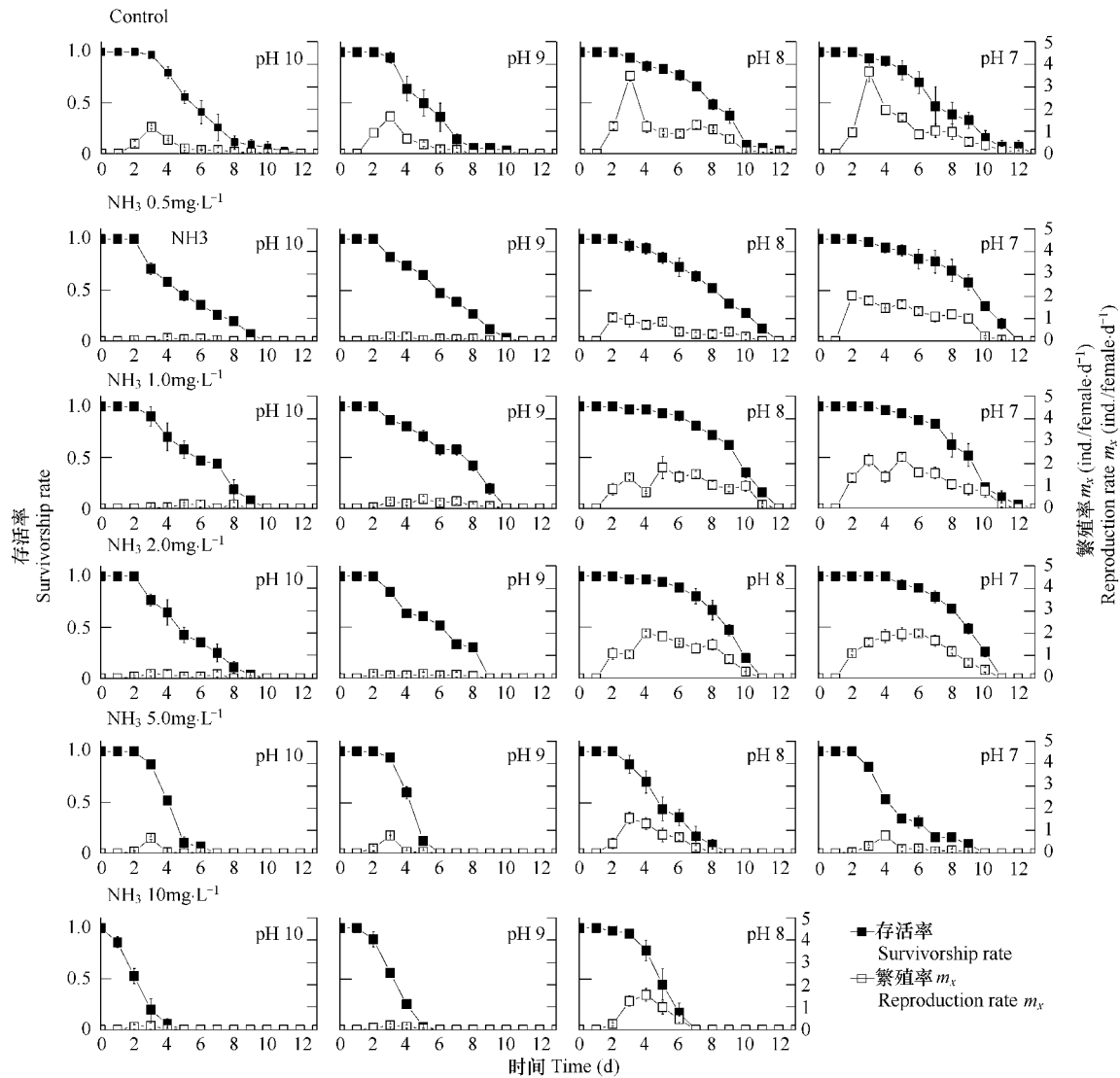


图1 不同的 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫种群特定年龄存活率和繁殖率 m_x 的影响

Fig. 1 The effects of different pH and un-ionized ammonia on age specific survivorship rate and reproduction rate m_x of *B. urceolaris* population

pH 8 下的 R_0 还是要明显大于 pH 9、10 下的 R_0 , 明显小于 pH 7 下的 R_0 , (分别为 $P=0.0000$, $P=0.006$) $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 2mg/L 时, pH 8 下的 R_0 与 pH 7 下的 R_0 之间差异变得不明显 ($P=0.096$), 但仍明显大于 pH 9、10 下 R_0 ($P=0.000$)。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度 5mg/L 时, pH 8 下的 R_0 要明显大于 pH 7、9、10 的 R_0 ($P=0.004$)。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度 10mg/L 时, pH 9、10 的 R_0 与 pH 8 下的 R_0 之间差异显著 ($P=0.002$)。

再看 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对于 R_0 的影响。 pH 7、8 时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 0 、 0.5 、 1mg/L 和 2mg/L 的 R_0 显著大于 5 和 10mg/L 时的 R_0 (分别为 $P=0.0000$, $P=0.0000$)。 pH 9、10 时, 对照组的 R_0 显著大于实验组的 R_0 (分别为 $P=0.001$, $P=0.000$)。

2.3 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫世代时间的影响

双因素方差分析结果表明(表 2), pH 和非离子氨 ($\text{NH}_3\text{-N}$), 以及二者的交互作用都显著影响壶状臂尾轮虫的世代时间 T (分别为 $P=0.000$, $P=0.000$, $P=0.000$)。 不同 pH、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度下世代时间 T 的结果见图 3。

先看 pH 对 T 的影响。 对照组中 pH 7、8 和 10 之间的 T 差异不显著 ($P=0.051$), pH 9 和 10 之间的 T 差异不显著 ($P=0.265$), pH 7、8 下的 T 明显长于 pH 9 下的 T ($P=0.013$)。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度小于等于 5mg/L 时, pH 7、8、9、10 下 T 的差异都不显著 (0.5mg/L 时的 $P=0.745$, 1mg/L 时的 $P=0.140$, 2mg/L 时的 $P=0.173$,

5mg/L 时的 $P=0.054$)。NH₃-N 的浓度为 10mg/L 时,pH 8 下的 T 要明显长于其他 pH 条件下的 $T(P=0.000)$ 。当 NH₃-N 的浓度为 1mg/L,pH 为 10 时,世代时间 T 最长(5.5d),当 NH₃-N 的浓度为 10mg/L,pH 为 10 时世代时间最短(2.5d)。

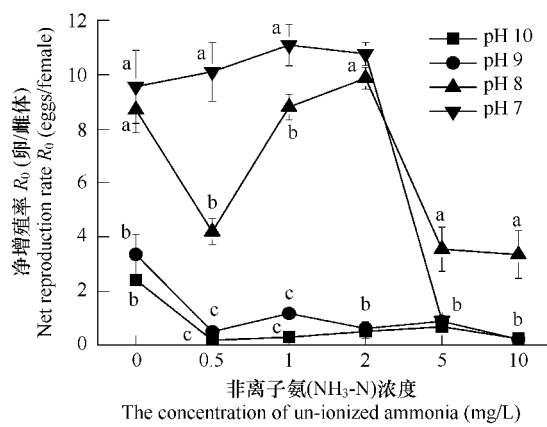


图2 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫种群净增殖率 R_0 的影响

Fig. 2 The effects of different pH and un-ionized ammonia on net reproduction rate of *B. urceolaris* population

小写字母显示同一氨氮水平下不同 pH 组间两两比较结果,不同字母表示差异显著, $P < 0.05$ The lowercases show the result of comparison between different pHs at the same un-ionized ammonia concentration, different letters show the differences marked, $P < 0.05$

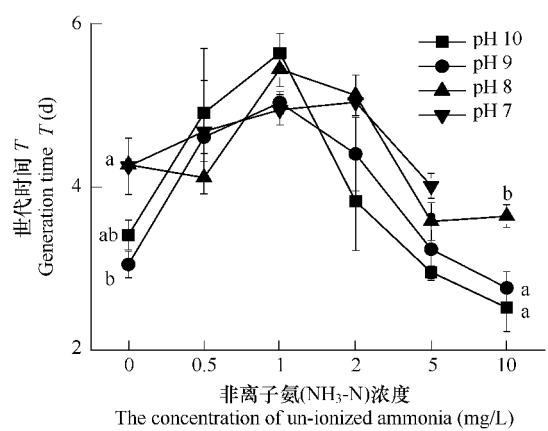


图3 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫世代时间的影响

Fig. 3. The effects of pH and un-ionized ammonia on generation time for *B. urceolaris* population

小写字母显示同一氨氮水平下不同 pH 组间两两比较结果,不同字母表示差异显著, $P < 0.05$ The lowercases show the result of comparison between different pHs at the same un-ionized ammonia concentration, different letters show the differences marked, $P < 0.05$

表2 对不同 pH 和非离子氨水平下壶状臂尾轮虫世代时间 T 的双因素方差分析

Table 2 Two-way anova of pH and un-ionized ammonia on generation time T of *B. urceolaris*

变异来源 Source	离差平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean Square	F	P
NH ₃	69.542	5	13.908	43.497	0.0000
pH	3.575	3	1.192	3.726	0.017
NH ₃ × pH	29.022	15	1.935	6.051	0.0000
误差 Error	15.348	48	0.320		

再看 NH₃-N 对于 T 的影响。pH 7 时,对照组 T 与 NH₃-N 浓度为 0.5、1、2mg/L 和 5mg/L 时的 T 无显著差异($P=0.053$)。pH 8 时,NH₃-N 浓度为 1、2mg/L 时的 T 显著长于其他浓度下的 $T(P=0.000)$ 。pH 9 时,对照组、NH₃-N 浓度为 5、10mg/L 时的 T 显著短于 0.5、1、2mg/L 下 3 组的 $T(P=0.026)$ 。pH 10 时,NH₃-N 浓度为 0.5、1mg/L 下 T 显著长于其他浓度下 $T(P=0.002)$ 。

2.4 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫内禀增长率的影响

双因素方差分析结果表明(表 3),pH 和非离子氨(NH₃-N),以及二者的交互作用都显著影响壶状臂尾轮

表3 对不同 pH 和非离子氨水平下壶状臂尾轮虫内禀增长率 r_m 的双因素方差分析

Table 3 Two-way anova of different pH and un-ionized ammonia on intrinsic growth rate r_m of *B. urceolaris*

变异来源 Source	离差平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P
pH	7.107	3	2.369	55.769	0.0000
NH ₃	3.299	5	0.660	15.532	0.0000
pH × NH ₃	1.546	14	0.110	2.600	0.008
误差 Error	1.954	46	0.042		

虫的内禀增长率 r_m (分别为 $P=0.000, P=0.000, P=0.008$)。不同 pH、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度下内禀增长率 r_m 的结果见图 4。

先看 pH 对 r_m 的影响。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 0、0.5、1、2 mg/L 时 pH 7、8 时的 r_m 要明显大于 pH 9、10 时的 r_m (分别为 $P=0.002, P=0.000, P=0.000, P=0.004$)。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 5 mg/L 时, pH 7、8、9、10 的 r_m 之间差异不显著 ($P=0.055$), 但 pH 8 和 9、10 的 r_m 之间差异显著 (分别为 $P=0.011, P=0.039$)。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 10 mg/L 时, pH 8 时的 r_m 显著大于 pH 9、10 时的 r_m ($P=0.02$)。

再看 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对于 r_m 的影响。pH 7 时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 5 mg/L 的 r_m 要明显小于 pH 7 时其他浓度下的 r_m (10 mg/L 无内禀增长率, 除外) ($P=0.000$)。pH 8、9、10 时, 对照组的 r_m 要显著大于其他组的 r_m (分别为 $P=0.003, P=0.006, P=0.022$)。

3 讨论

3.1 不同的 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫种群繁殖率和存活率的影响

本实验中, 对照组 pH 7 的平均繁殖率最高, 随 pH 升高繁殖率下降。对照组的繁殖率在第 3 天都出现一个高峰。有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在时, pH 7、8 的繁殖率与对照组相比明显下降, 而且没有明显的峰形, pH 9、10 的繁殖率接近 0。Yu 和 Hirayama^[8] 对褶皱臂尾轮虫 (*B. plicatilis*) 所作的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 急性毒性试验结果表明, pH 为 7.3 ~ 7.8 时, 23℃ 下 24h LC_{50} 为 17.0 $\mu\text{mol/mol}$ 。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的慢性毒性试验结果表明, 在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 7.8 $\mu\text{mol/mol}$ 时, 种群繁殖率下降 50%。本实验发现, 对于壶状臂尾轮虫来说, 在适当的 pH 条件下 (pH 7 和 8), 当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度小于等于 2 mg/L 时, 轮虫的繁殖率几乎不受影响, 在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到 5 mg/L 时, 繁殖率才明显下降。当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达到 10 mg/L 时, 壶状臂尾轮虫在 48 ~ 72h 内死亡, 且不产生幼体。与上述褶皱臂尾轮虫的研究结果相比, 本实验中壶状臂尾轮虫对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的更敏感。差异可能来源于褶皱臂尾轮虫与壶状臂尾轮虫的种间差异, 本实验采用的壶状臂尾轮虫为淡水种轮虫而褶皱臂尾轮虫为海水种轮虫。另外还可能与本实验是在实验室内的小规模培养 (容积为 0.2 ml), 而 Yu 和 Hirayama^[8] 的实验条件则是在室外大规模培养 (容积为 40 t) 有关。

在较高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度和 pH (pH 9、10) 条件下, 能活到后期的轮虫较少。Schluter 和 Groeneweg^[9] 研究发现, 在连续培养红臂尾轮虫 (*B. rubens*), pH 在 7.0 到 8.5 之间时, 当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度达 5 mg/L, 轮虫在 48h 内死亡; 当非离子氨浓度达 16 mg/L, 轮虫在 24h 内死亡。本实验发现, 对于壶状臂尾轮虫来说, 当培养液中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度达到 5 mg/L 时, pH 9、10 的存活时间只有 6d, 相当于对照组的一半; 在较合适的 pH 条件如: pH 7 时的存活时间到 11d。与红臂尾轮虫在 pH 7.0 ~ 8.0, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 5 mg/L 下的存活时间 2d 相比, 壶状臂尾轮虫对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的耐受能力要强得多。

3.2 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫世代净增殖率的影响

壶状臂尾轮虫较适合增殖的 pH 范围为 7 ~ 8, 在此范围内小于 5 mg/L 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度对种群世代净增殖率没什么影响, $\text{NH}_3\text{-N}$ 对轮虫种群增长的毒害作用在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度大于等于 5 mg/L 时特别明显, 净增殖率 R_0 小于等于 1, 种群基本停止增长或出现负增长。但高于此范围 pH 下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的存在则使壶状臂尾轮虫的净增殖率显著下降。pH 为 9、10 时, 非常微量的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 (0.5 mg/L) 对净增殖率 R_0 的影响非常明显, 说明超出

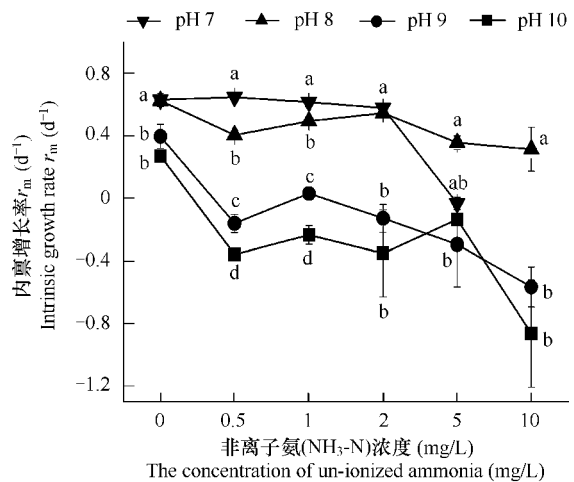


图 4 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫种群内禀增长率的影响

Fig. 4 The effects of different pH and un-ionized ammonia on intrinsic growth rate of *B. urceolaris* population

小写字母显示同一氨氮水平下不同 pH 组间两两比较结果, 不同字母表示差异显著, $P < 0.05$ The lowercases show the result of comparison between different pHs at the same un-ionized ammonia concentration, different letters show the differences marked, $P < 0.05$

壶状臂尾轮虫生长的最适 pH 范围,轮虫对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的耐受性下降。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度大于等于 5mg/L 环境下,轮虫种群世代净增值率在各个 pH 均显著低于相应低 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度下,说明在正常 pH 范围内,低浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毒害作用不明显,壶状臂尾轮虫对其有一定的耐受能力,而高浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 其毒害作用十分显著。Mitchell^[10~12] 用个体培养法研究萼花臂尾轮虫(*B. calyciflorus*)的结果表明,pH 3.5~4.5 时,轮虫的种群为负增长,即净增值率 R_0 小于 1,pH 5.5 和 6.5 时,轮虫的种群为正增长。王金秋^[13] 的实验结果认为 pH < 3.5 和 pH > 11.5 为萼花臂尾轮虫的急性致死范围。pH 3.5~5.5 和 pH 9.5~10.5 时,种群均为负增长。pH 6.5~8.5 为萼花臂尾轮虫种群增长的适宜范围。本实验研究的是壶状臂尾轮虫。本研究得出,在 pH 7~10 时,净增值率 R_0 大于 1,壶状臂尾轮虫的种群正增长,且 pH 7、8 时的轮虫种群的增长状况比 pH 9、10 下好的多,高 pH 条件对壶状臂尾轮虫的种群增长有害。该结果与 Mitchell^[10] 和王金秋^[13] 的实验结果基本吻合。本实验对照组在 pH 10 下的种群增长总体要比王金秋的实验结果好,与 Mitchell 的结果差不多,可能与实验条件和物种不同有关。

Yu 和 Hirayama^[8] 对褶皱臂尾轮虫的研究,认为在大量培养中,pH 对褶皱臂尾轮虫的种群增长没有直接的影响,而 pH 值变化导致的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化是影响褶皱臂尾轮虫增长的限制因子。本实验结果表明 pH 和 $\text{NH}_3\text{-N}$,以及二者的交互作用都显著影响种群净增值率 R_0 ,这与他们对生活于海水的褶皱臂尾轮虫的研究结果有明显的不同。Yu 和 Hirayama^[8] 对褶皱臂尾轮虫的研究中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 $2.4\mu\text{mol/mol}$ 时,对净增值率 R_0 没有影响,当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 $7.8\mu\text{mol/mol}$ 时,净增值率 R_0 比对照组下降 50%。本实验中在 pH 7 时,0.5、1.0、2.0 mg/L 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度对壶状臂尾轮虫种群的净增值率 R_0 没有影响,5 mg/L 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度才对壶状臂尾轮虫种群的净增值率 R_0 有抑制作用。本实验没有找到抑制壶状臂尾轮虫种群净增值率 R_0 的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 最低浓度,应将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度梯度细化,进一步加强研究。

3.3 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫世代时间的影响

在无 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在条件下,世代时间 T 没有受 pH 的影响。在各 pH 下,少量的 $\text{NH}_3\text{-N}$ (0.5、1.0、2.0 mg/L) 会使壶状臂尾轮虫的世代时间延长,而高浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ (5、10 mg/L) 这会使其世代时间变短。说明较低浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 会使壶状臂尾轮虫发育延迟而高浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 对轮虫的毒害作用明显,使其还未发育完全就已经死亡,导致其世代时间 T 变短。

3.4 不同 pH 和非离子氨水平对壶状臂尾轮虫内禀增长率的影响

种群的内禀增长率 r_m 值能全面而敏感地反映环境因子对动物种群动态的影响。本实验结果显示,在没有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在, pH 为 7 到 8 时,壶状臂尾轮虫的 r_m 值最大,有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在下的 r_m 都有显著的降低。说明壶状臂尾轮虫生存的适宜环境为无 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在且 pH 7 到 8 之间。本实验范围内的其他 pH 值和 $\text{NH}_3\text{-N}$,以及二者的交互作用都不利于壶状臂尾轮虫种群的增长。

Mitchell^[12] 研究萼花臂尾轮虫发现内禀增长率在 pH 9.5 时最高,在 pH 10.5 时最低。王金秋^[13] 的实验结果则认为,pH 10.5 时,种群瞬时增长率为负值,萼花臂尾轮虫种群增长的 pH 值上限为 10.5,pH 在 7.5、8.5 时其种群瞬时增长率与 pH 的关系为随着 pH 升高,瞬时增长率值增大。pH 8.5 时,瞬时增长率达高峰。pH 再升高,瞬时增长率则急剧下降。本实验对壶状臂尾轮虫种群的研究表明在无 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在条件下,pH 7、8 时的内禀增长率 r_m 要明显大于 pH 9、10 时的内禀增长率 r_m 。这个结果与王金秋^[13] 的结果基本接近,与 Mitchell^[12] 的研究差异较大,王金秋^[13] 认为 Mitchell^[12] 结果的可信度较低。可能是实验误差导致上述的错误结果。Yu 和 Hirayama^[8] 对褶皱臂尾轮虫的研究发现, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度与内禀增长率线性相关。在 pH 为 8 左右, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 $2.1\mu\text{mol/mol}$ 时,对内禀增长率没有影响,当 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 $13.2\mu\text{mol/mol}$ 时,内禀增长率下降 50%。本实验中,当 pH 为 8, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 0.5 mg/L 时,就对壶状臂尾轮虫的内禀增长率产生显著影响,跟无 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在情况下相比降低了 30% 左右。这一点与 Yu 和 Hirayama^[8] 的结果差异较大,原因可能不仅与轮虫种间差异有关,还与培养液 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的配制方法有关,有待进一步实验证实。

OECD(Organization for economic cooperation and development) 认为湖水富营养化的标准为总氮小于

0.25mg/L^[14]。王明翠等^[15]根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)修订了富营养化指标,水体富营养化的指标为 N 含量超过 2.0mg/L,富营养化水的 pH 值一般为 7~9。中国湖泊富营养化的评价标准中,富营养化湖泊的总氮含量大于 1.2mg/L($\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度大于 0.1~0.6mg/L, $T=20^\circ\text{C}$, pH 7~9),水质的 pH 值为中性至弱碱性,在夏季表层有时为强碱性^[16]。本试验的研究结果显示在 pH 9、10, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度为 0.5mg/L 时,就出现轮虫种群的繁殖率明显下降,存活时间缩短,种群出现负增长的情况。可见在富营养化水体中,轮虫可能会因为水中高 pH 值、高非离子氨氮而死亡。由此推测在富营养化的水体中,高 pH 和高非离子氨氮的协同作用也可能是导致浮游动物死亡的一个重要因素。

References:

- [1] Welch E B, Quinn J M, Hickey C W. Periphyton biomass related to point-source enrichment in seven New Zealand streams. *Water Research*, 1992, 26: 669—675.
- [2] Arruda J A, Fromm C H. The relationship between taste and odor problems and lake enrichment from Kansas lakes in agricultural watersheds. *Lake and Reservoir Management*, 1989, 5: 45—52.
- [3] Zheng L, Xie P, Lin K F. Variation Characteristics of Microcystin Concentration and Influencing Factors in Lake Lianhuahu (Wuhan). *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1053—1057.
- [4] John O W, Frank N J. Photosynthetically elevated pH as a factor in zooplankton mortality in nutrient enriched ponds. *Ecology*, 1972, 53: 605—614.
- [5] Gilbert J J. Mictic female production in the rotifer *Brachionus calyciflorus*. *The Journal of Experimental Zoology*, 1963, 153: 113—123.
- [6] Emerson K, Russo R C, Lund R E. Aqueous ammonia equilibrium calculations; effect of pH and temperature. *Journal of Fisheries Research Board Canada*, 1975, 32: 2379—2383.
- [7] Kerbs C J. The Experimental Analysis of Distribution and Abundance, 4th ed. *Ecology*. New York: Harper Collins College Publishers, 1994, 168—181.
- [8] Yu J P, Kazutsugu H. The effect of un-ionized ammonia on population growth of the rotifer in mass culture. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1986, 52: 1509—1513.
- [9] Schluter M, Groeneweg J. The inhibition by ammonia of population growth of the rotifer, *Brachionus rubens*, in continuous culture. *Aquaculture*, 1985, 46: 215—220.
- [10] Mitchell S A. The effect of pH on *Brachionus calyciflorus* Pallas (Rotifer). *Hydrobiologia*, 1992, 245: 87—93.
- [11] Mitchell S A. Experiences with outdoor semicontinuous mass culture of *Brachionus calyciflorus*. *Aquaculture*, 1986, 55: 215—220.
- [12] Mitchell S A, Joubert J H B. The effect of elevated pH on the survival and reproduction of *Brachionus calyciflorus*. *Aquaculture*, 1986, 55: 215—220.
- [13] Wang J Q. The effect of pH on population growth and reproduction of the rotifer *Brachionus calyciflorus*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8: 435—438.
- [14] Rast W, Smith V H, Thornton J A. Characteristics of eutrophication. In Ryding S, Rast W eds. *The control of eutrophication in lakes and reservoirs*. Paris: UNESCO & Parthenon Press, 1989. 37—63.
- [18] Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5): 47—49.
- [16] Shu J H. Assessment of eutrophication in main lakes of China. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(6): 616—620.

参考文献:

- [3] 郑利,林匡飞,谢平. 武汉莲花湖微囊藻毒素含量变化特征及其影响因素的研究. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6): 1053~1057.
- [13] 王金秋. pH 值对蓼花臂尾轮虫种群增长及繁殖的影响. *应用生态学报*, 1997, 8: 435~438.
- [15] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. *中国环境监测*, 2002, 18(5): 47~49.
- [16] 舒金华. 我国主要湖泊富营养化程度的评价. *海洋与湖沼*, 1993, 24(6): 616~620.