

水温、光周期和光照强度对塔里木裂腹鱼幼鱼存活、摄食和生长的影响及其盐碱耐受能力研究

赵年桦^{1,2,3}, 赵 贺^{1,2,3}, 强 壮^{2,3,4}, 聂竹兰^{1,2,3}, 魏 杰^{1,2,3,5}, 沈建忠⁵

(1. 塔里木大学动物科学学院, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300; 2. 新疆生产建设兵团塔里木畜牧科技重点实验室, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300; 3. 塔里木珍稀鱼类研究中心, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300; 4. 塔里木大学生命科学学院, 新疆维吾尔自治区阿拉尔 843300; 5. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 文章采用实验生态学方法探究了水温、光周期和光照强度对塔里木裂腹鱼 (*Schizothorax biddulphi*) 幼鱼存活、摄食和生长的影响, 使用 Box-Behnken 实验设计法预测幼鱼最佳生长环境条件, 并通过单因子静态急性毒性实验法对其盐碱耐受能力进行了研究。结果显示, 水温 5~25 ℃ 时幼鱼成活率均在 85% 以上; 水温 20 ℃ 时摄食率、体长增长率和特定生长率达到最高; 光周期 16 L : 8 D 或光照强度 500 lx 时, 各水平平均达到最高; 水温 12.98 ℃、每天光照 15.07 h、光照强度 670.27 lx 时, 幼鱼达到理论最佳存活、摄食、生长条件; 幼鱼 24、48、72 和 96 h 的氯化钠 (NaCl) 盐度半致死浓度 (LC₅₀) 分别为 4.01、3.62、3.29 和 2.92 g·L⁻¹, 安全浓度 (SC) 为 0.89 g·L⁻¹; 24、48、72 和 96 h 碳酸氢钠 (NaHCO₃) 碱度 LC₅₀ 分别为 97.14、86.75、80.26 和 74.52 mmol·L⁻¹, SC 为 20.75 mmol·L⁻¹。

关键词: 塔里木裂腹鱼; 环境因子; 成活率; 摄食率; 生长; 盐碱耐受能力

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Effects of water temperature, photoperiod and light intensity on survival, feeding and growth of *Schizothorax biddulphi* juveniles and their tolerance of salinity and alkalinity

ZHAO Nianhua^{1,2,3}, ZHAO He^{1,2,3}, QIANG Zhuang^{2,3,4}, NIE Zhulan^{1,2,3}, WEI Jie^{1,2,3,5}, SHEN Jianzhong⁵

(1. College of Animal Sciences, Tarim University, Aral City 843300, China; 2. Key Laboratory of Tarim Animal Husbandry Science and Technology, Xinjiang Production & Construction, Aral City 843300, China; 3. College of Life Sciences, Tarim University, Aral City 843300, China; 4. Tarim Rare Fish Reserrch Center, Aral City 843300, China; 5. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, we investigated the effects of water temperature, photoperiod and light intensity on the survival, feeding and growth of *Schizothorax biddulphi* juveniles by using experimental ecological methods; predicted the optimal growth conditions

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-03-07

资助项目: 国家自然科学基金项目 (31560721, 31860729); 新疆生产建设兵团中青年科技创新领军人才计划项目 (2018CB033); 自治区研究生科研创新项目 (TDGRI201918); 中国海洋大学塔里木大学科研合作联合基金项目 (ZHYLH201902); 华中农业大学塔里木大学科研合作联合基金项目 (TDHNLH201702, 2662017PY118)

作者简介: 赵年桦 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水生生物资源与保护利用。E-mail: 591217996@qq.com

通信作者: 聂竹兰 (1979—), 女, 博士, 教授, 从事水生生物资源与保护利用、特殊资源动物研究。E-mail: niezh2004@126.com

for the juveniles by Box-Behnken design; and studied the saline alkali tolerance of juveniles by single factor static toxicity acute test. The results show that the survival rate of the juveniles was above 85% at 5–25 °C. The feeding rate, length growth rate and specific growth rate reached the maximum values at 20 °C. When the photoperiod was 16 L : 8 D and the light intensity was 500 lx, all the indices of the juveniles reached the maximum values. Under conditions of water temperature of 12.98 °C, daily light time of 15.07 h and light intensity of 670.27 lx, the best survival, feeding and growth were obtained. The LC_{50} of NaCl salinity was 4.01, 3.62, 3.29 and 2.92 $g \cdot L^{-1}$ at 24, 48, 72 and 96 h, respectively, and the safety concentration (SC) was 0.89 $g \cdot L^{-1}$. The LC_{50} of $NaHCO_3$ alkalinity was 97.14, 86.75, 80.26 and 74.52 $mmol \cdot L^{-1}$ at 24, 48, 72 and 96 h, respectively, and the SC was 20.75 $mmol \cdot L^{-1}$.

Key words: *Schizothorax biddulphi*; Environmental factor; Survival rate; Feeding rate; Growth; Tolerance of salinity and alkalinity

我国拥有约 0.46 亿 hm^2 的低洼盐碱水域资源, 广泛分布在东北、华北和西北内陆地区, 但这些盐碱水域资源中生物种类单一、生态环境脆弱, 因此大部分长期处于荒废状态^[1]。自 1991 年以来, 我国开始在河北、山东、江苏等地进行盐碱水养殖^[2], 但目前尚缺乏针对不同盐碱水域特点的主导养殖技术, 存在养殖品种单一的问题^[3]。裂腹鱼亚科主要分布在我国的青藏高原及其周边水域^[4-5], 近几年由于受外界因素干扰, 其数量急剧下降, 大规模人工繁育成为保护裂腹鱼的首要任务。

人工繁育过程中环境因子对幼鱼的代谢、存活、摄食和生长起着重要作用, 其中水温、光周期和光照强度的影响尤为重要^[6]。鱼类是变温动物, 体温随着水温而变化, 水温可以通过影响鱼体体温从而改变其消化酶活性, 进而对鱼类的摄食率、食物消化率和生长率产生重大影响^[7]。鱼类的摄食率和生长率随水温的升高而增加, 但当水温高于临界值时却会随水温的升高而下降^[8]。鱼类在整个生命周期中均受光照影响, 光周期和光照强度对鱼类摄食和生长有重要影响, 光照过强或过弱和不适宜的光周期均会对鱼类的活动、生长和发育产生不利影响^[9]。

塔里木裂腹鱼 (*Schizothorax biddulphi*) 属鲤形目、鲤科、裂腹鱼亚科、裂腹鱼属, 为国家二级保护鱼种, 仅分布于新疆塔里木水系^[10]。近年来, 塔里木裂腹鱼繁殖生物学和生态学相关研究逐渐被重视^[11-14], 但环境因子对其存活、摄食和生长的影响及其盐碱耐受能力的研究尚未见报道。本文研究了水温、光周期和光照强度对塔里木裂腹鱼幼鱼存活、摄食和生长的影响, 以及塔里木裂腹鱼幼鱼对氯化钠 (NaCl) 盐度、碳酸氢钠 ($NaHCO_3$) 碱度和盐碱交互的耐受性, 以期对塔里木裂腹鱼种群保护和养殖生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验用塔里木裂腹鱼幼鱼采自新疆维吾尔自治区卡拉贝利鱼类增殖放流站, 初始体长为 (47.26 ± 0.89) mm, 体质量为 (1.25 ± 0.31) g。实验容器为透明有盖玻璃水缸 (60 cm×35 cm×45 cm), 实验期间统一使用 HZ-060 型充气增氧机供氧。实验饲料为四川斯特佳饲料有限公司生产的浮性配合饲料 838, 每天投喂 3 次 (09:30、13:30、19:30), 按体质量 3.0%~5.0% 饱食投喂。投饵前吸出粪便, 投饵 30 min 后吸出残饵, 烘干称质量, 调整投喂量。每天换水 1 次, 每次换水 1/3, 换水前后温差控制在 0.5 °C 以内。实验用水为经过循环系统过滤的卡拉贝利地下水, 水温 (16.5 ± 0.5) °C, pH 8.45~8.56, 溶解氧质量浓度 3.5~3.7 $mg \cdot L^{-1}$, 盐度 1.7~1.9, 氨氮质量浓度 $<0.1 mg \cdot L^{-1}$ 。

1.2 水温实验设计

实验设 6 个温度组 (5、10、15、20、25、30 °C), 每组 3 个平行, 每组 30 尾幼鱼, 使用 WEIPRO MX300 IC 控温仪进行水温调控, 实验期间水温波动幅度为 ± 0.5 °C, 实验周期为 45 d。

1.3 光周期实验设计

实验设 5 个光照周期组 (0 L : 24 D、8 L : 16 D、12 L : 12 D、16 L : 8 D 和 24 L : 0 D), 每组 3 个平行, 每组 30 尾幼鱼, 共 15 个玻璃水缸, 每个实验组分别放在独立密闭遮光的实验桶 (直径为 2 m、深度为 1 m) 中进行, 每组采用 1 个 36 W 日光灯进行照明, 玻璃缸遮光材料选用黑色塑料布, 实验周期为 45 d。

1.4 光照强度实验设计

实验设 5 个光照强度组 (2 000、1 000、500、100、10 lx), 每组 3 个平行, 每组 30 尾幼鱼, 共 15 个玻璃水缸, 均匀排成 5 列, 4 个 36 W 日光灯

灯光从第一列玻璃缸壁外上方射入,移动各列玻璃缸间距,使光强在玻璃缸中形成 10~2 000 lx 的光照梯度,光照周期为自然光周期 (12 L : 12 D),实验周期为 45 d。

1.5 多因素调控实验设计

采用三因素 (水温、光周期、光照强度) 四水平 (成活率、摄食率、体长增长率、特定生长率) 的 Box-Behnken 实验设计,因子水平分别编码为 -1、0、1,共 17 个实验点,每个实验点重复 3 次,每个实验点 30 尾幼鱼,实验周期为 45 d。

1.6 盐碱耐受实验设计

采用单因子静态急性毒性实验法^[15]进行盐碱耐受实验,实验用鱼先参照多因素实验结果筛选出的模型优化因素条件进行饲养,饲养周期为 45 d。饲养周期结束后,挑选体质活跃、无伤无病的幼鱼进行盐碱耐受能力研究并进行预实验,获得幼鱼 24 h 全部死亡盐度、碱度最低浓度和 96 h 全部成活盐度、碱度最高浓度。设置 7 个盐度梯度 (2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5) 和 7 个碱度浓度梯度 (65、75、85、95、105、115、125 mmol·L⁻¹),每个浓度梯度设置 3 个平行组和 1 个对照组,每组 20 尾幼鱼。为保证实验过程中溶液浓度的稳定性和水质清澈,所有浓度梯度 24 h 更换 10% 水量,不投饵,实验分别使用盐度计和酸度计测定及校准盐度和碱度。实验进行 96 h,连续观察记录前 12 h 鱼在实验中的表现情况并记录 24、48、72、96 h 的死亡数,及时捞出死亡 (不能游动和鳃盖未能煽动) 个体。

1.7 数据处理

实验开始前和实验结束后停食 1 d,分别测量各组实验鱼的体长、体质量,计算成活率 (Survival rate, SR, %)、摄食率 (Feeding ratio, FR, %)、体长增长率 (Length growth rate, LR, %)、特定生长率 (Specific growth rate, SGR, %·d⁻¹) 等指标:

$$SR = 100\% \times (N_t - N_0) / N_0 \quad (1)$$

$$FR = 100\% \times F / [(W_t + W_0) \times t / 2] \quad (2)$$

$$LR = 100\% \times (L_t - L_0) / L_0 \quad (3)$$

$$SGR = (\ln W_t - \ln W_0) \times 100\% / t \quad (4)$$

式中: N_0 为实验开始时鱼的尾数; N_t 为实验结束时鱼的尾数; F 为饲料摄入量 (g); t 为养殖天数 (d); W_0 为实验开始时鱼体质量 (g); W_t 为实验结束时鱼体质量 (g); L_0 为实验开始时鱼体长 (mm); L_t 为实验结束时鱼体长 (mm)。

盐碱耐受单一因素实验结果采用改良寇氏法^[16],分析计算半致死浓度 (LC₅₀) 及 95% 置信区间:

$$\lg LC_{50} = X_m - d \left(\sum p_i - 0.5 \right) \quad (5)$$

$$SD = d \sqrt{\frac{\sum p_i - \sum p_i^2}{n}} \quad (6)$$

$$95\% \text{ 置信区间} = \lg^{-1} (\lg LC_{50} \pm 1.96 SD) \quad (7)$$

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 (Safe concentration, SC, %) 采用鱼类急性毒性实验经验公式^[17]估算:

$$SC = 48 \text{ hLC}_{50} \times 0.3 / (24 \text{ hLC}_{50} / 48 \text{ hLC}_{50})^2 \quad (8)$$

实验数据采用 Excel 2020 和 SPSS 26.0 软件进行处理和分析,通过 Origin 2019 软件绘图,多因素调控实验采用 Design Expert 12 进行设计。

2 结果

2.1 水温、光周期和光照强度对塔里木裂腹鱼幼鱼存活、摄食和生长的影响

在为期 45 d 的生长实验中 (表 1), 0 L : 24 D 实验组幼鱼在实验开始后 10 d 内全部死亡,故未统计其最终体长与体质量。结果 (图 1-a) 显示,塔里木裂腹鱼幼鱼适应水温范围较大,水温为 5~25 °C 时幼鱼成活率均在 85% 以上,但水温超过 25 °C 时其成活率显著下降,30 °C 时成活率为 46.7%;幼鱼在水温 5~20 °C 中摄食率随着水温上升而提高,水温 20 °C 时达到最高 (1.96%),在水温 25~30 °C 中摄食率随水温上升而下降 (最低为 0.53%);体长和特定生长率与幼鱼摄食率变化趋势相同,20 °C 时达到最高 (22.34% 和 1.58%·d⁻¹),30 °C 时较低 (5.56% 和 0.23%·d⁻¹)。

全黑 (0 L : 24 D) 实验组的幼鱼在 10 d 内全部死亡。幼鱼成活率、摄食率、体长增长率和特定生长率随着光照时间的延长而增加,每天光照时间为 16 h 时各水平达到最高,但每天光照时间为 24 h 时,成活率、摄食率、体长增长率和特定生长率均下降 (图 1-b)。

本实验结果显示,塔里木裂腹鱼幼鱼适应光照强度范围较大 (图 1-c)。光照强度为 10~2 000 lx 时幼鱼成活率均在 80% 以上。光照强度较大时幼鱼进食活动减少,光照强度为 500 lx 时幼鱼摄食率达到最高 (1.89%);光照强度小于 500 lx 时摄食率随着光照强度降低而减少,其体长增长率和特定生长

表1 各实验组塔里木裂腹鱼幼鱼的初始和最终体长及体质量
Table 1 Initial and final body length and body mass of *S. biddulphi* juveniles in different groups N=1 440

实验组 Group	初始体长 Initial body length/mm	最终体长 Final body length/mm	初始体质量 Initial body mass/g	最终体质量 Final body mass/g
5 ℃	45.32±0.52	50.42±0.65	0.81±0.73	1.17±0.96
10 ℃	46.25±0.38	53.02±0.73	0.98±0.96	1.71±0.20
15 ℃	47.38±0.12	56.76±0.68	1.29±0.98	2.56±0.67
20 ℃	48.63±0.36	59.49±0.53	1.65±0.86	3.36±0.94
25 ℃	46.36±0.49	53.98±0.49	1.08±0.75	1.74±0.78
30 ℃	47.33±0.16	49.96±0.83	1.26±0.53	1.40±0.63
0 L : 24 D	47.02±0.28	—	1.20±0.63	—
8 L : 16 D	45.36±0.13	51.60±0.21	0.83±0.44	1.28±0.59
12 L : 12 D	48.63±0.22	57.85±0.89	1.63±0.87	2.84±0.99
16 L : 8 D	49.56±0.15	61.25±0.87	1.72±0.76	3.58±0.97
24 L : 0 D	46.35±0.48	50.84±0.77	1.05±0.93	1.28±0.72
2 000 lx	47.89±0.56	53.04±0.69	1.29±0.94	1.71±0.98
1 000 lx	48.31±0.60	57.26±0.32	1.53±0.97	2.46±0.94
500 lx	48.52±0.19	60.80±0.31	1.62±0.96	3.40±0.96
100 lx	47.11±0.22	56.73±0.57	1.19±0.88	2.41±0.54
10 lx	46.16±0.34	50.62±0.91	1.00±0.84	1.82±0.42

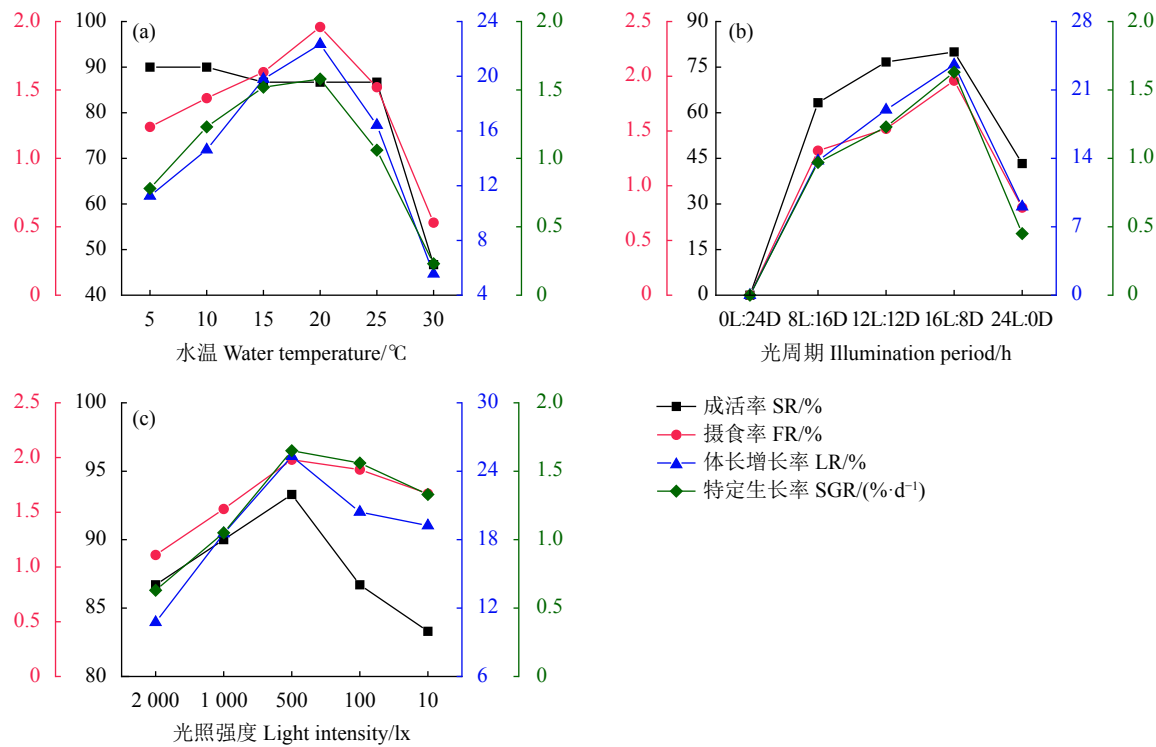


图1 水温、光周期和光照强度对塔里木裂腹鱼幼鱼成活率、摄食率、体长增长率和特定生长率影响
Figure 1 Effects of water temperature, photoperiod and light intensity on survival rate, feeding rate, length growth rate, specific growth rate of *S. biddulphi* juveniles

率与摄食率变化趋势一致，均在500 lx 时达到最高 (25.31% 和 1.65%·d⁻¹)。

2.2 多因素调控实验

选择水温 (Water temperature, WT)、光照时间

(Illumination time, IT, h) 和光照强度 (Light intensity, LI) 为复合调控因素进行响应面实验分析 (表 2)。根据实验结果建立塔里木裂腹鱼幼鱼 SR、FR、LR 和 SGR 与水温 (A)、光照时间 (B) 和光照强度 (C) 因素之间的多元线性回归方程:

$$\text{SR} = -15.55A + 18.47B - 2.08C - 13.61AB - 1.39AC - 1.11BC - 12.22A^2 - 48.61B^2 - 2.50C^2 + 74.44 \quad (R^2 = 0.98) \quad (9)$$

$$\text{FR} = -0.20A + 0.31B - 0.15C - 0.23AB + 0.13AC - 0.18BC - 0.3A^2 - 0.79B^2 - 0.23C^2 + 1.40 \quad (R^2 = 0.98) \quad (10)$$

$$\text{LR} = -2.36A + 3.35B - 0.66C - 2.78AB + 1.66AC - 1.44BC - 4.32A^2 - 8.20B^2 - 3.17C^2 + 15.29 \quad (R^2 = 0.93) \quad (11)$$

$$\text{SGR} = -0.13A + 0.16B - 0.09C - 0.12AB + 0.11AC - 0.09BC - 0.36A^2 - 0.62B^2 - 0.29C^2 + 1.10 \quad (R^2 = 0.95) \quad (12)$$

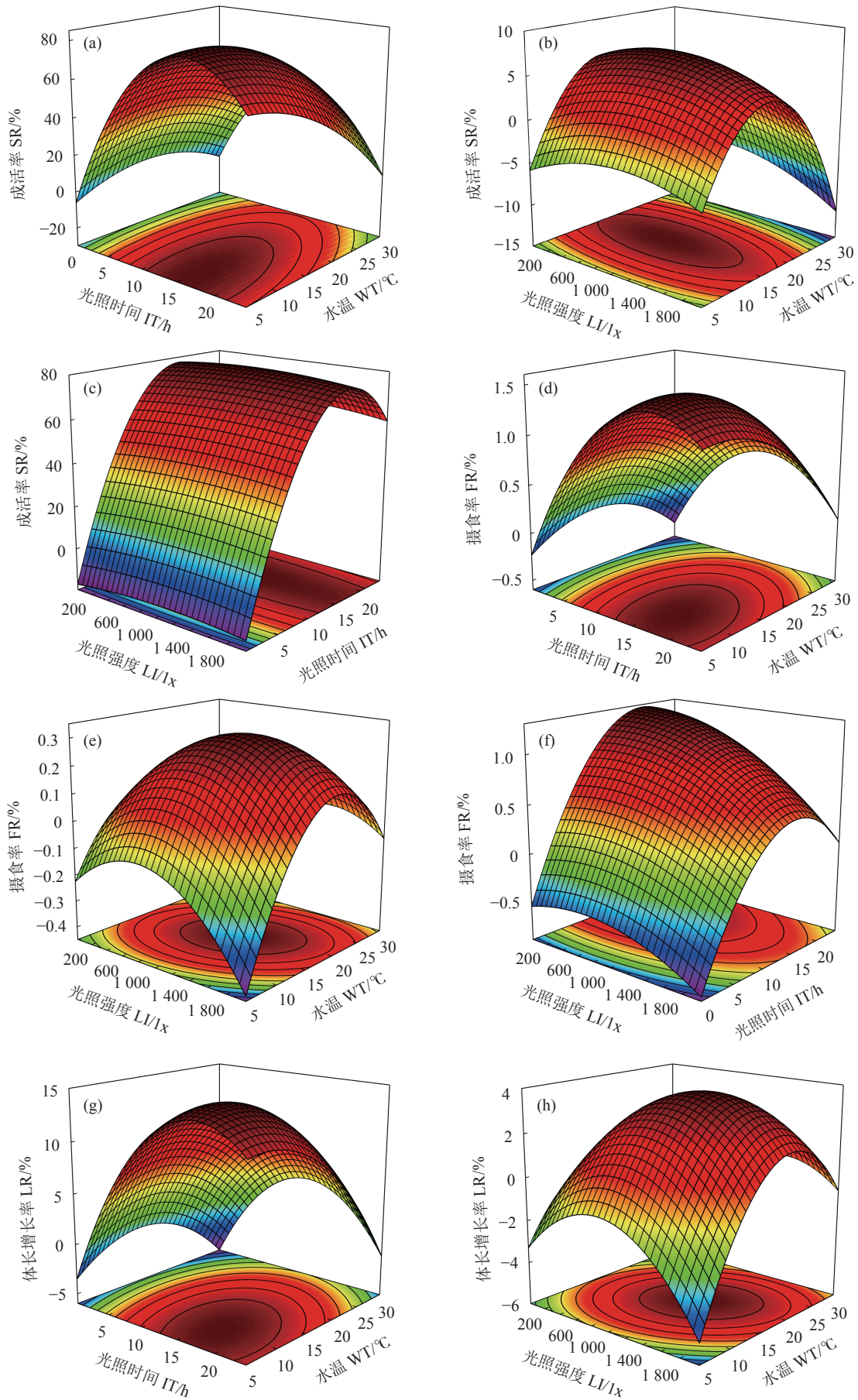
4 组回归模型的决定系数 R^2 均大于 0.90, 表明实验误差较小; 四组模拟失效项 P 分别为 0.07、0.40、0.83、0.95, 均大于 0.05, 说明模型有效, 可以很好地分析和预测 3 种环境因子对塔里木裂腹鱼存活、摄食和生长的影响^[18]。

由表 3 可见, 一次项水温 (A)、光照时间 (B) 对 SR、FR、LR、SGR 影响均显著 ($P < 0.05$), 一次项 (C) 仅对 FR 影响显著; 交互项 AB 对 SR、FR 影响显著 ($P < 0.05$), AC 、 BC 对 FR 影响显著 ($P < 0.05$); 二次项 A^2 、 B^2 对 SR、FR、LR、SGR 影响均极显著 ($P < 0.01$), C^2 对 FR、LR、SGR 影响显著 ($P < 0.05$)。

水温、光照时间和光照强度对 SR、FR、LR、SGR 调控的响应面分析结果 (图 2) 显示, 水温和光照时间、水温和光照强度、光照时间和光照强度对响应值的交互作用均呈现开口向下的山丘状, 于底面投影等高线呈椭圆形, 因此各环境因子之间的交互作用均对塔里木裂腹鱼存活、摄食、生长影响显著。本实验响应模型优化结果显示, 水温 12.98 °C、每天光照时间 15.07 h、光照强度 670.27 lx 时可获得塔里木裂腹鱼的最佳存活、摄食和生长条件, 此时理论成活率为 81.61%, 理论摄食率为 1.53%, 理论体长增长率为 16.34%, 理论特定生长率为 1.13%·d⁻¹。经验证, 最佳环境条件下塔里木裂腹鱼成活率为 82.22%, 摄食率为 1.49%, 体长增长率

表2 响应面实验方案及结果
Table 2 Response surface design and results

实验组 Group	编码值 Coded value			成活率 SR/%	摄食率 FR/%	体长增长率 LR/%	特定生长率 SGR/(%·d ⁻¹)
	A: 水温 WT	B: 光照时间 IT	C: 光照强度 LI				
1	0 (17.5)	-1 (0)	1 (2 000)	0	0	0	0
2	-1 (5)	-1 (0)	0 (1 005)	0	0	0	0
3	-1 (5)	0 (12)	1 (2 000)	75.56±0.01	0.72±0.61	8.21±0.23	0.39±0.59
4	0 (17.5)	1 (24)	1 (2 000)	44.44±0.11	0.41±0.59	4.97±0.24	0.21±0.62
5	0 (17.5)	1 (24)	-1 (10)	48.89±0.16	1.12±0.63	10.73±0.27	0.59±0.13
6	0 (17.5)	0 (12)	0 (1 005)	74.44±0.15	1.59±0.43	19.12±0.63	1.38±0.11
7	1 (30)	1 (24)	0 (1 005)	0	0	0	0
8	0 (17.5)	-1 (0)	-1 (10)	0	0	0	0
9	-1 (5)	0 (12)	-1 (10)	78.89±0.09	1.23±0.42	11.27±0.56	0.80±0.72
10	-1 (5)	1 (24)	0 (1 005)	54.44±0.12	0.94±0.24	11.12±0.53	0.49±0.63
11	0 (17.5)	0 (12)	0 (1 005)	73.33±0.07	1.39±0.38	14.01±0.36	1.11±0.53
12	0 (17.5)	0 (12)	0 (1 005)	77.78±0.03	1.36±0.35	13.97±0.57	1.02±0.41
13	0 (17.5)	0 (12)	0 (1 005)	77.78±0.03	1.25±0.41	11.29±0.39	0.86±0.32
14	1 (30)	0 (12)	-1 (10)	46.67±0.08	0.62±0.62	4.09±0.47	0.30±0.31
15	0 (17.5)	0 (12)	0 (1 005)	68.89±0.11	1.42±0.58	18.06±0.46	1.15±0.22
16	1 (30)	-1 (0)	0 (1 005)	0	0	0	0
17	1 (30)	0 (12)	1 (2 000)	37.78±0.15	0.64±0.22	7.65±0.48	0.33±0.39



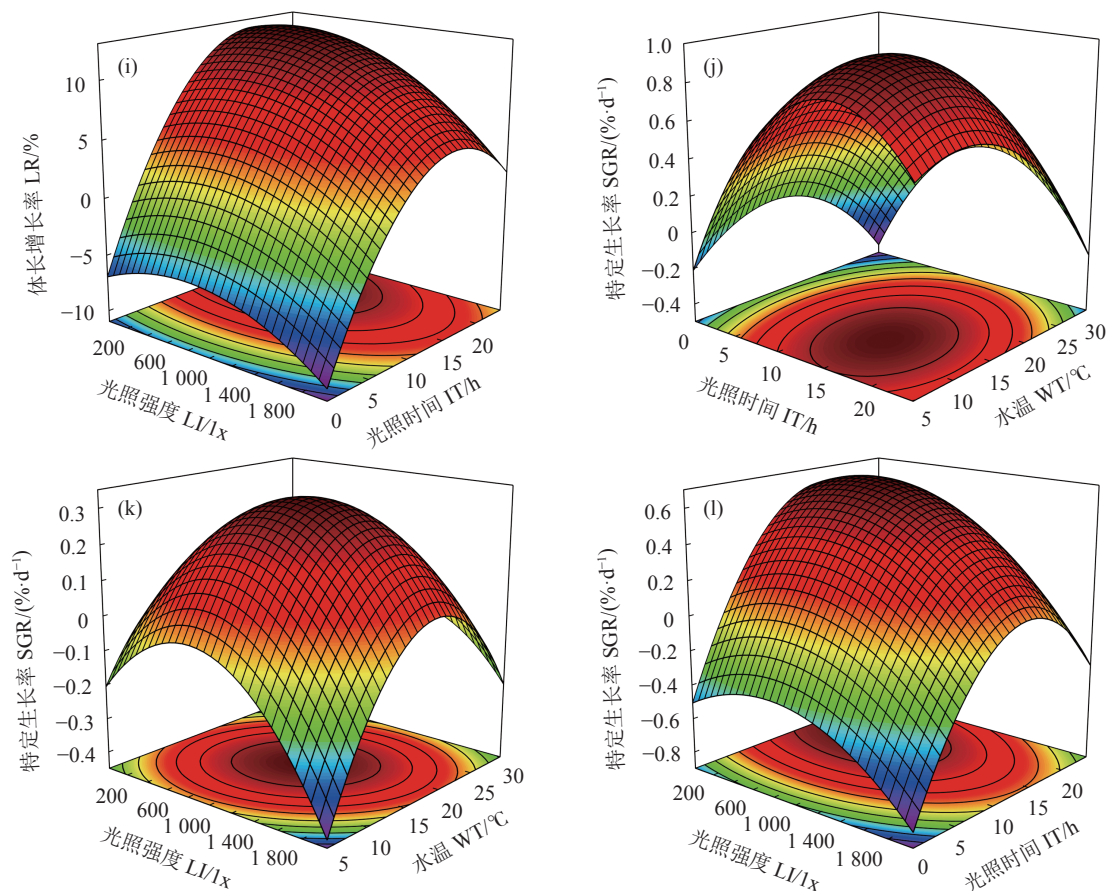


图2 水温、光照时间和光照强度对塔里木裂腹鱼幼鱼成活率、摄食率、体长增长率和特定生长率的响应面

- a. 水温和光照时间对成活率的影响; b. 水温和光照强度对成活率的影响; c. 光照时间和光照强度对成活率的影响; d. 水温和光照时间对摄食率的影响; e. 水温和光照强度对摄食率的影响; f. 光照时间和光照强度对摄食率的影响; g. 水温和光照时间对体长增长率的影响; h. 水温和光照强度对体长增长率的影响; i. 光照时间和光照强度对体长增长率的影响; j. 水温和光照时间对特定生长率的影响; k. 水温和光照强度对特定生长率的影响; l. 光照时间和光照强度对特定生长率的影响。

Figure 2 Response surface and contour plot of effects of water temperature, illumination time and light intensity on survival rate, feeding rate, length growth rate, specific growth rate of *S. biddulphi* juveniles

- a. Influence of WT and IT on SR; b. Influence of WT and LI on SR; c. Influence of IT and LI on SR; d. Influence of WT and IT on FR; e. Influence of WT and LI on FR; f. Influence of IT and LI on FR; g. Influence of WT and IT on LR; h. Influence of WT and LI on LR; i. Influence of IT and LI on LR; j. Influence of WT and IT on SGR; k. Influence of WT and LI on SGR; l. Influence of IT and LI on SGR.

为 16.21%，特定生长率为 $1.07\% \cdot d^{-1}$ ，该结果与理论值基本相符，说明响应模型可有效预测塔里木裂腹鱼的存活、摄食和生长状况。

2.3 盐碱耐受能力

塔里木裂腹鱼幼鱼在不同盐度下的累计死亡率见表 4。实验过程中，对照组中幼鱼的行为始终正常，无死亡个体，水质清澈无杂质。在不同盐度耐受性实验组中，幼鱼反应强烈，鳃盖活动频率加快。幼鱼开始死亡的时间为第 10 小时（盐度为 4.0），死亡时幼鱼停止游动，体表无光泽（图 3-a）。

塔里木裂腹鱼幼鱼的死亡率随着时间延长、碱度增加而增大（表 5）。实验过程中，对照组中幼鱼未出现死亡，水质始终保持清澈。幼鱼在 12 h 碱度 $85 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时未出现死亡，碱度为 $105 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$

时死亡率达 46.67%，第 72 小时全部死亡。死亡个体眼睛充血，腹部充满腹水（图 3-b）。

塔里木裂腹鱼幼鱼 24、48、72 和 96 h 盐度 LC_{50} 分别为 4.01、3.62、3.29 和 $2.92 \text{ g} \cdot L^{-1}$ ，SC 为 $0.89 \text{ g} \cdot L^{-1}$ ；24、48、72 和 96 h 碱度 LC_{50} 为 97.14、86.75、80.26 和 $74.52 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ ，SC 为 $20.75 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ （表 6）。

3 讨论

在养殖过程中，幼鱼对环境因子的变化非常敏感^[19]。其中水温是一个重要的环境因子，它可以通过改变幼鱼体内酶的活性，调节代谢过程中的能量收支，直接影响幼鱼的发育和存活^[20]。本实验中，水温低于 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时各组成活率差异不显著 ($P>0.05$)；

表3 各因素及其交互作用对塔里木裂腹鱼幼鱼成活率、摄食率、体长增长率和特定生长率的显著性检验
Table 3 Significance test of factors and their interactions on survival rate, feeding rate, length growth rate and specific growth rate of *S. biddulphi* juveniles

因素 Factor	水平 Level								
	A	B	C	AB	AC	BC	A ²	B ²	C ²
成活率 SR	0.000 2	<0.000 1	0.383 4	0.003 6	0.674 2	0.735 9	0.005 5	<0.000 1	0.445 2
摄食率 FR	0.003 0	0.000 3	0.013 7	0.008 5	0.080 6	0.029 2	0.000 6	<0.000 1	0.009 1
体长增长率 LR	0.042 3	0.009 7	0.511 7	0.077 6	0.258 3	0.319 9	0.013 3	0.000 4	0.046 3
特定生长率 SGR	0.042 6	0.018 8	0.116 4	0.146 5	0.186 0	0.245 9	0.001 6	<0.000 1	0.005 8

表4 不同盐度条件下塔里木裂腹鱼幼鱼的死亡率

Table 4 Lathal rate of *S. biddulphi* juveniles at different salinities N=560

盐度 Salinity	暴露时间 Exposure time/h				
	12	24	48	72	96
0 (对照组 Control)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	0.00	0.00	0.00	0.00	18.33
3.0	0.00	0.00	0.00	16.67	46.67
3.5	0.00	0.00	18.33	43.33	65.00
4.0	15.00	26.67	46.67	75.00	95.00
4.5	61.67	75.00	98.33	100.00	100.00
5.0	86.67	90.00	100.00	100.00	100.00
5.5	90.00	95.00	100.00	100.00	100.00

表5 不同碱度条件下塔里木裂腹鱼幼鱼的死亡率

Table 5 Lathal rate of *S. biddulphi* juveniles at different alkalinities N=560

碱度 Alkalinity/(mmol·L ⁻¹)	暴露时间 Exposure time/h				
	12	24	48	72	96
0 (对照组 Control)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
65	0.00	0.00	0.00	0.00	16.67
75	0.00	0.00	13.33	20.00	31.67
85	0.00	0.00	15.00	43.33	76.67
95	28.33	28.33	56.67	85.00	90.00
105	46.67	63.33	95.00	100.00	100.00
115	71.67	90.00	98.33	100.00	100.00
125	98.33	95.00	100.00	100.00	100.00

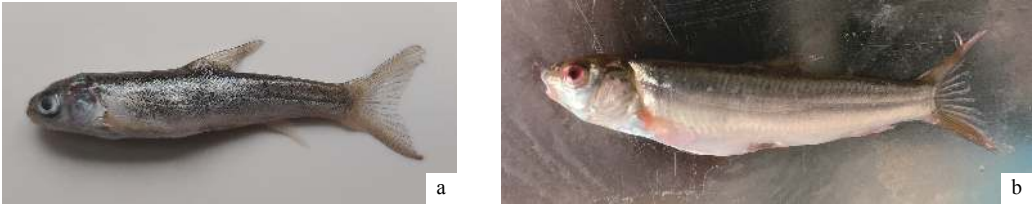


图3 塔里木裂腹鱼幼鱼盐中毒 (a) 和碱中毒 (b)

Figure 3 Salt poisoning (a) and alkali poisoning (b) of *S. biddulphi* juveniles

水温高于 25 ℃ 时各组成活率急剧下降。这与曾本和等^[21]异齿裂腹鱼 (*S. oconnori*) 的研究结果相似, 可能是因为塔里木裂腹鱼和异齿裂腹鱼长期生活在高海拔地区, 水温较低, 鱼体为适应环境产生了耐低温的能力。

鱼类摄食率是决定其生长的重要因素之一^[22]。本实验中, 随着水温的升高, 塔里木裂腹鱼幼鱼的摄食率呈现先升高后降低的变化趋势, 其体长增长率和特定生长率与幼鱼摄食率变化一致, 这与胡发文等^[23]对大泷六线鱼 (*Hexagrammos otakii*), 牟振波等^[24]对细鳞鱼 (*Brachymystax lenok*) 的研究结果一致。本实验中, 塔里木裂腹鱼幼鱼在水温 20 ℃

时摄食率达最高, 与异齿裂腹鱼^[21]、细鳞鱼^[24]等冷水鱼相似。

光周期与昼夜更替信号, 刺激生物体内节律调节系统和外界环境保持一致^[25]。本实验中, 光照时间对塔里木裂腹鱼的生长和存活有一定影响。幼鱼是视觉性摄食动物, 依靠光照产生视觉反应而进行摄食^[26], 本研究中全黑实验组因无光照, 幼鱼不能进行正常摄食, 最终在 10 d 内全部死亡; 幼鱼成活率、摄食率、体长增长率和特定生长率在 8 L : 16 D、12 L : 12 D、16 L : 8 D 和 24 L : 0 D 组之间均差异显著 ($P<0.05$), 这与对克氏双锯鱼 (*Amphiprion clarkii*)^[27]、海葵双锯鱼 (*A. percula*)^[28]

表6 塔里木裂腹鱼幼鱼的急性盐度和碱度半致死浓度
Table 6 Acute LC₅₀ of *S. biddulphi* juveniles at different salinities and alkalinities

暴露时间 Exposure time/h	盐度半致死浓度 Salinity LC ₅₀ /(g·L ⁻¹)	安全浓度 SC/(g·L ⁻¹)	碱度半致死浓度 Alkalinity LC ₅₀ /(mmol·L ⁻¹)	安全浓度 SC/(mmol·L ⁻¹)
24	4.01 (3.84~4.18)	0.89	97.14 (93.62~100.79)	20.75
48	3.62 (3.48~3.76)		86.75 (83.66~89.95)	
72	3.29 (3.15~3.43)		80.26 (77.45~83.17)	
96	2.92 (2.78~3.06)		74.52 (71.70~77.44)	

注：括号中数值为 95% 置信区间。
Note: The values in brackets are 95% confidence intervals.

的研究结果存在差异，可能是因为塔里木裂腹鱼生活在青藏高原上，海拔高、光照时间长，其幼鱼适应了长光照环境。

本研究中，光照强度达到 500 lx 时塔里木裂腹鱼幼鱼成活率、摄食率、体长增长率和特定生长率均最大，而光照强度低于 500 lx 时，其成活率、摄食率和生长率开始下降，反映光照强度对其存活、摄食和生长具有重要影响。笔者在克孜勒河进行为期 2 个月的野外捕捞，发现塔里木裂腹鱼幼鱼喜在太阳初升或黄昏时段于浅水区域进行摄食，没有被惊扰时喜在阳光直射的中下水层聚集，这与本实验结果一致。尖齿胡鲶 (*Clarias gariepiinus*) 在 0 lx 时获得较快生长速度^[29]；豹纹鳃刺鲈 (*Plectropomus leopardus*) 幼鱼在 3 000 lx 光照条件下存活和生长也可达到较好水平^[30]；克氏双锯鱼仔鱼发育则需要较弱光照强度 (100~1 000 lx)^[27]。不同鱼类对光照需求不同，光照对鱼类生长的影响机制有待进一步研究。

多因素实验结果显示，塔里木裂腹鱼最佳存活、摄食、生长条件为水温 12.98 ℃、每天光照时间 15.07 h、光照强度 670.27 lx，推断其幼鱼适宜在拥有低温水源、长光照时间的区域进行规模化养殖，中国青藏高原及中国东北地区可满足塔里木裂腹鱼的大规模苗种培育工作。

盐度可以通过影响鱼类体内渗透压来干扰鱼类的正常生理活动^[31-32]。大部分鱼类可以通过鱼鳃上三磷酸腺苷酶 (ATP 酶) 为离子转运提供载体和驱动力，从而平衡渗透压，其中 Na⁺/K-ATPase 可将 K⁺向胞内运输的同时向胞外排出 Na⁺，使胞内 Na⁺维持在一定水平^[33-35]。本研究中，随着盐度的升高，4 种裂腹鱼幼鱼的死亡率也随之升高，96 h 后无幼鱼存活。裂腹鱼幼鱼从低渗环境转变到高渗环境中，鱼鳃的结构和生理机能会发生明显改变，鱼鳃上 Na⁺/K-ATPase 活性受到抑制，K⁺/Na⁺与外界交换受阻，从而造成细胞损伤和鱼类死亡^[36-37]。

碱度是养殖鱼类水环境的重要化学指标之一，水中的 CO₃²⁻、HCO₃⁻、OH⁻等离子可以通过影响位于鱼类鳃部细胞上的 Cl⁻-HCO₃⁻离子交换体系，抑制 Na⁺-HCO₃⁻转运蛋白酶活性，干扰鱼体内酸碱缓冲体系，破坏鱼类细胞膜通透性，改变血液中二氧化碳 (CO₂) 的含量，从而导致鱼类碱中毒现象发生^[38-40]。本实验中，死亡幼鱼体表分泌较多黏液，尾鳍明显充血，腹部出现黑色腹水，主要原因是幼鱼在高碱度水环境中，皮肤和器官受到了损伤，体内内环境和缓冲系统遭到破坏。

不同研究中的实验条件和鱼类规格有所差异，但简单地将不同淡水鱼类盐碱耐受能力进行比较后发现，塔里木裂腹鱼幼鱼耐盐碱能力较差，耐碱能力低于大鳞鲃 (*Barbus capito*)^[41]、青海湖裸鲤 (*Gymnocypris przewalskii*)^[42]，与黑龙江泥鳅 (*Misgurnus mohoity*)^[43]、滩头雅罗鱼 (*Tribolodon brandti*)^[44]耐碱能力相近；耐盐能力低于松浦镜鲤 (*Cyprinus carpio songpu*)^[41]、欧鲇 (*Silurus glanis*)^[45]、黄鳝 (*Monopterus albus*)^[46]等。推测可能是由于实验用鱼体型偏小，鱼体内盐碱缓冲体系尚未发育完善，导致其耐盐碱能力较差；另外，本实验用水为新疆南疆地区地下水，水质偏碱性且盐度较高，也可能造成所测幼鱼的盐碱耐受能力偏弱。

参考文献:

[1] 叶博, 程之扬, 彭茂潇, 等. 急性 pH 和碳酸盐碱度对缢蛏存活率、Na⁺/K-ATPase 活性及血淋巴吞噬能力的影响 [J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1723-1732.
[2] 庄亚润, 孙真, 周凯, 等. 中国西北地区次生盐碱水无机氮转化与环境因子的相关关系 [J]. 中国水产科学, 2020, 27(12): 1438-1447.
[3] 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.
[4] HE D, CHEN Y. Biogeography and molecular phylogeny of the genus *Schizothorax* (Teleostei: Cyprinidae) in China inferred from cytochrome b sequences[J]. J Biogeogr, 2010, 33(8): 1448-1460.

- [5] MILLER T J, CROWDER L B, RICE J A, et al. Larval size and recruitment mechanisms in fishes: toward a conceptual framework[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1988, 45(9): 1657-1670.
- [6] 周胜杰, 胡静, 于刚, 等. 光周期对尖吻鲈仔稚鱼消化酶活性的影响[J]. 海洋科学, 2018, 42(6): 63-69.
- [7] 宋超, 庄平, 章龙珍, 等. 不同温度对西伯利亚鲟幼鱼生长的影响[J]. 海洋渔业, 2014, 36(3): 239-246.
- [8] 苏富强, 吴凡, 文华, 等. 两种水温条件下吉富罗非鱼对两种工艺饲料的表观消化率的比较[J]. 淡水渔业, 2019, 49(6): 82-87.
- [9] CUVIER P A, JOURDAN S, FONTAINE P, et al. Effects of light intensity on animal husbandry and digestive enzyme activities in sea bass *Dicentrarchus labrax* post-larvae[J]. Aquaculture, 2001, 202(3/4): 317-328.
- [10] 郭焱, 张人铭, 蔡林钢. 新疆鱼类志[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2012: 114-115.
- [11] 张人铭, 郭焱, 马燕武, 等. 塔里木裂腹鱼资源与分布的调查研究[J]. 淡水渔业, 2007, 37(6): 76-78.
- [12] 龚小玲, 崔忠凯, 吴敏芝, 等. 塔里木裂腹鱼胚胎和仔鱼的发育与生长[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(6): 827-834.
- [13] 杨天燕, 孟玮, 郭焱, 等. 新疆两种裂腹鱼形态学和 *COI* 基因的比较分析[J]. 水产学杂志, 2013, 26(1): 10-14.
- [14] 任永丽. 基于 SSR 标记及 mtDNA 序列的塔里木裂腹鱼群体遗传多样性分析[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2020: 1-13.
- [15] 金方彭, 李光华, 李林, 等. pH 和盐度对后背鲈鲤幼鱼存活的影响[J]. 水生生物学报, 2018, 42(3): 578-583.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 胡琼, 李胜忠, 曹景成, 等. 葡萄糖、丙三醇和盐对厚唇裂腹鱼精子活力的调控研究[J]. 南方水产科学, 2019, 15(2): 38-46.
- [19] 陈思. 养殖水温、饵料种类及氮氢和亚硝酸盐对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长性能的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015: 1-4.
- [20] 吾欢欢, 张运海, 陈文, 等. 水温对前鳍高原鳅幼鱼生长和存活的影响[J]. 淡水渔业, 2020, 50(5): 25-30.
- [21] 曾本和, 周建设, 王万良, 等. 水温对异齿裂腹鱼幼鱼存活、摄食和生长的影响[J]. 淡水渔业, 2018, 48(6): 77-82.
- [22] 白海文, 张颖, 李雪, 等. 温度对施氏鲟幼鱼摄食、生长和肠道消化酶活性的影响[J]. 中国水产科学, 2012, 19(5): 799-805.
- [23] 胡发文, 潘雷, 高凤祥, 等. 温度和盐度变化对大泷六线鱼幼鱼存活与生长的影响[J]. 海洋科学, 2012, 36(7): 44-48.
- [24] 牟振波, 刘洋, 徐革锋, 等. 细鳞鱼摄食和生长最适水温的研究[J]. 水产学杂志, 2011, 24(4): 6-8, 24.
- [25] 祝斐, 张志勇, 徐献明, 等. 光周期对松江鲈鱼生长和性腺发育影响的初步研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(9): 32-38.
- [26] 王萍, 桂福坤, 吴常文, 等. 光照对眼斑拟石首鱼行为和摄食的影响[J]. 南方水产, 2009, 5(5): 57-62.
- [27] 叶乐, 胡静, 王雨, 等. 光周期和光照强度对克氏双锯鱼仔鱼存活、生长和发育的影响[J]. 琼州学院学报, 2014, 21(5): 78-86.
- [28] VINOTH R, AJITHKUMAR T T, GOPI M. Photoperiod induced larval growth of anemone flash *Amphiprion percula*[J]. WASJ, 2010, 10(3): 283-286.
- [29] BRITZ P J, PIENAAR A G. Laboratory experiments on the effect of light and cover on the behaviour and growth of African catfish, *Clarias gariepinus* (Pisces: Clariidae)[J]. J Zool, 1992, 227(1): 3-62.
- [30] YOSEDA K, YAMAMOTO K, ASAMI K, et al. Influence of light intensity on feeding, growth, and early survival of leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*) larvae under mass-scale rearing conditions[J]. Aquaculture, 2008, 279(1/2/3/4): 55-62.
- [31] 强俊, 王辉, 李瑞伟, 等. 盐度对奥尼罗非鱼仔、稚鱼生长、存活及其消化酶活力的影响[J]. 南方水产, 2009, 5(5): 8-14.
- [32] FANG L S, SHU F C. Effect of salinity on the activities of digestive proteases from the tilapia fish, *Oreochromis niloticus*, in different culture environments[J]. Comp Biochem Physiol A, 1989, 93(2): 439-443.
- [33] PURKERSON J M, SCHWARTZ G J. The role of carbonic anhydrases in renal physiology[J]. Kidney Int, 2007, 71(2): 103-115.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 刘智皓, 兰雪溶, 李英文. 乙炔基雌二醇短期暴露损伤斑马鱼雌性成鱼渗透压调节[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 44-48.
- [37] SEDDIKI H, BOEUF G, MAXIME V, et al. Effects of growth hormone treatment on oxygen consumption and sea water adaptability in Atlantic salmon parr and presmolts[J]. Aquaculture, 1996, 148(1): 49-62.
- [38] MARTÍNEZALVAREZ R M, SANZ A, GARCÍAGALLEGÓ 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.
- [39] 柳敏海, 彭志兰, 张凤萍, 等. 盐度对条石鲷摄食、生长和肌肉生化组成的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(5): 392-397.
- [40] 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.
- [41] 杨建. 盐碱胁迫下 5 种鱼类的耐受性和免疫应激反应[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014: 14-15.
- [42] 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: 13.
- [43] 武鹏飞, 耿龙武, 姜海峰, 等. 三种鳅科鱼对 NaCl 盐度和 NaHCO_3 碱度的耐受能力[J]. 中国水产科学, 2017, 24(2): 248-257.
- [44] 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.
- [45] 魏玉众, 张人铭, 宋明波, 等. 欧鲢幼鱼对盐碱的耐受性[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(7): 1335-1343.
- [46] 周文宗, 宋祥甫, 陈桂发. 黄鳍对盐碱耐受性的研究[J]. 淡水渔业, 2014, 44(3): 95-99.