

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16151

三种鳅科鱼对 NaCl 盐度和 NaHCO₃ 碱度的耐受能力

武鹏飞^{1,2}, 耿龙武¹, 姜海峰¹, 佟广香¹, 李晨宇¹, 徐伟¹

1. 中国水产科学研究院 黑龙江水产研究所, 黑龙江 哈尔滨 150070;

2. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306

摘要: 以鳅科的黑龙江泥鳅(*Misgurnus mohoity* Dybowsky)、大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus* Sauvage)、达里湖高原鳅(*Triplophysa dalaica*)为实验材料, 采用单因子静态急性毒性实验法和均匀正交设计法对其盐碱耐受能力进行研究。实验结果表明, 黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅、达里湖高原鳅的 24 h 和 96 h 的氯化钠(NaCl)盐度半致死浓度(LC₅₀)分别为 15.64 g/L 和 13.58 g/L、15.43 g/L 和 14.18 g/L、14.00 g/L 和 11.57 g/L, 安全浓度(SC)分别为 4.12 g/L、4.03 g/L、3.74 g/L, 盐度耐受能力顺序为: 黑龙江泥鳅 > 大鳞副泥鳅 > 达里湖高原鳅。黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅、达里湖高原鳅的 24 h 和 96 h 碳酸氢钠(NaHCO₃)碱度半致死浓度(LC₅₀)分别为 117.1 mmol/L 和 72.62 mmol/L、128.4 mmol/L 和 88.83 mmol/L、155.2 mmol/L 和 120.0 mmol/L, 安全浓度分别为 18.77 mmol/L、23.66 mmol/L、36.30 mmol/L, 碱度耐受能力顺序为: 达里湖高原鳅 > 大鳞副泥鳅 > 黑龙江泥鳅。盐碱交互作用对黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅均表现为协同作用, 协同系数 0~48 h 依次增高, 以后逐渐减小; 而对达里湖高原鳅在 0~48 h 内表现为协同作用, 在 48~96 h 时表现为拮抗作用, 拮抗系数随着暴露时间的延长而增大。对比分析可知, 3 种鳅科鱼的盐碱耐受能力比大多数淡水鱼高, 可作为盐碱水域的增养殖鱼类; 而达里湖高原鳅在耐碱方面表现更突出, 可以作为高碳酸盐型盐碱水的增养殖鱼类。

关键词: 黑龙江泥鳅; 大鳞副泥鳅; 达里湖高原鳅; 鳅科; 盐度; 碱度; 耐受能力

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)02-0248-10

中国约有 0.64 亿 hm² 的低洼盐碱水域资源, 主要分布中国东北、西北、华北等内陆地区。这类盐碱水质具有高盐、高碱、高 pH 值、离子系数高、水质类型繁多以及主要离子比例失衡等特点, 表现为生物资源贫瘠、渔业水平较低、生态环境脆弱等现象, 因而一直得不到有效的利用^[1]。大量实践表明“以渔改碱”不仅是应对中国淡水资源短缺、发展可持续渔业的有效办法, 而且对改善盐碱水域生态环境也具有重要的意义^[2]。中国经过 20 多年的科研攻关, 在盐碱水养殖的水质改良调控技术方法方面取得了实质性的进展, 但在耐盐碱养殖品种的基础性研究方面较为薄弱, 缺

乏适宜中国不同盐碱区域水质特点的主导养殖技术, 并存在品种单一、经济价值不高的问题^[1-2]。

目前, 研究人员对青海湖裸鲤(*Gymnocypris przewalskii*)^[3]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[4]、大鳞鲃(*Barbus capito*)^[5-7]、威海卡拉白鱼(*Chalcalburnus chalcoides aralensis*)^[8]、鲫(*Carassius auratus*)^[9-10]、黄鳝(*Monopterus albus*)^[11]等淡水真骨鱼类的盐碱耐受能力进行了较多的研究, 但对鳅科鱼的研究报道较少。黑龙江泥鳅(*Misgurnus mohoity* Dybowsky)属于泥鳅属(*Misgurnus*), 为东北地区土著种, 具有较强的抗寒能力^[12]; 大鳞副泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus* Sauvage)属于副泥

收稿日期: 2016-05-25; 修订日期: 2016-08-12.

基金项目: “十二五”科技支撑计划项目(2012BAD25B09); 哈尔滨市科技攻关计划项目(2012AA6CN037); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HSY201403); 中国水产科学研究院基本科研业务费资助项目(2016ZD0602).

作者简介: 武鹏飞(1990-), 男, 硕士研究生, 从事水产遗传育种研究. E-mail: shoupfwu101@163.com

通信作者: 徐伟, 研究员, 从事水产遗传育种研究. E-mail: xuwei@hrfri.ac.cn

鳅属(*Paramisgurnus*), 生长快, 个体大, 是目前人工养殖的主要泥鳅种类; 达里湖高原鳅(*Triplophysa dalaica*)属于高原鳅属(*Triplophysa*), 生存于达里湖盐碱水中, 具有较强的碱度耐受能力及抗逆性^[13-14]。为了适应东北地区盐碱水域的特殊环境, 需要综合考虑这 3 种鳅科鱼的耐寒、生长和抗盐碱的遗传特性, 因此, 本研究选取这 3 种鳅科鱼作为研究对象, 通过测定和比较 3 种鳅科鱼对氯化钠盐度、碳酸氢钠碱度以及盐碱交互的耐受性, 探讨这 3 种鳅科鱼在东北地区盐碱水域养殖的可行性, 筛选出适宜于东北地区碳酸盐型盐碱水域养殖的鳅科鱼, 以期为中国内陆高盐碱地区水域中开展鳅科鱼养殖提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

实验用鱼均为 2 龄以上的商品鱼或成鱼: 黑龙江泥鳅与大鳞副泥鳅均购自哈尔滨呼兰水产市场。黑龙江泥鳅为松花江流域野生泥鳅, 体长(12.72±0.85) cm, 体重(16.3±0.53) g; 大鳞副泥鳅为南方地区人工池塘养殖泥鳅, 体长(17.25±0.73) cm, 体重(47.32±0.88) g; 达里湖高原鳅 8 月采自达里湖, 体长(9.36±1.23) cm, 体重(8.72±1.20) g。选取体质健壮, 无伤病, 规格整齐的个体作为实验鱼。实验前在水族箱内暂养 10 d, 直至实验鱼游泳、摄食情况稳定, 实验前 24 h 停止喂食。

实验用水为曝气 24 h 的自来水, 各项指标符合《渔业水质标准》(GB 11607-89)。水温为(20±2)℃, pH 为 8.30, 溶解氧为 6.01 mg/L, 氨氮为 0.41 mg/L, 盐度为 0.29 g/L, 总碱度为 6.88 mmol/L。实验容器为透明有盖塑料水槽(25 cm×25 cm×35 cm)。

实验用化学药剂均为国产分析纯。

1.2 实 验 方 法

实验前进行预实验, 获得 3 种鱼的 24 h 全部死亡最低浓度和 96 h 全部存活最高浓度。单盐、单碱的单一因素实验根据预实验结果采用等对数间距法^[15]设置 5 个浓度梯度以及 1 个对照组, 盐碱交互的双因素实验浓度采用单独作用实验时各

质量浓度的 50%, 然后按照等水平均匀设计表 U₅(5³)要求设计 5 个质量浓度组^[16], 每个浓度梯度设置 4 个平行组, 每个平行组 8 尾鱼。实验所需溶液在实验前配置好, 静置稳定 24 h 后测定, 使用盐度计测定水体盐度, 盐酸甲基橙标定法测定碱度, 并进行校正。

整个实验过程中每个实验组 10 L 溶液, 水温保持在(22±1)℃, 保持充气, 为保持水体的清洁稳定, 每天换水 1/3 (预实验发现鳅科鱼类在受到盐、碱刺激时会分泌大量的黏液, 水色变黄), 实验进行 96 h, 连续观察记录前 12 h 鱼在实验中的表现状况并记录 24 h、48 h、72 h、96 h 的死亡数目。死亡鱼的判定标准为鱼鳃停止运动, 躺于水底, 轻触无反应。及时捞出死亡个体。

1.3 数 据 处 理

实验结果数据采用 Excel 整理, SPSS17.0 进行分析。

单一因素实验结果运用改良寇氏法^[17]分析计算半致死浓度以及 95% 置信区间:

$$\lg LC_{50} = X_m - d(\sum p_i - 0.5)$$

$$95\% \text{ 置信区间} = \lg^{-1}(\lg LC_{50} \pm 1.96SD)$$

$$SD = d \sqrt{\frac{\sum p_i - \sum p_i^2}{n}}$$

式中, X_m 为最高浓度对数, d 为浓度对数差, p_i 为死亡率, n 为实验动物数, SD 为标准差。

安全浓度采用鱼类急性毒性实验经验公式^[17]估计安全浓度(safe concentration, SC, %):

$$SC = 48 \text{ h } LC_{50} \times 0.3 / (24 \text{ h } LC_{50} / 48 \text{ h } LC_{50})^2$$

双因素数据分析将盐度以及碱度的浓度均换算为水中所含溶质的质量分数, 实验结果运用 SPSS17.0 进行二次多项式进入回归分析, 得出实验浓度与死亡率之间拟合度较好($R^2 > 0.95$, $P < 0.05$)的回归模型方程^[14]。

2 结 果 与 分 析

2.1 盐 度 胁 迫 对 3 种 鱼 的 毒 性 影 响

对照组中实验鱼行为正常, 水质清澈。但在盐度胁迫下, 实验组的鱼反应较为强烈, 具体表现为鳃盖活动加快, 快速乱游, 贴壁上蹿, 反应

强度随着盐度的增加而加强。3 种鳅科鱼的应激时间随着盐度的增加而延长,但应激反应强度随盐度和鱼的种类不同而各异。最高浓度组的实验鱼开始死亡时间并不一致,黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅、达里湖高原鳅分别为 8 h(盐度 19.00 g/L)、6 h(盐度 18.00 g/L),和 9 h(盐度 15.00 g/L)。死亡前实验鱼表现为侧翻,不能正常游动,鳃盖运动幅度变大,反应迟钝且无力,鳃丝发红,鱼体扭曲不能恢复。实验鱼死亡后,鱼体无光泽,体表黏膜脱落,花纹不明显,鱼鳍充血。

3 种鱼在盐度条件下的累计死亡率见表 1。3 种鳅科鱼的死亡率均随时间的延长、盐度的增大而升高,且超过一定的盐度后,实验鱼出现快速死亡的现象。黑龙江泥鳅在盐度为 13.44 g/L 时 48 h 内未出现死亡,在盐度达到 15.98 g/L 时死亡率突然升高(24 h 为 62.50%、72 h 全部死亡),在 19.00 g/L 时 24 h 全部死亡。大鳞副泥鳅在 24 h 盐度为 14.07 g/L 时死亡率较低,在盐度为 15.91 g/L 时死亡率达到 68.75%,在盐度为 18.00 g/L 时全部死亡。达里湖高原鳅 48 h 内在盐度为 12.25 g/L 时死亡率较低,在 13.55 g/L 时死亡率为 43.75%,当达到 15.00 g/L 时 24 h 全部死亡。

2.2 碱度胁迫对 3 种鱼的毒性影响

在碱度胁迫条件下,实验鱼表现出的行为反应与盐度胁迫下的表现并不一致,其应激反应不如在盐度胁迫下剧烈。但在高碱度条件下,鱼体分泌的黏液更多,水质浑浊较快且含有大量泡沫。黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅会出现体色变黑,上下翻腾,窜出水面等情况;达里湖高原鳅会出现体色变浅,唇须以及胸鳍、臀鳍、尾鳍充血,表现较为平静,一般聚群静止于角落。

3 种鱼在碱度条件下的累计死亡率见表 2。不同于盐度胁迫下死亡率的急剧变化,3 种鳅科鱼在碱度胁迫下的死亡率为连续性变化。黑龙江泥鳅 24 h 时在碱度为 80.62 mmol/L 条件下出现死亡,碱度为 102.3 mmol/L 时死亡率为 25.0%,当碱度达到 130.0 mmol/L 时超过半数死亡,并在 48 h 全部死亡。大鳞副泥鳅在 48 h 碱度为 83.24 mmol/L 时开始出现死亡,碱度为 117.7 mmol/L 时死亡数达到一半以上,而当碱度达到 140 mmol/L 时全部

死亡。达里湖高原鳅在 48 h 碱度为 130.4 mmol/L 时开始出现死亡,当碱度达到 148.9 mmol/L 时接近半数死亡,而当碱度达到 170.0 mmol/L 时 24 h 全部死亡。

表 1 3 种鳅科鱼在不同盐度下的死亡率
Tab. 1 Mortality of three fishes in Cobitidae at different salinities %

种类 species	盐度 $S/$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) salinity	暴露时间/h exposure time				
		12	24	48	72	96
黑龙江泥鳅 <i>M. mohoity</i>	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	11.30	0.00	0.00	0.00	0.00	12.50
	13.44	0.00	0.00	0.00	18.75	31.25
	15.98	18.75	62.50	87.50	100.0	100.0
大鳞副泥鳅 <i>P. dabryanus</i>	19.00	68.75	100.0	100.0	100.0	100.0
	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12.44	0.00	0.00	0.00	12.50	12.50
	14.07	6.25	6.25	18.75	31.25	37.50
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	15.91	37.50	68.75	93.75	93.75	93.75
	18.00	68.75	100.0	100.0	100.0	100.0
	10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	11.07	0.00	0.00	0.00	6.25	25.00
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	12.25	0.00	0.00	12.50	25.00	37.50
	13.55	0.00	18.75	43.75	81.25	93.75
	15.00	62.50	100.0	100.0	100.0	100.0

表 2 3 种鳅科鱼在不同碱度下的死亡率
Tab. 2 Mortality of three fishes in Cobitidae at different alkalinities %

种类 species	碱度 $A/$ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) alkalinity	暴露时间/h exposure time				
		12	24	48	72	96
黑龙江泥鳅 <i>M. mohoity</i>	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	63.50	0.00	0.00	12.50	25.00	25.00
	80.62	0.00	6.25	25.00	56.25	81.25
	102.4	6.25	25.00	43.75	62.50	87.50
大鳞副泥鳅 <i>P. dabryanus</i>	130.0	31.25	62.50	100.0	100.0	100.0
	70.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	83.24	0.00	0.00	18.75	31.25	43.75
	99.00	0.00	0.00	18.75	43.75	68.75
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	117.7	0.00	25.00	56.25	100.0	100.0
	140.0	37.50	75.00	100.0	100.0	100.0
	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	114.2	0.00	0.00	0.00	25.00	37.50
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	130.4	0.00	0.00	37.50	62.50	75.00
	148.9	0.00	18.75	43.75	100.0	100.0
	170.0	43.75	100.0	100.0	100.0	100.0

2.3 3 种鳅科鱼在盐度和碱度胁迫下的半致死浓度

3 种鱼的急性盐度和碱度半致死浓度见表 3。从表 3 可知, 黑龙江高原鳅 24 h、48 h、72 h、96 h 半致死盐度分别为 15.64 g/L、14.97 g/L、14.18 g/L、13.58 g/L, 安全浓度为 4.12 g/L; 大鳞副泥鳅 24 h、48 h、72 h、96 h 半致死盐度分别为 15.43 g/L、14.74 g/L、14.29 g/L、14.18 g/L, 安全浓度为 4.03 g/L; 达里湖高原鳅 24 h、48 h、72 h、96 h 半致死盐度分别为 14.00 g/L、13.47 g/L、12.56 g/L、11.57 g/L, 安全浓度为 3.74 g/L。从结果可以得出, 3 种鱼的盐度耐受能力顺序为: 黑龙江泥鳅 > 大鳞副泥鳅 > 达里湖高原鳅。

黑龙江泥鳅 24 h、48 h、72 h、96 h 半致死碱度为 117.1 mmol/L、95.01 mmol/L、81.84 mmol/L、72.62 mmol/L, 安全浓度为 18.77 mmol/L; 大鳞副泥鳅 24 h、48 h、72 h、96 h 半致死碱度分别为 128.4 mmol/L、109.1 mmol/L、94.80 mmol/L、88.83 mmol/L, 安全浓度为 23.66 mmol/L; 达里湖高原鳅 24 h、48 h、72 h、96 h 半致死碱度分别为 155.2 mmol/L、142.8 mmol/L、124.1 mmol/L、120.0 mmol/L, 安全浓度为 36.30 mmol/L。从结果可以得出, 3 种鱼的碱度耐受能力顺序: 达里湖高

原鳅 > 大鳞副泥鳅 > 黑龙江泥鳅。

2.4 盐碱胁迫对 3 种鱼的毒性影响

在盐碱交互条件下, 高盐碱度实验组有乱游现象出现。其中大鳞副泥鳅表现最为强烈, 在进入水体后翻腾乱游, 跃出水面, 贴壁向上窜起, 一段时间后反应减弱。随着实验的进行, 黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅体色变深, 达里湖高原鳅体色变浅, 体表分泌大量的黏液, 且随着盐度、碱度的升高, 应激反应逐渐加强。盐碱交互作用下 3 种鳅科鱼的死亡率见表 4。3 种鳅科鱼的死亡率随着溶液中盐度、碱度的升高和暴露时间的延长而升高。

对数据进行二次多项式回归分析, 获得拟合度较好的回归方程(表 5)。从回归方程分析得知: 在所有回归模型中, 盐度的死亡系数表现为一元一次方程, 而碱度表现为一元二次方程。在实验期间, 盐度与碱度均有交互作用。其中, 黑龙江泥鳅与大鳞副泥鳅在 96 h 内盐碱交互系数均为正值, 表现为协同作用, 表明盐碱联合毒性作用强于单一盐度或碱度, 0~48 h 依次增高, 以后逐渐减小。盐碱交互对达里湖高原鳅在 0~48 h 内表现为协同作用, 但协同系数逐渐减小, 而在 72~96 h 内表现为拮抗作用, 且拮抗系数逐渐增大。

表 3 3 种鳅科鱼的急性盐度和碱度半致死浓度
Tab. 3 Acute LC₅₀ of three fishes in Cobitidae at different salinities and alkalinities

种类 species	暴露时间/h exposure time	盐度 S/(g·L ⁻¹) salinity		碱度 A/(mmol·L ⁻¹) alkalinity	
		LC ₅₀	SC	LC ₅₀	SC
黑龙江泥鳅 <i>M. mohoity</i>	24	15.64(16.57~14.75)	4.12	117.1(131.3~104.4)	18.77
	48	14.97(15.58~14.39)		95.01(107.3~84.01)	
	72	14.18(14.86~13.53)		81.84(93.69~73.84)	
	96	13.58(14.54~12.68)		72.62(81.14~65.00)	
大鳞副泥鳅 <i>P. dabryanus</i>	24	15.43(16.14~14.76)	4.03	128.4(138.2~119.3)	23.66
	48	14.74(15.33~14.17)		109.1(119.3~99.83)	
	72	14.29(15.06~13.55)		94.80(102.9~87.38)	
	96	14.18(14.97~13.43)		88.83(96.38~81.88)	
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	24	14.00(14.38~13.61)	3.74	155.2(160.9~149.7)	36.30
	48	13.47(14.04~12.92)		142.8(152.2~134.0)	
	72	12.72(13.30~12.17)		124.1(131.7~116.9)	
	96	12.17(12.77~11.59)		120.0(127.4~113.0)	

注: 括号中数值为 95% 置信区间。

Note: The values in brackets are 95% confidence intervals.

表 4 3 种鳅科鱼在盐碱联合毒性下的死亡率
Tab. 4 Mortality of three fishes in Cobitidae under combines effect of salinity and alkalinity

种类 species	盐度 S /(g·L ⁻¹) salinity	碱度 A /(mmol·L ⁻¹) alkalinity	暴露时间/h exposure time				
			12	24	48	72	96
黑龙江泥鳅 <i>M. mohoity</i>	4.75	31.75	0.00	0.00	0.00	18.75	25.00
	5.65	51.19	0.00	12.50	18.75	43.75	56.25
	6.72	25.00	0.00	6.25	6.25	18.75	25.00
	8.00	40.31	0.00	6.25	18.75	37.50	68.75
	9.50	65.00	0.00	56.25	87.50	100.0	100.0
大鳞副泥鳅 <i>P. dabryanus</i>	5.50	41.62	0.00	0.00	0.00	12.50	25.00
	6.22	58.86	0.00	18.75	25.00	37.50	56.25
	7.03	35.00	0.00	0.00	0.00	6.25	18.75
	7.96	49.50	12.50	31.25	56.25	68.75	68.75
	9.00	70.00	18.75	50.00	100.0	100.0	100.0
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	5.00	57.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5.53	74.44	0.00	18.75	37.50	50.00	81.25
	6.12	50.00	0.00	0.00	0.00	12.50	25.00
	6.78	65.20	0.00	12.50	25.00	68.75	93.75
	7.50	85.00	43.75	68.75	100.0	100.0	100.0

表 5 3 种鳅科鱼在盐碱联合毒性下的回归模型
Tab. 5 The regression model of joint effect salinity and alkalinity of three fish species

种类 species	暴露时间/h exposure time	回归方程 regression equation	相关系数 R^2 correlation coefficient
黑龙江泥鳅 <i>M. mohoity</i>	24	$Y=0.642-0.106S-4.394A+6.596A^2+0.875C_{SA}$	0.964
	48	$Y=0.570-0.341S-4.147A+5.263A^2+2.552C_{SA}$	0.965
	72	$Y=0.365-0.244S-2.008A+3.406A^2+1.826C_{SA}$	0.983
	96	$Y=-1.027+0.490S+4.894A-6.000A^2+1.307C_{SA}$	0.987
大鳞副泥鳅 <i>P. dabryanus</i>	24	$Y=-1.334+0.098S+4.602A-5.899A^2+2.041C_{SA}$	0.972
	48	$Y=-1.398-1.286S+5.703A-11.237A^2+7.725C_{SA}$	0.996
	72	$Y=-1.993-1.323S+9.361A-15.395A^2+7.563C_{SA}$	0.975
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	96	$Y=-1.776-0.77S+7.537A-9.381A^2+3.301C_{SA}$	0.983
	24	$Y=2.457-2.285S-8.131A+5.590A^2+5.110C_{SA}$	0.984
	48	$Y=1.658-1.022S-7.556A+7.382A^2+3.301C_{SA}$	1.000
	72	$Y=-5.385+4.566S+11.194A-6.303A^2-3.387C_{SA}$	0.996
	96	$Y=-11.415+13.785S+22.540A-7.130A^2-19.400C_{SA}$	0.997

注: Y 为死亡系数, S 为盐度, A 为碱度, A^2 为碱度平方, C_{SA} 为盐度碱度积。

Note: Y is mortality in different times; S is salinity; A is alkalinity; A^2 is the square of alkalinity; C_{SA} is the product of salinity and alkalinity.

3 讨论

3.1 盐度对 3 种鳅科鱼的毒理作用

盐度是养殖水化环境一个重要的理化因子, 一定盐度可以使机体保持良好的生长性能和免疫功能^[18], 超过一定的限度后会影响到鱼的生长发育, 甚至导致死亡^[19]。本研究中, 3 种鳅科鱼对盐度的耐受能力表现为“阈值型”, 即当盐度超过一定限

度后, 实验鱼随着盐度的升高而出现迅速死亡的现象, 这与杨建等^[7]对大鳞鲃等 5 种幼鱼以及郑伟刚^[9, 20]等对彭泽鲫、花鲈幼鱼的盐度耐受能力的研究中观察到的现象相一致。导致这种现象的原因可能是鱼体在进入高盐环境时, 由于水环境渗透压和离子浓度要高于血浆, 为补偿水分丢失以及提高血浆渗透压, 必须摄入大量的高盐水^[21], 鱼体的渗透压调节体系不能在较短时间内

完成“保水排盐”的渗透调节^[13], 机体吸收的大量盐分不能排出, 失去的水分不能获得补充, 导致机体渗透压平衡的破坏和血液浓缩, 进而导致其迅速死亡^[19]。

3 种鳅科鱼在相对较低盐度实验组(黑龙江泥鳅 11.30~13.44 g/L、大鳞副泥鳅 12.44~14.07 g/L、达里湖高原鳅 11.07~12.55 g/L)经过一段时间的胁迫也会发生死亡现象。研究表明, 实验鱼在适应从低渗环境转变为高渗环境的过程中, 鱼鳃的结构^[10]和生理机能^[22]会产生明显的适应性改变, 特别是鱼鳃丝中 NKA 酶(Na⁺/K⁺-ATPase)活性受到抑制^[23], 造成细胞膜通透性降低, 从而导致细胞的形态、结构和功能异常甚至出现异质性损伤^[24], 离子交换受阻, 当应激时间超过一定限度时, 鱼体则出现死亡现象。另外, 当环境中的盐度高于鱼体渗透压时, 盐度作为鱼类代谢的阻碍因子(masking factor)会对代谢系统强加一个额外负担, 使其耗费更多的能量以调节体内稳态的平衡^[25-26], 能量代谢的不足也可能是其在盐度胁迫下死亡的原因之一。

3.2 碱度对 3 种鳅科鱼的毒理作用

碱度是盐碱水域养殖的重要化学指标之一, 水中的 HCO₃⁻、CO₃²⁻ 构成缓冲系统, 对维持水体 pH 以及离子稳态具有重要作用。但高碱度对鱼类的毒性不仅影响鱼体内的血清渗透压平衡, 还可以通过 HCO₃⁻、CO₃²⁻ 等离子直接作用于鱼类的鳃器官表面^[27], 影响 Na⁺-HCO₃⁻ 转运蛋白酶^[28](NBCe1)、碳酸酐酶^[29](CA)等酶的活性, 破坏鳃小片表皮细胞的离子交换体系, 使体内酸碱缓冲体系和细胞膜通透性遭到破坏^[30], 无法正常排出这些离子, 导致鱼的死亡。本研究中发现, 高碱度条件下死亡率较高, 死亡前实验鱼出现呼吸困难, 死亡个体出现鱼鳍充血、鳃部和鱼体分泌大量黏液的现象, 同杨建等^[7]对大鳞鲃等 5 种幼鱼的碱度耐受能力以及周文宗等^[11]对黄鳝的碱度耐受能力研究中观察到的结果相似。另外, 在环境胁迫下, 代谢速率加快, 氨氮生成量增加, 而在高碱度条件下的氨排放明显被抑制, 导致血氨含量升高, 从而发生氨中毒, 这也是鱼类在高碱度条件下出现死亡的一个重要原因^[31]。

3.3 3 种鳅科鱼对盐度、碱度的耐受能力比较

本研究中的 3 种鳅科鱼和文献报道的 12 种淡水鱼类在盐度和碱度胁迫下的 24 h、96 h 半致死浓度如表 6 所示。尽管不同研究中实验鱼的规格和实验条件存在较大的差异, 不能简单地将不同种类鱼类的盐碱耐受能力进行排序, 但是从表 6 可以大致看出, 在盐度耐受能力方面: 滩头雅罗鱼、尼罗罗非鱼、威海卡拉白鱼、青海湖裸鲤耐盐性强(24 h 盐度 LC₅₀>20), 而黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅、达里湖高原鳅、大鳞鲃、草鱼、松浦镜鲤、达里湖鲫、淡水白鲟耐盐能力较强, 鲢、彭泽鲫的盐度耐受能力相对较低(96 h 盐度 LC₅₀<10)。本研究中, 3 种鳅科鱼仅低于青海湖裸鲤、尼罗罗非鱼、黄鳝、威海卡拉白鱼、滩头雅罗鱼, 表现出较强的耐盐性, 3 种鳅科鱼中耐盐能力最低的为达里湖高原鳅。在碱度耐受能力方面: 青海湖裸鲤、达里湖高原鳅、大鳞鲃、威海卡拉白鱼的耐碱性强(24 h 碱度 LC₅₀>130 mmol/L), 黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅、尼罗罗非鱼、黄鳝、滩头雅罗鱼、松浦镜鲤、草鱼、鲢具有相对较高的碱度耐受能力, 而彭泽鲫、达里湖鲫、淡水白鲟的碱度耐受能力相对较低(24 h 碱度 LC₅₀<85 mmol/L)。3 种鳅科鱼的碱度耐受能力, 仅低于威海卡拉白鱼、青海湖裸鲤、大鳞鲃、镜鲤, 高于其他淡水鲤科鱼类。研究显示^[39], 碳酸盐对鱼类毒性作用后提出了以总碱度 10 mmol/L 作为常见淡水鱼养殖用水的危险指标。本研究中黑龙江泥鳅、大鳞副泥鳅、达里湖高原鳅的碳酸盐碱度安全浓度分别为 18.77 mmol/L、23.66 mmol/L、36.30 mmol/L, 说明鳅科鱼类具有较高的碱度耐受能力。

研究表明, 具有耐高碱性的鱼类可能通过降低体内氨氮排泄速率或将积累的氨转化为无毒的氨基酸或尿素, 而尿素^[23]或氨基酸^[33-34]在碱性水环境中作为其他离子调节渗透压的补充, 增强了鱼体在高碱水域中的渗透调节能力, 从而提高了对高碱水域的适应性, 而达里湖高原鳅的对达里湖高碱胁迫的适应性机理有待进一步研究。值得注意的是, 本研究中达里湖高原鳅碳酸氢钠碱度安全浓度为 36.30 mmol/L, 远低于达里湖中的总碱度(>53.57 mmol/L)^[35], 说明达里湖高原鳅可能受

表 6 常见淡水鱼种类在不同实验时间下的半致死浓度(LC₅₀)
 Tab. 6 LC₅₀ values of salinity and alkalinity of freshwater species in different time

种类 species	(S)LC ₅₀ /(g·L ⁻¹)		(A)LC ₅₀ /(mmol·L ⁻¹)		规格 size	文献来源 reference
	24 h	96 h	24 h	96 h		
黑龙江泥鳅 <i>M. mohoity</i>	15.64	13.58	117.10	72.62	(16.3±0.53) g	本研究 this study
大鳞副泥鳅 <i>P. dabryanus</i>	15.43	14.18	128.38	88.83	(47.32±0.88) g	本研究 this study
达里湖高原鳅 <i>T. dalaica</i>	14.00	12.17	155.18	120.00	(8.72±1.20) g	本研究 this study
青海湖裸鲤 <i>G. przewalskii</i>	21.15	18.20	165.02	150.18	(12.52±0.32) g	[3]
尼罗罗非鱼 <i>O. niloticus</i>	23.08	21.81	113.56	101.30	6.0~7.0 g	[4]
黄鳝 <i>M. albus</i>	17.63	15.46	109.15	75.94	(11.82±1.51) g	[12]
威海卡拉白鱼 <i>C. chalcoides aralensis</i>	22.61	21.24	137.55	112.23	2.60~4.62 g	[8]
滩头雅罗鱼 <i>T. brandtii</i> (Dybowski)	28.57	28.40	89.31	68.44	(5.85±0.5) g	[24]
大鳞鲃 <i>B. capito</i>	13.38	11.74	145.01	123.33	—	[6~7]
草鱼 <i>C. idellus</i>	11.75	10.69	106.30	92.94	—	[6~7]
松浦镜鲤 <i>Cyprinus carpio songpu</i>	12.78	10.69	119.41	114.26	—	[6~7]
鲢 <i>H. molitrix</i>	10.87	9.38	94.33	86.25	—	[6~7]
彭泽鲫 <i>C. auratus</i> var.pengze	10.00	6.68	71.71	59.87	3.26~3.68 g	[9]
达里湖鲫 <i>C. auratus</i> Linnaeus	11.57	10.61	71.93	63.42	(4.1±0.47) cm	[10]
淡水白鲳 <i>C. brachypomum</i> Cuvier	12.00	10.40	83.25	45.70	(2.9±0.05) cm	[32]

到一定程度的碱度胁迫影响。实际上,天然水体中的盐度和碱度对鱼类的毒性与不仅与鱼体的种类、大小、年龄、生活环境等因素^[9-10, 14, 36]密切相关,同时也受到水环境中的离子组成、水温、pH 和有机质含量等因子的影响^[37-38]。另外,近年来达里湖水源不断枯竭,导致水体碱度不断升高,碱度胁迫程度加剧,因此需要密切关注达里湖中鱼类的生理状况和种群变化。

3.4 盐碱对 3 种鳅科鱼的联合毒性作用

盐碱水对鱼类生理机能的影响是 pH、盐度、碱度、温度等多种因素综合作用的结果^[39]。目前,盐度和碱度对鱼类的联合毒性机理尚未明确。本研究中的盐度、碱度对黑龙江高原鳅、大鳞副泥鳅的联合毒性作用在 96 h 内均表现为协同作用,这与文献报道的盐碱交互对彭泽鲫^[11]、淡水白鲳幼鱼^[32]、鲢幼鱼^[40]等均表现为协同作用相一致。在盐碱混合条件下,鱼体对盐度、碱度不同的调节机制,可能是导致盐碱交互表现为协同作用的主要原因。例如,研究表明鳃是鱼在盐度和碱度胁迫条件下进行渗透压调节和离子运输的主要器官,在盐度胁迫条件下,主要是鱼鳃上皮细胞的泌氯细胞以及相关转运蛋白 NKA (Na⁺/K⁺-ATPase)、NKCC (Na⁺-K⁺-2Cl⁻协同转运蛋白)、NHE (Na⁺/H⁺交换转

运蛋白)、NCC (Na⁺/Cl⁻协同转运蛋白)、CFTR(囊性纤维化跨膜调控子)等参与鱼体的渗透压调节以及离子调节^[39];但在碱度胁迫下,参与多余 HCO₃⁻离子的分泌和排泄的离子转运蛋白家族为鳃表皮细胞中的 SLC26、SLC4 等以及碳酸酐酶(CA)^[29, 41]。梁从飞等^[42]在研究盐碱交互对尼罗罗非鱼的血液渗透压、鳃组织中碳酸酐酶(CA)以及 NBCel 基因 mRNA 的表达量的影响中,也认为盐碱混合条件下存在不同离子的协同作用。另外,在盐碱胁迫条件下不同调节机制的激活,会导致鱼体耗能相对增加^[25, 34],因此能量代谢不足也可能是其原因之一。

盐碱交互对达里湖高原鳅的联合毒性作用在 0~48 h 内表现为协同作用,在 48~96 h 内表现为拮抗作用,这与盐碱交互对达里湖鲫在 96 h 内表现为拮抗作用的结果相近^[12]。这可能与这两种鱼对达里湖的高碱度环境的适应性进化有关,可能在一定程度上反映出其具有更加完善的渗透调节以及离子排泄机制,但这是否为高碱度适应鱼类具有的特性还有待于进一步研究。

4 小结

本研究主要对 3 种不同生长环境下具有代表

性的鳅科鱼的盐度、碱度、盐碱交互的耐受能力进行实验探讨, 单因子实验表明, 3种鳅科鱼盐度耐受能力依次为: 黑龙江泥鳅 > 大鳞副泥鳅 > 达里湖高原鳅, 碱度耐受能力依次为: 达里湖高原鳅 > 大鳞副泥鳅 > 黑龙江泥鳅。从3种鳅科鱼对盐碱交互的适应性来看, 达里湖高原鳅在48 h后表现为拮抗作用, 表现出对盐碱胁迫的更高的适应性。以上结果不仅为鳅科鱼在盐碱水域中的养殖提供了实验数据, 而且为中国“以渔改碱”发展盐碱水域水产养殖提供新的养殖鱼种类。

参考文献

- [1] Shi Y L, Duan D X, Wang Z Z, et al. Studies on characteristics of water chemistry of culture ponds with heavy saline-alkaline soil[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2009(2): 49–58. [石玉龙, 段登选, 王志忠, 等. 重盐碱地养殖池塘水化学特性的研究[J]. 海洋湖沼通报, 2009(2): 49–58.]
- [2] Xu W, Geng L W, Jiang H F, et al. A review of development and utilization of fish culture in saline-alkaline water[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2015, 28(4): 44–47. [徐伟, 耿龙武, 姜海峰, 等. 浅析盐碱水域的鱼类养殖开发利用[J]. 水产学杂志, 2015, 28(4): 44–47.]
- [3] Liu J Y. Effect of saline-alkali stress on oxygen consumption, osmoregulation and ionic regulation of przewalski's naked carp, *Gymnocypris przewalskii*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [刘济源. 盐碱胁迫对青海湖裸鲤呼吸耗氧、渗透和离子调节的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [4] Liang C F, Jia J H, Zhang Y H, et al. Evaluation on salinity-alkalinity tolerance and growth of the first selection generation of *Oreochromis niloticus*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015(9): 115–119. [梁从飞, 笱金华, 张艳红, 等. 尼罗罗非鱼选育一代耐盐碱和生长性能评估[J]. 广东农业科学, 2015(9): 115–119.]
- [5] Xu W, Geng L W, Li C T, et al. The artificial propagation, embryonic development and saline-alkaline tolerant experiment of *Barbus capito*[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(2): 255–260. [徐伟, 耿龙武, 李池陶, 等. 大鳞鲃的人工繁殖、胚胎发育和耐盐碱测定[J]. 水产学报, 2011, 35(2): 255–260.]
- [6] Yang J, Xu W, Geng L W, et al. Effects of salinity on survival, gill and kidney tissue in juveniles of 5 species[J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(4): 7–12. [杨建, 徐伟, 耿龙武, 等. 盐度对5种幼鱼的生存及鳃、肾组织的影响[J]. 淡水渔业, 2014, 44(4): 7–12.]
- [7] Yang J, Xu W, Geng L W, et al. Effect of NaHCO₃ on survival and gill, kidney tissues in juveniles of 5 species[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014, 36(5): 1115–1121. [杨建, 徐伟, 耿龙武, 等. NaHCO₃ 碱度对5种幼鱼的生存及鳃、肾组织的影响[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(5): 1115–1121.]
- [8] Lin Y H, Geng L W, Lu J X, et al. Studies on tolerance of *Chalcalburnus chalcoides aralensis* to salinity and alkalinity[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2004, 26(5): 561–565. [蔺玉华, 耿龙武, 卢金星, 等. 威海卡拉白鱼对盐碱耐受性研究[J]. 吉林农业大学学报, 2004, 26(5): 561–565.]
- [9] Zheng W G, Zhang Z Q, Zhang M Z. Study on tolerance of *Carassius auratus* Pengze fingerlings to salinity and alkalinity[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2004, 9(2): 127–130. [郑伟刚, 张兆琪, 张美昭. 澎泽鲫幼鱼对盐度和碱度耐受性的研究[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2004, 9(2): 127–130.]
- [10] Zhou W J, Chang Y M, Liang L Q, et al. Toxic effects of salinity (NaCl) and alkalinity (NaHCO₃) on crucian carp *Carassius auratus* Linnaeus in Dali Lake[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(4): 340–346. [周伟江, 常玉梅, 梁利群, 等. 氯化钠盐度和碳酸氢钠碱度对达里湖鲫毒性影响的初步研究[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(4): 340–346.]
- [11] Zhou W Z, Song X F, Chen G F. Salinity and alkalinity tolerance of *Monopterus albus*[J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(3): 95–99. [周文宗, 宋祥甫, 陈桂发. 黄鳝对盐碱耐受性的研究[J]. 淡水渔业, 2014, 44(3): 95–99.]
- [12] Li Y J, Yu Z, Zhang M Z, et al. Genetic diversity in Chinese loach species analyzed by microsatellite DNA markers[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(12): 75–79. [李雅娟, 于卓, 张明昭, 等. 我国三种野生泥鳅遗传多样性的微卫星分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(12): 75–79.]
- [13] Wang Y, Yang L, Wu B, et al. Transcriptome analysis of the plateau fish (*Triplophysa dalaica*): Implications for adaptation to hypoxia in fishes[J]. Gene, 2015, 565(2): 211–220.
- [14] Geng L W, Jiang H F, Tong G X, et al. Study on the artificial propagation of *Triplophysa dalaica*[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2015, 28(6): 15–18. [耿龙武, 姜海峰, 佟广香, 等. 达里湖高原鳅人工繁殖技术初步研究[J]. 水产学杂志, 2015, 28(6): 15–18.]
- [15] Li H T, Zhou W Z, Gao H L, et al. Joint toxicity of salinity and alkalinity to oriental weather fish *Misgurnus anguillicaudatus* by uniform design[J]. Fisheries Science, 2006, 25(11): 563–566. [李洪涛, 周文宗, 高红莉, 等. 运用均匀设计法检验盐度和碱度对泥鳅的联合毒性作用[J]. 水产科学, 2006, 25(11): 563–566.]
- [16] Zhang G Q, Wang W X. A citation review on the uniform experimental design[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2013, 32(1): 89–99. [张国秋, 王文璇. 均匀试验设计方法应用综述[J]. 数理统计与管理, 2013, 32(1):

- 89–99.]
- [17] Gu B, Zhang Z, Li Y P, et al. Summary of median lethal dose and its calculation methods[J]. China Occupational Medicine, 2009, 36(6): 507–508, 511. [顾兵, 张政, 李玉萍, 等. 半数致死量及其计算方法概述[J]. 中国职业医学, 2009, 36(6): 507–508, 511.]
- [18] Wang Y, Zhuang P, Zhang L Z, et al. Effects of salinity on survival, growth and antioxidant defense system of *Siganus guttatus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(1): 66–73. [王好, 庄平, 章龙珍, 等. 盐度对点篮子鱼的存活、生长及抗氧化防御系统的影响[J]. 水产学报, 2011, 35(1): 66–73.]
- [19] Gonzalez R J. The physiology of hyper-salinity tolerance in teleost fish: a review[J]. Comp Biochem Physiol B, 2011, 182(3): 321–329.
- [20] Zheng W G, Zhang Z Q, Zhang M Z, et al. Toxicity of salinity and alkalinity to *Lateolabrax japonicus* fingerlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 116–118. [郑伟刚, 张兆琪, 张美昭, 等. 盐度与碱度对花鲈幼鱼的毒性研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 116–118.]
- [21] McCormick S D. The Hormonal Control of Osmoregulation in Teleost Fish. Encyclopedia of Fish Physiology[M]. San Diego: Academic Press, 2011: 1466–1473.
- [22] Martinez-alvarez R M, Sanz A, Garcia-Gallego M, et al. Adaptive branchial mechanisms in the sturgeon *Acipenser naccarii* during acclimation to saltwater[J]. Comp Biochem Physiol A, 2005, 141(2): 183–190.
- [23] Geng L W, Xu W, Li C T, et al. Influence of salinity and alkalinity on serum ion concentrations, serum osmosis and gill Na^+/K^+ -ATPase activity of *Barbus capito*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(2): 458–465. [耿龙武, 徐伟, 李池陶, 等. 盐碱对大鳞鲃血清渗透压、离子含量及鳃丝 Na^+/K^+ -ATP 酶活力的影响[J]. 中国水产科学, 2011, 18(2): 458–465.]
- [24] Chi B J, Liang L Q, Liu C L, et al. Adaptability of *Tribolodon brandti* (Dybowski) to NaCl concentration and alkalinity[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(3): 689–694. [池炳杰, 梁利群, 刘春雷, 等. 滩头雅罗鱼幼鱼对 NaCl 浓度和碱度的适应性分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 689–694.]
- [25] Urbina M A, Glover C N. Effect of salinity on osmoregulation, metabolism and nitrogen excretion in the amphidromous fish, inanga (*Galaxias maculatus*)[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2015, 473(1): 7–15.
- [26] Nordlie F G. Influences of body mass, temperature, oxygen tension, and salinity on respiratory oxygen consumption of cyprinodontoid fishes of three families[J]. Rev Fish Biol Fish, 2014, 24(24): 1–47.
- [27] Wood C M, Bergman H L, Bianchini A, et al. Transepithelial potential in the Magadi tilapia, a fish living in extreme alkalinity[J]. J Comp Physiol B, 2012, 182(2): 247–258.
- [28] Perry S F, Furimsky M, Bayaa M, et al. Integrated responses of $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ cotransporters and V-type H^+ -ATPases in the fish gill and kidney during respiratory acidosis[J]. Biochim Biophys Acta Biomembr, 2003, 1618(2): 175–184.
- [29] Purkerson J M, Schwartz G J. The role of carbonic anhydrases in renal physiology[J]. Kidney Int, 2007, 71(2): 103–115.
- [30] Zhao Y, Wu J W, Wang Y, et al. Role of miR-21 in alkalinity stress tolerance in tilapia[J]. Biochem Biophys Res Commun, 2016, 471(1): 26–33.
- [31] Wright P A, Iwama G K, Wood C M. Ammonia and urea excretion in Lahontan cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki henshawi*) adapted to highly alkaline Pyramid Lake (pH 9.4)[J]. J Exp Biol, 1993, 175: 153–172.
- [32] Zhang Z Z, Zhang Z Q, Dong S L. Preliminary studies on the tolerance of *Colossoma brachypomum* fingerlings to salinity and alkalinity[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 1998, 28(3): 54–59. [章征忠, 张兆琪, 董双林. 淡水白鲟幼鱼盐碱耐受性的初步研究[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1998, 28(3): 54–59.]
- [33] Chang Y M, He Q, Sun Y C, et al. Changes in plasma free amino acid levels in *Leuciscus waleckii* exposed to different environmental alkalinity levels[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(1): 117–124. [常玉梅, 何强, 孙言春, 等. 碳酸盐碱度胁迫下瓦氏雅罗鱼血浆游离氨基酸水平的变化[J]. 中国水产科学, 2016, 23(1): 117–124.]
- [34] Singh L R, Poddar N K, Dar T A, et al. Protein and DNA destabilization by osmolytes: the other side of the coin[J]. Life Sci, 2011, 88(3–4): 117–125.
- [35] Xu J, Ji P, Wang B, et al. Transcriptome sequencing and analysis of wild Amur Ide (*Leuciscus waleckii*) inhabiting an extreme alkaline-saline lake reveals insights into stress adaptation[J]. Plos ONE, 2013, 8(4): 1–10.
- [36] Zhao L H, Jia J H, Zhang Y H, et al. The tolerance and growth of three strains of *Oreochromis niloticus* in salinity-alkalinity water[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(5): 26–32. [赵丽慧, 笪金华, 张艳红, 等. 3 种品系尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)盐碱耐受性和生长比较[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(5): 26–32.]
- [37] Peters D S, Boyd M T. The effect of temperature, salinity, and availability of food on the feeding and growth of the hogchoker, *Trinectes maculatus* (Bloch & Schneider)[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1972, 9(2): 201–207.
- [38] Steinberg C E W, Saul N, Pietsch K, et al. Dissolved humic substances facilitate fish life in extreme aquatic environments and have the potential to extend lifespan of *Caenorhabditis elegans*[J]. Ann Environ Sci, 2007(1): 81–90.
- [39] Zhang Z Z, Zhao Z Q, Dong S L. Studies on the tolerance of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix* C et V) fingerlings to salinity and alkalinity[J]. Periodical of Ocean University of Qingdao: Natural Science, 1999, 29(3): 102–107. [章征忠, 张兆琪, 董双林. 鲢鱼幼鱼对盐、碱耐受性的研究[J]. 青

- 岛海洋大学学报: 自然科学版, 1999, 29(3): 102–107.]
- [40] Ji Z L, Zhang C X, Mai K S. A review on function and regulatory mechanism of Na⁺ and Cl⁻ transporters in fish[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(2): 369–378. [吉中力, 张春晓, 麦康森. 鱼类钠离子和氯离子转运载体的功能及调控机制研究进展[J]. 动物营养学报, 2016, 28(2): 369–378.]
- [41] Chang Y M, Tang R, Dou X J, et al. Transcriptome and expression profiling analysis of *Leuciscus waleckii*: an exploration of the alkali-adapted mechanisms of a freshwater teleost[J]. Mol Biosyst, 2014, 10(3): 491–504.
- [42] Liang C F, Zhao J L, Gan Y D, et al. Effects of salinity and alkalinity on mRNA expression of Na⁺/HCO₃⁻ cotransporter and carbonic anhydrase genes from *Oreochromis niloticus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(2): 274–283. [梁从飞, 赵金良, 甘远迪, 等. 盐碱胁迫对尼罗罗非鱼鳃 Na⁺/HCO₃⁻共转运子、碳酸酐酶基因表达的影响[J]. 中国水产科学, 2016, 23(2): 274–283.]

Tolerance of three Cobitidae fish species to high salinity and alkalinity

WU Pengfei^{1,2}, GENG Longwu¹, JIANG Haifeng¹, TONG Guangxiang¹, LI Chenyu¹, XU Wei¹

1. Heilongjiang Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Saline-alkaline water resources are plentiful in China, but fisheries production in these waters is relatively low due to the lack of suitable culture species adapted to different saline-alkaline water characteristics. *Triplophysa dalaica* (Order Cypriniformes and Family Cobitidae) lives in Dali Lake where salinity reaches 6‰ and alkalinity is as high as 53.57 mmol/L. This species has a high tolerance to high salinity and alkalinity and could be a good aquaculture species for high salinity-alkalinity water. However, little is known about the tolerance limits of cobitid fish compared with those of other freshwater fish species. Thus, the tolerance of three cobitid fish species, such as *Misgurnus mohoity* Dybowski, *Paramisgurnus dabryanus* Sauvage, and *T. dalaica*, to salinity and alkalinity were investigated by 96 h one-way acute toxicity tests and a uniform orthogonal test in this study. The results showed that the 24 h- and 96 h-LC₅₀ values for salinity in *M. mohoity*, *P. dabryanus*, and *T. dalaica* were 15.64 g/L, 13.58 g/L, and 15.43 g/L and 14.18 g/L, 14.00 g/L, and 11.57 g/L, respectively, with safe concentrations of 4.12 g/L, 4.03 g/L, and 3.74 g/L respectively. The degree of salinity tolerance was *M. mohoity*>*P. dabryanus*>*T. dalaica*. The 24 h- and 96 h-LC₅₀ values for carbonate-alkalinity in *M. mohoity*, *P. dabryanus*, and *T. dalaica* were 117.1 mmol/L, 72.62 mmol/L, and 128.4 mmol/L and 88.83 mmol/L, 155.2 mmol/L, and 120.0 mmol/L, respectively, with safe concentrations of 18.77 mmol/L, 23.66 mmol/L, and 36.30 mmol/L respectively. The degree of carbonate-alkalinity tolerance was *T. dalaica*>*P. dabryanus*>*M. mohoity*. The joint effect of salinity and alkalinity was coordinated in *M. mohoity* and *P. dabryanus*, and the coordination coefficients increased first and then decreased, but reached the maximum at 48 h. However, the combined effect was coordinated within 0–48 h in *T. dalaica*, whereas it was antagonized during 48–96 h, and the coefficient of antagonism increased gradually with exposure time. These results provide a theoretical basis for promoting breeding and culture of cobitid fish in high salinity-alkalinity water in the future.

Key words: *Misgurnus mohoity* Dybowski; *Paramisgurnus dabryanus* Sauvage; *Triplophysa dalaica*; Cobitidae; salinity; alkalinity; tolerance

Corresponding author: XU Wei. E-mail: xuwei@hrfri.ac.cn