

pH 对中华小长臂虾存活及呼吸代谢的影响

姜宏波^① 包杰^① 姜春玖^① 付佩佩^① 于业辉^① 李晓东^{①②*}

① 沈阳农业大学畜牧兽医学院 沈阳 110866; ② 盘锦光合蟹业有限公司 盘锦 124220

摘要: 为研究中华小长臂虾 (*Palaemonetes sinensis*) 对 pH 的耐受性, 采用静水毒性实验方法确定了中华小长臂虾的半致死 pH。实验设置酸性条件下的 pH 为 3.0、3.2、3.4、3.6、3.8 和 4.0, 碱性条件下的 pH 为 10.4、10.6、10.8、11.0、11.2 和 11.4, 统计中华小长臂虾在 24、48、72 和 96 h 的死亡率。中华小长臂虾 24、48、72 和 96 h 的酸性半致死 pH (L_{pH50}) 分别为 3.416、3.426、3.463 和 3.463, 碱性半致死 pH (L_{pH50}) 分别为 10.813、10.609、10.516 和 10.516, 酸性条件下和碱性条件下的安全 pH 分别为 4.463 和 9.516。在半致死 pH (L_{pH50}) 基础上以静水密闭式方法研究了 pH 对中华小长臂虾耗氧率、排氮率和窒息点的影响, pH 设置为 4、5、6、7、8、9、10, 以 pH 7 为对照组。与对照组相比, 只有 pH 为 9 和 10 时的耗氧率显著升高 ($P < 0.05$), 其他 pH 则未发生显著性变化 ($P > 0.05$); 排氮率则只有 pH 为 5 和 6 时显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其他 pH 组与对照组没有显著性变化 ($P > 0.05$); 在 pH 为 4~9 时, 中华小长臂虾氧氮比 (O/N) 的变化范围为 4.14~10.95, 此时以蛋白质为主要供能物质, 随着 pH 继续上升到 10 时, 中华小长臂虾的氧氮比 (O/N) 突然增加至 29.62, 此时供能物质则变成以脂肪为主; 在各 pH 条件下窒息点没有发生显著性变化 ($P > 0.05$)。本实验结果表明, 中华小长臂虾对 pH 有很强的耐受性, 但不同的 pH 会影响到中华小长臂虾的呼吸代谢以及能量供给方式。

关键词: 中华小长臂虾; pH; 耐受性; 耗氧率; 排氮率; 窒息点

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2017) 02-322-09

Effects of pH on Survival and Respiratory Metabolism of Chinese Grass Shrimp (*Palaemonetes sinensis*)

JIANG Hong-Bo^① BAO Jie^① JIANG Chun-Jiu^① FU Pei-Pei^① YU Ye-Hui^① LI Xiao-Dong^{①②*}

① College of Animal Science and Veterinary Medicine, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866;

② Panjin Guanghe Crab Ltd., Co., Panjin 124200, China

Abstract: The median lethal pH (L_{pH50}) was investigated for pH tolerance of Chinese Grass Shrimp (*Palaemonetes sinensis*) by the hydrostatic toxicity experiment method. The acidic range of pH was 3.0, 3.2,

基金项目 辽宁省教育厅科学研究一般项目 (No. L2015472, L2014254);

* 通讯作者, E-mail: lxd001@ceraap.com;

第一作者介绍 姜宏波, 男, 讲师; 研究方向: 甲壳动物遗传育种; E-mail: syndjhb@163.com。

收稿日期: 2016-05-06, 修回日期: 2016-07-16 DOI: 10.13859/j.cjz.201702016

3.4, 3.6, 3.8 and 4.0, and the alkaline range of pH was 10.4, 10.6, 10.8, 11.0, 11.2, and 11.4. The L_{pH50} in the acidic range was 3.416 for 24 h, 3.426 for 48 h, 3.463 for 72 h and 3.463 for 96 h, respectively (Table 2); The L_{pH50} in the alkaline range was 10.813 for 24 h, 10.609 for 48 h, 10.516 for 72 h and 10.516 for 96 h, respectively (Table 4). Security pH values were 4.463 and 9.516, respectively. Subsequently, the effects of pH on the oxygen consumption rate, ammonia excretion rate and asphyxiation point in *P. sinensis* were studied by hydrostatic test based on L_{pH50} . The pH values were set to 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, and pH 7 was control group. We used the software SPSS 18.0 to analyze the experimental data. An analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the experimental results, and Duncan was used for multiple comparisons. The results showed that oxygen consumption rates at pH 9 and 10 were significantly increased compared to the control pH ($P < 0.05$), and other pH groups did not have significantly change ($P > 0.05$) (Fig. 1); the ammonia excretion rates at pH 5 and 6 were significantly higher compared to the control pH ($P < 0.05$), and other pH groups did not have significantly change ($P > 0.05$) (Fig. 2); the range of oxygen-nitrogen ratio (O/N) in *P. sinensis* was 4.14 ~ 10.95 at pH 4 - 9, indicating that protein was the main energy supply material, however, O/N at pH 10 was sharply increased to 29.62 and the main energy supply material was fat instead of protein (Fig. 3). The asphyxiation point of *P. sinensis* had no significant difference among different pH groups (Fig. 4). The experimental results show that *P. sinensis* has strong tolerance to pH, but pH can affect respiratory metabolism and energy supply way in *P. sinensis*.

Key words: Chinese Grass Shrimp, *Palaemonetes sinensis*; pH; Tolerance; Oxygen consumption rate; Ammonia excretion rate; Asphyxiation point

pH 是甲壳动物养殖环境中重要的环境因子之一, 其值的大小常因浮游植物数量的变化及优势种群的突然改变等因素而发生变化 (刘海春等 2011, 刘伟等 2014)。过高或过低的 pH 不仅会对甲壳动物的生长产生影响, 严重者会威胁到甲壳动物的存活 (Chen et al. 2003, Pan et al. 2008), 因此开展 pH 的毒性实验, 是了解虾类在 pH 胁迫条件下对 pH 耐受性的基础, 在养殖过程中具有重要的意义。关于 pH 对甲壳动物生理生态特征影响的研究已有报道, Taylor 等 (2015) 发现加利福尼亚岩虾 (*Lysmata californica*) 在低 pH 条件下会导致角质层的钙含量增加, 使得 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 比值变大。王芸等 (2011) 发现, pH 胁迫 12 ~ 24 h 后, 中国明对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*) 鳃、肝胰腺、肌肉和血淋巴总抗氧化活力、抗超氧阴离子、过氧化氢酶活力均增加, 胁迫 120 ~ 148 h 后上述指标受到抑制。

中华小长臂虾 (*Palaemonetes sinensis*) 在

分类地位上隶属于十足目长臂虾科, 是在我国唯一有记载的小长臂虾属物种 (李新正等 2003)。此虾为古北界种, 最早主要分布在中国的北方, 后期由于各地间的水产苗种运输的携带作用使得在长江以南地区也广泛存在 (李新正等 2003)。调查研究表明, 在 pH 为 9.17 的草本沼泽湿地中中华小长臂虾能够安全存活和生长 (杨富亿等 2012), 说明中华小长臂虾对 pH 具有一定的耐受能力, 但具体的耐受范围并不清楚。耗氧率 (oxygen consumption rate)、排氨率 (ammonia excretion rate) 和窒息点 (asphyxiation point) 是研究甲壳动物呼吸代谢的几个非常重要的指标, 通过这些指标的测定可以了解甲壳动物在 pH 变化条件下的能量利用方式和对低氧环境的耐受能力 (Chen et al. 1995, Wang et al. 2002)。中华小长臂虾在我国分布广泛, 为生活于淡水水体的小型虾类, 其生境 pH 在不同的水体有较大的差异。本文在研究中华小长臂虾 pH 耐受性的基础上, 进一

步探讨不同 pH 对中华小长臂虾耗氧率、排氨率和窒息点的影响,为丰富中华小长臂虾的生态学基础知识和开展人工养殖提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验在沈阳农业大学水产养殖实验室内进行,所用中华小长臂虾由盘锦光合蟹业有限公司提供,虾运回实验室后暂养 2 周,暂养期间的水温为 $(20 \pm 1.0)^\circ\text{C}$, pH 7.0 ± 0.2 ,待其适应室内养殖环境后挑选体质健壮、无病无伤、体重为 (0.34 ± 0.08) g 的个体进行实验。

1.2 实验方法

1.2.1 pH 急性毒性实验 实验设有对照组和实验组,对照组所用水为经静置曝气后的自来水, pH 为 7.0。根据预实验结果,实验组设置酸性 pH 为 3.0、3.2、3.4、3.6、3.8 和 4.0,碱性 pH 为 10.4、10.6、10.8、11.0、11.2 和 11.4。每个 pH 处理设置 2 个重复,每个重复放虾 20 尾,采用 1 mol/L 的 HCl 和 NaOH 溶液调节水体 pH,实验中每隔 6 h 调整 1 次 pH,每 24 h 换实验液一次。整个实验过程不投喂,实验水体为 10 L,温度为 $(20 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 。实验期间不充气,定时观察个体死亡情况,及时取出死亡个体,准确记录 24、48、72 和 96 h 的死亡尾数。实验结束后以直线内插法求出中华小长臂虾的半致死 pH (L_{pH50})。

1.2.2 pH 对中华小长臂虾呼吸代谢的影响 实验开始前将同一批虾分别在不同的 pH 下适应 7 d 后,选取身体健康的中华小长臂虾作为实验材料,停食 24 h,开始正式实验。实验设置 4、5、6、7、8、9、10 七个 pH 组,以 pH 7 为实验对照组,实验在 250 ml 三角锥瓶中进行,每个瓶中放 3 条中华小长臂虾,每个 pH 设 3 个重复,3 个空白呼吸瓶(不放中华小长臂虾)作为空白对照组。实验采用静水法,用保鲜膜密封,实验进行 3 h。实验结束后,立即测定空白对照组和实验组水体的氧气和氨氮含量,用碘量法测定水中的溶氧含量,用靛酚蓝法测定

氨氮浓度。

窒息点为将 6 条中华小长臂虾放入 250 ml 三角锥形瓶中密封,有 50% 即 3 条失去平衡、昏迷和濒临死亡时,立即测定水样的溶氧含量即为窒息点。实验设置 3 个平行。

1.3 数据处理 根据前期统计的死亡数量,计算出死亡百分率,根据死亡百分数——概率单位换算表将死亡百分率转化为死亡概率单位,建立 24、48、72 和 96 h 的 pH (x) 与中华小长臂虾死亡概率单位 (y) 间的直线回归方程,根据方程求算半致死 pH (L_{pH50})。

中华小长臂虾的安全 pH 求算:根据安全浓度 $SC = 0.1 \times 96 \text{ h } LC_{50}$ 公式进行转化,通过 96 h 的半致死 pH 在酸性条件下转化为 H^+ 浓度和在碱性条件下转化为 OH^- 浓度,分别乘以 0.1 后,再重新换算为 pH,即为酸性条件下和碱性条件下的安全 pH。

耗氧率 = $(D_0 - D_t) V / (W \cdot t)$; 排氨率 = $(N_t - N_0) V / (W \cdot t)$, 式中, D_0 为实验终止时空白对照瓶中氧气浓度 (mg/L), D_t 为实验瓶中氧气浓度 (mg/L), V 为实验容器体积 (L), W 为实验中华小长臂虾体重 (g), t 为实验时间 (h), N_0 为实验终止时空白对照瓶中氨氮浓度 (mg/L), N_t 为实验瓶中氨氮浓度 (mg/L)。

氧氮比 (oxygen-nitrogen ratio, O/N) 为中华小长臂虾呼吸氧原子数与排出氨氮原子数之比。

利用 SPSS 18.0 软件对不同 pH 处理下耗氧率、排氨率、氧氮比和窒息点进行单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多重比较,以 $P < 0.05$ 作为差异显著性水平。

2 结果

2.1 pH 对中华小长臂虾的急性毒性

pH 对中华小长臂虾的急性毒性实验分为酸性 pH 组和碱性 pH 组。酸性 pH 实验,对照组在 96 h 内无死亡, pH 3.2 ~ 3.4 组在 24 h 时死亡率就超过了 90%,并在 48 h 时全部死亡,而 pH 3.8 ~ 4.0 处理组在 24 ~ 96 h 死亡率始终

较低, 不超过 10% (表 1)。根据表 1 的数据求出中华小长臂虾酸性条件下的 24、48、72 和 96 h 半致死 pH (L_{pH50}), 分别为 3.416、3.426、3.463 和 3.463 (表 2), 安全 pH 为 4.463。碱性条件下的 pH 实验, 对照组在 96 h 内无死亡, 在 24 h 时各处理组的死亡率从 0 升高到 100%,

pH 越大死亡率越高, 在 48 ~ 72 h, 各处理组的死亡率逐渐升高, 但 96 h 与 72 h 的死亡率未发生变化 (表 3)。根据表 3 的数据求出碱性条件下的中华小长臂虾 24、48、72 和 96 h 的半致死 pH (L_{pH50}) 分别为 10.813、10.609、10.516 和 10.516, 安全 pH 为 9.516 (表 4)。

表 1 酸性 pH 对中华小长臂虾急性毒性实验结果

Table 1 Acute toxicity of acidic pH on Chinese Grass Shrimp

| pH | 死亡率 Mortality rate (%) | | | |
|-------------------------|------------------------|------|------|------|
| | 24 h | 48 h | 72 h | 96 h |
| 7.0 (对照组 Control group) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 95 | 100 | 100 | 100 |
| 3.2 | 90 | 100 | 100 | 100 |
| 3.4 | 30 | 55 | 60 | 60 |
| 3.6 | 15 | 25 | 30 | 30 |
| 3.8 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 4.0 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |

表 2 酸性条件下中华小长臂虾不同时间的半致死 pH

Table 2 Medial lethal pH (L_{pH50}) at acidic pH at different time points in Chinese Grass Shrimp

| 处理时间 Time (h) | 回归方程 Regression equation | 相关系数 Correlation coefficient | 样本数 Sample number | 半致死 pH Medial lethal pH (L_{pH50}) |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|--|
| 24 | $y = -3.750x + 17.810$ | 0.928 3 | 40 | 3.416 |
| 48 | $y = -3.455x + 16.836$ | 0.997 2 | 40 | 3.426 |
| 72 | $y = -3.710x + 17.847$ | 0.999 4 | 40 | 3.463 |
| 96 | $y = -3.710x + 17.847$ | 0.999 4 | 40 | 3.463 |

回归方程中 x 代表 pH, y 代表死亡概率单位。In the regression equation, x is pH, y is death probability unit.

表 3 碱性 pH 对中华小长臂虾急性毒性实验结果

Table 3 Acute toxicity of alkalic pH on Chinese Grass Shrimp

| pH | 死亡率 Mortality rate (%) | | | |
|-------------------------|------------------------|------|------|------|
| | 24 h | 48 h | 72 h | 96 h |
| 7.0 (对照组 Control group) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10.4 | 0 | 20 | 35 | 35 |
| 10.6 | 20 | 60 | 65 | 65 |
| 10.8 | 60 | 70 | 75 | 75 |
| 11.0 | 60 | 90 | 90 | 90 |
| 11.2 | 95 | 100 | 100 | 100 |
| 11.4 | 100 | 100 | 100 | 100 |

表 4 碱性条件下中华小长臂虾不同时间的半致死 pH

Table 4 Medial lethal pH (L_{pH50}) at alkalic pH at different time points in Chinese Grass Shrimp

| 处理时间 Time (h) | 回归方程 Regression equation | 相关系数 Correlation coefficient | 样本数 Sample number | 半致死 pH Medial lethal pH (L_{pH50}) |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|--|
| 24 | $y = 3.720x - 35.223$ | 0.893 5 | 40 | 10.813 |
| 48 | $y = 3.315x - 30.168$ | 0.951 1 | 40 | 10.609 |
| 72 | $y = 2.645x - 22.814$ | 0.971 1 | 40 | 10.516 |
| 96 | $y = 2.645x - 22.814$ | 0.971 1 | 40 | 10.516 |

回归方程中 x 代表 pH, y 代表死亡概率单位。In the regression equation, x is pH, y is death probability unit.

2.2 pH 对中华小长臂虾呼吸代谢的影响

2.2.1 pH 对中华小长臂虾耗氧率的影响 pH 对中华小长臂虾耗氧率的影响见图 1, pH 在 5 时耗氧率最低, 为 0.13 mg/(g h), 但与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$)。各 pH 组的耗氧率以 pH 为 9 和 10 时最高, 分别达到 0.30 mg/(g h) 和 0.35 mg/(g h), 显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其余各 pH 组与对照组间并没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.2.2 pH 对中华小长臂虾排氨率的影响 pH 对中华小长臂虾排氨率的影响如图 2 所示, 排氨率在 pH 10 时最低, 为 0.010 mg/(g h), 但与对照组之间并无显著性差异 ($P > 0.05$)。pH 在 5 和 6 时排氨率最高, 分别为 0.029 mg/(g h) 和 0.032 mg/(g h), 显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其他处理组与对照组之间均没有显著性差异

($P > 0.05$)。

2.2.3 pH 对中华小长臂虾氧氮比的影响 pH 对中华小长臂虾氧氮比 (O/N) 的影响如图 3 所示, 各 pH 处理组以 10 时最高, 达到了 29.6, 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。各 pH 处理组以 5 时最低, 仅为 4.14, 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。其余 pH 组与对照组之间均没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

2.2.4 pH 对中华小长臂虾窒息点的影响 pH 对中华小长臂虾窒息点的影响如图 4 所示, 各 pH 处理组的窒息点在 5 时最高, 为 0.62 mg/L, 在 9 时最低, 为 0.51 mg/L。但不同 pH 对中华小长臂虾的窒息点没有显著性影响 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 中华小长臂虾对 pH 的耐受性

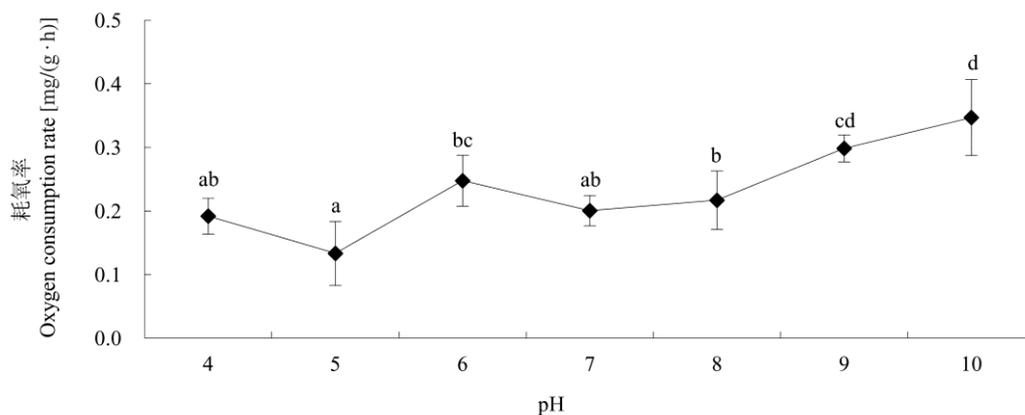


图 1 不同 pH 对中华小长臂虾耗氧率的影响

Fig. 1 Effect of pH on oxygen consumption rate in Chinese Grass Shrimp

不含有相同字母表示其间差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters mean significant difference ($P < 0.05$).

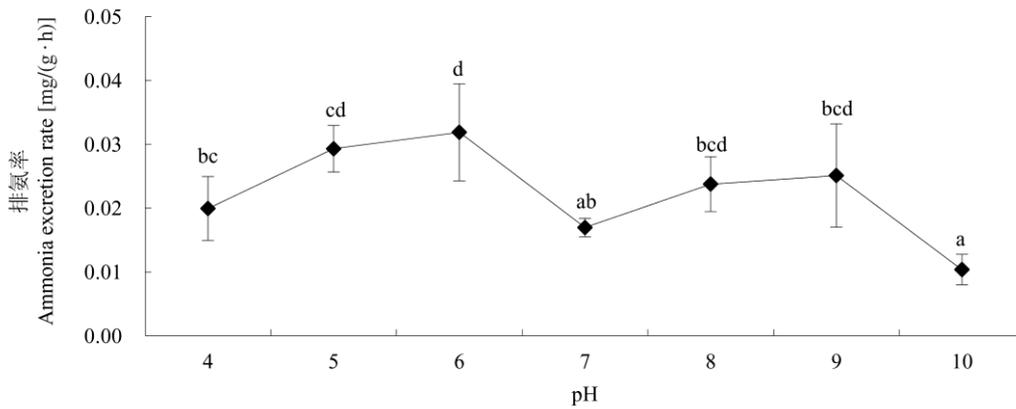


图 2 不同 pH 对中华小长臂虾排氨率的影响

Fig. 2 Effect of pH on ammonia excretion rate in Chinese Grass Shrimp

不含有相同字母表示其间差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters mean significant difference ($P < 0.05$).

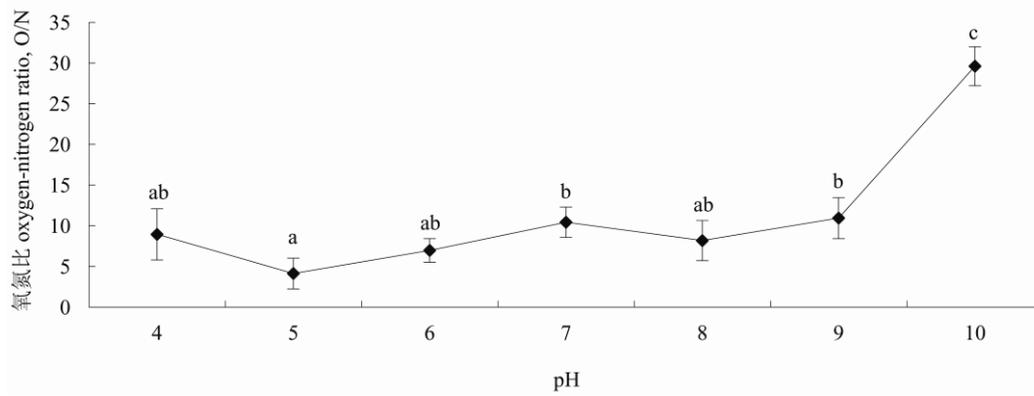


图 3 不同 pH 对中华小长臂虾氧氮比的影响

Fig. 3 Effect of pH on O/N in Chinese Grass Shrimp

不含有相同字母表示其间差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters mean significant difference ($P < 0.05$).

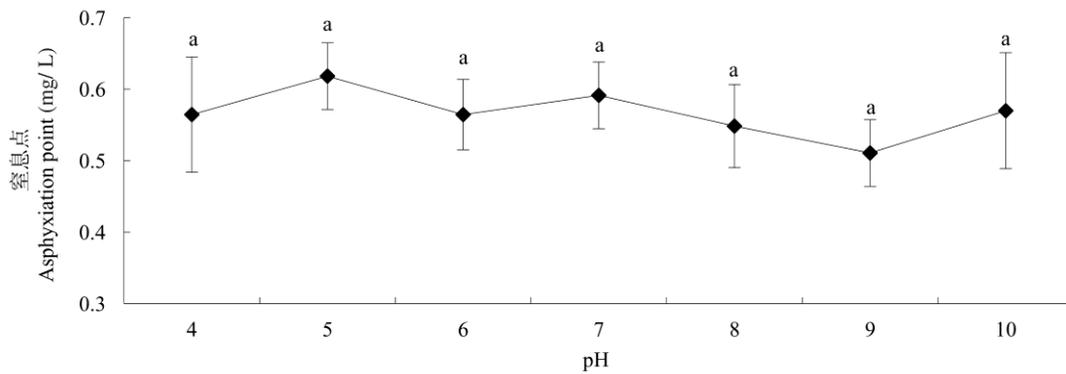


图 4 不同 pH 对中华小长臂虾窒息点的影响

Fig. 4 Effect of pH on asphyxia point in Chinese Grass Shrimp

在我国内陆有很多天然水域由于 pH 的限制而不适合经济水生动物生存,使得这些水体无法开展人工养殖,长期处于荒芜状态(石玉龙等 2009)。此外, pH 也是水产动物养殖过程中波动较为频繁的环境因子之一,当 pH 超过水产动物适宜范围时,就会对养殖生物的机体组织和器官造成损伤,致使其代谢、免疫、消化、生长发育等受到影响(Pan et al. 2005, Zhou et al. 2009),给养殖者造成严重的经济损失。因此,了解养殖生物的 pH 耐受性,有助于了解生物在不同 pH 条件下的适应能力,可为该生物的养殖、移植和引种提供科学依据。在本实验中,水体 pH 偏离对照组越大,中华小长臂虾的死亡率越高;随着毒性时间的延长,中华小长臂虾的累积死亡率也逐渐增加,这与其他学者的研究结果相一致(Allan et al. 1992, Wang et al. 2002)。中华小长臂虾在我国大部分淡水水域都有分布,从南到北广泛存在(张静等 2009, 王丑明等 2011),并且能在一些 pH 高达 9.70 的芦苇湿地中生存和繁殖(杨富亿等 2009),这与本研究结果相近,本实验获得的安全 pH 为 9.516, 24、48、72 和 96 h 的半致死 pH (L_{pH50}) 分别为 10.813、10.609、10.516 和 10.516。中华小长臂虾在酸性条件下的 24、48、72 和 96 h 的半致死 pH (L_{pH50}) 分别为 3.416、3.426、3.463 和 3.463,安全 pH 为 4.463。与其他虾类相比,中华小长臂虾对 pH 具有更强的耐受性,研究表明,温度为 (21.4 ± 1.6) °C 条件下体长 (2.92 ± 0.74) cm 的日本沼虾 (*Macrobrachium nipponense*) 96 h 半致死 pH (L_{pH50}) 为 9.51 (杨富亿等 2005); 温度 (24.2 ± 1.4) °C, 体长 (4.32 ± 1.42) cm 的凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 的 96 h 半致死 pH (L_{pH50}) 为 8.25 ~ 9.00 (杨富亿等 2004); 温度 27°C, 体长 (3.75 ± 0.52) cm 的脊尾白虾 (*Palaemon carinicauda*) 碱性 96 h 半致死 pH (L_{pH50}) 为 10.29, 酸性 96 h 半致死 pH (L_{pH50}) 为 4.78 (于天基等 2015)。中华小长臂虾对 pH 的高耐受性将有助于其在特殊水体中进行养

殖。

3.2 pH 对中华小长臂虾呼吸代谢的影响

一般来说,当水体中的 pH 高于或低于某一范围时,都会影响到水生动物从外界获得溶解氧的数量和速度。不同的水生动物在 pH 胁迫条件下呼吸代谢规律不同,目前关于 pH 对水生动物呼吸代谢的影响主要有三种类型:一种类型是在最适 pH 时耗氧率和排氨率最高,偏离最适 pH 则呼吸代谢降低(Savant et al. 1995, 曹善茂等 2015),曹善茂等(2015)认为可能是这类动物为适应自然环境而产生的进化机制;第二种类型是随着 pH 的增加,耗氧率没有明显的变化(柴学军等 2009, 吴一挺等 2011),其原因可能是此种类型的物种对 pH 的耐受性较强;第三种类型是在 pH 不适合时,水产动物会增大耗氧率和排氨率(朱爱意等 2007, 章龙珍等 2009),章龙珍等(2009)认为这类动物在 pH 不适合时,将通过改变代谢状况,消耗较多的能量以适应外界环境,造成耗能增大、耗氧率升高。本实验的酸性 pH 组(4、5、6)与对照组的耗氧率并未出现差异,这与第二种类型的适应机制相似。但在碱性 pH 组,尤其是 9、10 处理组,耗氧率要显著高于对照组,此时又与第三种类型适应机制相似,这也说明同一种生物对于不同的 pH 胁迫方式可能会采用不同的适应策略。排氨率则是只有 pH 为 5 和 6 时要高于对照组,其他 pH 均与对照组无显著性差异。氧氮比(O/N)可以用于估计生物体代谢中能源物质的化学本质,根据其大小可以判断各种营养物质在生物体供能中所占的比例(Ikeda 1974)。一般认为,在氧氮比(O/N)低于 24 时以蛋白质为主要供能物质,低于 8 时,则完全以蛋白质作为供能物质,高于 24 时则主要以脂肪为供能物质(Ikeda 1974)。研究表明,在不同的环境条件下,甲壳动物会调整自己的供能方式来应对环境的变化。日本沼虾在 12°C 的低温条件下的氧氮比(O/N)较高,为 27 ~ 42,此时维持代谢主要物质是脂肪,而当温度上升到 25°C 时,氧氮比

(O/N) 降到 12 左右, 维持代谢的主要物质则变成了蛋白质(王维娜等 2004)。与日本沼虾相反的是, 秀丽白虾(*Exopalaemon modestus*) 氧氮比(O/N) 则是随着水温的上升而增大, 在低温阶段主要以蛋白质为供能物质, 在高温阶段对脂肪的利用有所增加(刘凯等 2010)。在本实条件下, 当 pH 在 4~9 时, 氧氮比(O/N) 变化范围为 4.14~10.95, 此时中华小长臂虾以蛋白质为主要供能物质, 随着 pH 继续上升到 10 时, 中华小长臂虾的氧氮比(O/N) 突然增加至 29.62, 此时供能物质则变成以脂肪为主, 蛋白质所占的比例相对较小。

研究不同环境条件下的窒息点, 是了解养殖动物在各环境条件下对低氧耐受性的基础, 对养殖过程中避免缺氧死亡具有重要意义。一般来讲, 水生动物在强酸或强碱的胁迫下会使得机体酸碱平衡被破坏、酶活性被抑制, 为了维持内稳态而导致呼吸作用加强, 窒息点上升。Zhang 等(2006) 研究发现, 凡纳滨对虾在 pH 为 7.56 时的窒息点最低, 升高或降低 pH 都会提高窒息点。尼罗罗非鱼(*Tilapia nilotica*) 幼鱼的窒息点在 pH 为 8.06 时最低, 增加或降低 pH 也会提高窒息点(王辉等 2011)。与上述研究结果不同的是, 中华小长臂虾在各 pH 条件下的窒息点均未有显著性差异, 说明在本实验的 pH 范围内并没有影响到中华小长臂虾对低氧的耐受能力。

从以上结果可以看出, 中华小长臂虾对 pH 有很强的耐受性, 但不同的 pH 会影响到中华小长臂虾的呼吸代谢以及能量供给方式。

参 考 文 献

- Allan G L, Maguire G B. 1992. Effects of pH and salinity on survival, growth and osmoregulation in *Penaeus monodon* Fabricius. *Aquaculture*, 107(92): 33-47.
- Chen J C, Lin C Y. 1995. Responses of oxygen consumption, Ammonia-N excretion and Urea-N excretion of *Penaeus chinensis* exposed to ambient ammonia at different salinity and pH levels. *Aquaculture*, 136(3/4): 243-255.
- Chen S M, Chen J C. 2003. Effects of pH on survival, growth, molting and feeding of giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquaculture*, 218(1/4): 613-623.
- Ikeda T. 1974. Nutrition ecology of marine zooplankton. *Memoirs of the Faculty of Fisheries Hokkaido University*, 22(1): 1-97.
- Pan L Q, Zhang L J, Liu H Y. 2008. Effects of salinity and pH on ion-transport enzyme activities, survival and growth of *Litopenaeus vannamei* postlarvae. *Aquaculture*, 273(4): 711-720.
- Pan L, Jiang L, Miao J. 2005. Effects of salinity and pH on immune parameters of the white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Shellfish Research*, 24(4): 1223-1227.
- Savant K B, Amte G K. 1995. Influence of some environmental factors on respiratory responses in the tropical estuarine crab *Ilyoplax gangetica*. *Journal of Environmental Biology*, 16(4): 311-317.
- Taylor J R A, Gilleard J M, Allen M C, et al. 2015. Effects of CO₂-induced pH reduction on the exoskeleton structure and biophotonic properties of the shrimp *Lysmata californica*. *Scientific Reports*, 5: 10608. DOI: 10.1038/srep10608
- Wang W N, Wang A L, Chen L, et al. 2002. Effects of pH on survival, phosphorus concentration, adenylate energy charge and Na⁺-K⁺ ATPase activities of *Penaeus chinensis* Osbeck juveniles. *Aquatic Toxicology*, 60(1/2): 75-83.
- Zhang P, Zhang X, Jian L, et al. 2006. The effects of body weight, temperature, salinity, pH, light intensity and feeding condition on lethal DO levels of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Aquaculture*, 256(1/4): 579-587.
- Zhou J, Wang W N, Wang A L, et al. 2009. Glutathione S-transferase in the white shrimp *Litopenaeus vannamei*: Characterization and regulation under pH stress. *Comparative Biochemistry & Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 150(2): 224-230.
- 曹善茂, 宋博, 王利明, 等. 2015. 温度、盐度和 pH 对中华原钩虾呼吸和排泄的影响. *大连海洋大学学报*, (5): 519-523.
- 柴学军, 胡则辉, 徐君卓, 等. 2009. 盐度和 pH 对日本黄姑鱼幼鱼耗氧率和排氨率的影响. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 28(2): 146-150.
- 李新正, 刘瑞玉, 梁象秋. 2003. 中国长臂虾总科的动物地理学特

- 点. 生物多样性, 11(5): 393–406.
- 刘海春, 刘志国, 董学洪. 2011. 罗氏沼虾养殖池塘水质变化规律研究. 江苏农业科学, 39(6): 397–399.
- 刘凯, 徐东坡, 段金荣, 等. 2010. 体质量和水温对太湖秀丽白虾人工驯养子代耗氧率和排氨率的影响. 生态学杂志, 29(5): 957–962.
- 刘伟, 丁君, 李润玲, 等. 2014. 黄、渤海沿岸海水养殖池塘冰期环境因子变化的研究. 大连海洋大学学报, 29(1): 51–56.
- 石玉龙, 段登选, 王志忠, 等. 2009. 重盐碱地养殖池塘水化学特性的研究. 海洋湖沼通报, (2): 49–58.
- 王丑明, 谢志才, 宋立荣, 等. 2011. 滇池大型无脊椎动物的群落演变与成因分析. 动物学研究, 32(2): 212–221.
- 王辉, 强俊, 李瑞伟. 2011. 温度、盐度、pH 和体质量对尼罗罗非鱼幼鱼窒息点的影响. 广东海洋大学学报, 31(3): 37–42.
- 王维娜, 牛东红, 商利新, 等. 2004. 低温对日本沼虾耗氧率、排氨率和 Na^+/K^+ ATPase 比活力的影响. 应用与环境生物学报, 10(5): 602–604.
- 王芸, 李健, 李吉涛, 等. 2011. pH 胁迫对中国明对虾抗氧化系统酶活力及基因表达的影响. 中国水产科学, 18(3): 556–564.
- 吴一挺, 王志铮, 杨磊, 等. 2011. pH 对日本沼虾耗氧率及鳃组织 CAT、SOD 活力的影响. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 30(6): 503–506.
- 杨富亿, 李秀军, 刘兴土, 等. 2009. 松嫩平原退化芦苇湿地恢复模式. 湿地科学, 7(4): 306–313.
- 杨富亿, 李秀军, 刘兴土. 2012. 沼泽湿地生物碳汇扩增与碳汇型生态农业利用模式. 农业工程学报, 28(19): 156–162.
- 杨富亿, 李秀军, 杨欣乔. 2005. 日本沼虾幼虾对碱度和 pH 的适应性. 动物学杂志, 40(6): 74–79.
- 杨富亿, 孙丽敏, 杨欣乔. 2004. 南美白对虾对内陆碳酸盐型盐碱水环境适应性研究 II. 淡化幼虾对 pH 值的适应能力. 水产养殖, 25(6): 26–28.
- 于天基, 李健, 李吉涛, 等. 2015. pH 胁迫对脊尾白虾抗氧化酶活力的影响. 海洋科学, 39(5): 47–53.
- 张静, 于洪贤. 2009. 松花江哈尔滨段春季底栖动物群落结构研究及水质评价. 水产学杂志, 22(2): 40–45.
- 章龙珍, 杨金海, 刘鉴毅, 等. 2009. 温度、盐度、pH 和麻醉剂对长鳍篮子鱼幼鱼耗氧率的影响. 生态学杂志, 28(8): 1494–1498.
- 朱爱意, 赵向炯, 付俊. 2007. 褐菖鲉耗氧率及窒息点的初步研究. 渔业科学进展, 28(1): 95–100.