

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16314

水温、盐度和溶氧对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响

于晓明, 崔闻达, 陈雷, 邢彬彬, 任恒, 张国胜

大连海洋大学 辽宁省海洋牧场工程技术研究中心, 辽宁 大连 116023

摘要: 为了考查水温、盐度和溶氧对红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)幼鱼游泳能力的影响, 测定了其在不同水温[15.2、20.2、25.6(对照)和 30.4℃]、盐度[0、10、20、32(对照)和 40]和溶氧[2.14、4.10、5.81 和 7.36 mg/L(对照)]条件下的临界游速和最大游速。结果表明, 水温和溶氧含量均显著影响实验鱼的临界游速和最大游速($P<0.01$)。随水温和溶氧含量升高, 实验鱼的临界游速和最大游速均逐渐增加。水温(T , °C)与临界游速(U_{crit} , cm/s)和最大游速(U_{max} , cm/s)均呈二次函数关系, 关系式分别为 $U_{crit} = -0.095T^2 + 5.450T - 47.79$, $R^2 = 0.995$ ($P<0.01$) 和 $U_{max} = -0.018T^2 + 2.204T - 12.27$, $R^2 = 0.981$ ($P<0.01$)。溶氧含量(DO, mg/L)与临界游速和最大游速也均呈二次函数关系, 关系式分别为 $U_{crit} = 0.230DO^2 + 1.561DO + 5.84$, $R^2 = 0.995$ ($P<0.01$) 和 $U_{max} = -0.806DO^2 + 11.10DO - 3.919$, $R^2 = 0.985$ ($P<0.01$)。不同盐度下实验鱼的临界游速和最大游速与对照组均无显著差异($P>0.05$)。结论认为, 低温和缺氧会降低红鳍东方鲀放流苗种的游泳能力, 进而降低其放流后的捕食成功率, 提高被捕食概率。

关键词: 红鳍东方鲀; 水温; 盐度; 溶氧; 临界游泳速度; 最大游泳速度

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)03-0543-07

红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)属鲀科(Tetraodontidae), 东方鲀属, 肉质细腻, 味道鲜美, 营养丰富, 具有很高的经济价值。红鳍东方鲀曾是中国黄渤海北部渔场和东海渔场的重要经济鱼类资源, 但自 20 世纪 80 年代中期以来, 由于过度捕捞, 其资源量明显下降。为了尽快恢复黄渤海北部自然种群数量, 辽宁省近年组织开展了红鳍东方鲀增殖放流活动, 获得了较好的效果。

由于敌害捕食和饥饿, 增殖放流苗种在放流后的死亡率一般较高^[1-2]。游泳能力与鱼类的生存密切相关, 直接影响其捕食、反捕食、洄游、分布和繁殖等生态习性。研究表明, 水温、盐度、溶氧、污染物等环境因子均会影响鱼类的游泳能力^[3-5], 进而影响增殖放流苗种在放流后的捕食和反捕食能力和分布范围。因此, 了解环境因子对增殖放流苗种游泳能力的影响对于提高其成活率具有重要意义。

鱼类的游泳运动可分为有氧运动和无氧运动两种类型^[6]。有氧运动主要使用红肌, 靠有氧代谢供能, 与鱼类觅食、洄游等活动联系密切; 而无氧运动主要使用白肌, 靠无氧代谢供能, 与鱼类对抗水流、捕食和避敌等行为密切相关^[7]。鱼类游泳能力的评价指标包括临界游泳速度、最大游泳速度、可持续游泳时间、泳姿转换速度等。临界游泳速度常被用于评价鱼类的最大有氧游泳能力, 也是评价环境因子影响鱼类游泳能力的常用指标^[8-9]。最大游泳速度主要用于评价鱼类的无氧游泳能力, 也可作为鱼类捕食和反捕食能力的评价指标。

本研究利用鱼类游泳能力测定水槽, 测定了红鳍东方鲀幼鱼在不同水温、盐度和溶氧条件下的临界游速和最大游速, 评价环境因子对其游泳能力的影响。研究结果有助于更好地了解红鳍东方鲀幼鱼的行为生态习性, 还可为其增殖放流适宜环境的选择提供参考资料。

收稿日期: 2016-10-24; 修订日期: 2017-01-25.

基金项目: 农业部北方海水养殖重点实验室开放课题(2014MSENCKF15); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2014285); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2015007); 大连市支持高层次人才创新创业项目(2016RQ067).

作者简介: 于晓明(1981-), 男, 博士, 副教授. E-mail: yxm@dlou.edu.cn

通信作者: 张国胜, 教授. E-mail: hyx-zhang@dlou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验用红鳍东方鲀幼鱼购于大连天正有限公司。平均体长(7.11±0.43) cm, 平均体重(10.82±1.82) g。实验前在循环养殖水槽中暂养 7 d。暂养期间, 水温(25.1±1.1)℃, 盐度 32±1.0, 溶解氧>6.0 mg/L。每日投喂菲律宾蛤仔 1 次, 饱食后捞出残饵。实验前实验鱼禁食 24 h。

1.2 实验装置

使用自制的 Steffensen 式鱼类游泳能力测定水槽测定红鳍东方鲀幼鱼的临界游速和最大游速。游泳水槽主要由变频器、电动机、螺旋桨和游泳室组成。游泳室的规格为 70 cm×20 cm×20 cm(L×W×H)。使用变频器控制电动机的转速, 电动机带动螺旋桨旋转, 进而在游泳室中制造出流速可调的水流。游泳室中的水流速度使用小型流速计测定(FLOWATCH, 瑞士产)。

1.3 实验条件

水温实验共设置 4 个梯度, 分别为 15.2℃、20.2℃、25.6℃(对照组)和 30.4℃。挑选体长相近的健康实验鱼 60 尾, 分成升温组和降温组, 每组各 30 尾。升温组使用加热棒升温, 降温组使用冷水机降温, 水温每天调节 2~3℃, 调至实验设定水温后实验鱼适应 24 h, 之后随机挑选 8 尾实验鱼测定临界游速, 挑选 6 尾实验鱼测定最大游速。实验前游泳水槽中的海水也调至设定水温, 盐度 32±1.0, 溶解氧>6.0 mg/L。

盐度实验共设置 5 个梯度, 分别为 0、10、20、32(对照组)和 40。挑选体长相近的健康实验鱼 80 尾, 分成升盐度组和降盐度组, 其中升盐度组 30 尾, 降盐度组 50 尾。升盐度组使用海盐升高盐度, 降盐度组使用经充分曝气的自来水降低盐度, 盐度每天调节 2~3, 调至实验设定盐度后, 实验鱼适应 24 h, 之后随机挑选 8 尾实验鱼测定临界游速, 挑选 6 尾实验鱼测定最大游速。实验前游泳水槽中的海水也调至设定盐度, 水温(25.1±0.4)℃, 溶解氧>6.0 mg/L。

溶氧实验共设置 4 个梯度, 分别为 2.14 mg/L、4.10 mg/L、5.81 mg/L 和 7.36 mg/L(对照组)。实验前先向游泳水槽中的海水充入氮气, 将溶解氧调至设定含量, 之后随机挑选 8 尾实验鱼测定临界游速, 挑选 6 尾实验鱼测定最大游速。实验水温(25.2±0.3)℃, 盐度 32±1.0。

1.4 临界游速测定方法

将 4 尾实验鱼放入游泳室中, 在 7.58 cm/s 的流速下适应 10 min, 之后逐渐将流速调至 13.17 cm/s, 此时实验开始, 记录实验开始的时间。实验鱼在此流速下游泳 10 min 后将水流速度升高 4 cm/s, 若实验鱼可持续游泳 10 min, 则将流速再升高 4 cm/s, 如此反复, 直至实验鱼疲劳停止游泳, 记录实验鱼游泳结束时间。疲劳的评判标准为实验鱼停在游泳室末端拦网 20 s 以上。临界游速(U_{crit})计算公式为:

$$U_{crit} = U_1 + (T_1/T_2) \times U_2$$

式中, U_1 是实验鱼能够持续游泳 10 min 的最高流速(cm/s); U_2 是速度增量(4 cm/s); T_1 是实验鱼在最高流速下的游泳时间(min); T_2 是时间间隔(10 min)。

1.5 最大游速测定方法

采用短时间内提速法进行测定^[13]。将 6 尾实验鱼放入游泳室中, 在 7.58 cm/s 的流速下适应 10 min, 之后逐渐将流速调至 13.17 cm/s, 此时实验开始, 每隔 15 s 将流速升高 2 cm/s, 如此反复, 直至实验鱼疲劳停止游泳, 此时的流速即为实验鱼的最大游泳速度。疲劳的评判标准为实验鱼停在游泳室末端拦网 20 s 以上。

1.6 数据分析

不同水温、盐度或溶氧下实验鱼的临界游速和最大游速的比较使用单因素方差分析和 Duncan 多重比较; 水温、溶氧与临界游速或最大游速之间的关系使用曲线回归求算, 以 0.05 为显著性水平。所有数据处理使用 PASW Statistics 18 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 水温对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响

不同水温下红鳍东方鲀幼鱼的临界游速和最大游速如表 1 所示。在 15.2~30.4℃水温范围内, 随水温(T , °C)升高, 实验鱼的临界游速(U_{crit} , cm/s)和最大游速(U_{max} , cm/s)均逐渐增加, 临界游速从 13.12 cm/s 升高到 29.07 cm/s, 最大游速从 17.51 cm/s 升高到 37.38 cm/s。水温与临界游速和最大游速均呈二次函数关系, 关系式分别为 $U_{crit} = -0.095T^2 + 5.450T - 47.79$, $R^2 = 0.995$ ($P < 0.01$) 和 $U_{max} = -0.018T^2 + 2.204T - 12.27$, $R^2 = 0.981$ ($P < 0.01$) (图 1)。方差分析表明, 不同水温下实验鱼的临界游速和最大游速均存在显著差异 ($P < 0.01$)。Duncan 多重比较显示, 15.2℃和 20.2℃

表 1 不同水温下红鳍东方鲀幼鱼的临界游速和最大游速
Tab. 1 Critical swimming speed (U_{crit}) and maximum swimming speed (U_{max}) of *Takifugu rubripes* under different temperature

水温/℃ temperature	临界游速/(cm·s ⁻¹) U_{crit}			最大游速/(cm·s ⁻¹) U_{max}		
	平均值±标准误差 $\bar{x} \pm SE$	最小值 minimum	最大值 maximum	平均值±标准误差 $\bar{x} \pm SE$	最小值 minimum	最大值 maximum
15.2	13.12±1.20 ^a	9.85	20.09	17.51±0.74 ^a	15.03	20.62
20.2	22.57±1.28 ^b	17.17	28.47	23.41±1.15 ^b	20.62	28.07
25.6	29.54±1.00 ^c	25.54	32.99	33.65±1.27 ^c	29.93	39.24
30.4	29.07±2.24 ^c	24.34	39.64	37.38±2.31 ^c	29.93	44.82

注: 同一列中标有不同字母的数值间差异显著($P<0.05$).
Note: Values with different letters in the same column are significantly different from each other ($P<0.05$).

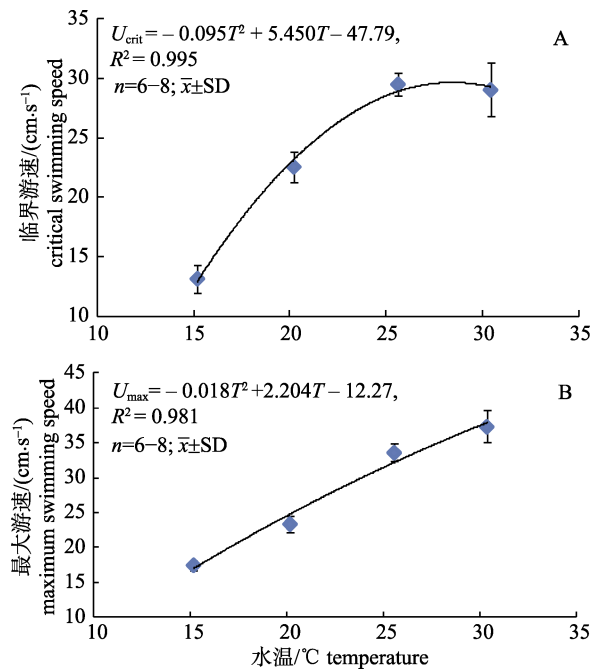


图 1 水温与红鳍东方鲀幼鱼临界游速(A)和最大游速(B)之间的关系

Fig. 1 The relationship between temperature and critical swimming speed (A) and maximum swimming speed (B) of *Takifugu rubripes*

时实验鱼的临界游速和最大游速均显著低于对照组(25.6℃)和30.4℃($P<0.05$), 25.6℃和30.4℃时实验鱼的临界游速和最大游速均无显著差异($P>0.05$)。

2.2 盐度对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响

不同盐度下红鳍东方鲀幼鱼的临界游速和最大游速如表 2 所示。实验结果显示, 盐度 20 时实验鱼的临界游速最大, 盐度 40 时最小; 盐度 10 时实验鱼的最大游速最大, 盐度 32 时最小。方差分析表明, 不同盐度下实验鱼的临界游速存在显著差异($P<0.05$), 而最大游速无显著差异($P>0.05$)。Duncan 多

重比较显示, 盐度 10 和 40 时实验鱼的临界游速均显著低于盐度 20($P<0.05$), 但与对照组均无显著差异($P>0.05$); 盐度 0 和 20 时实验鱼的临界游速与对照组也均无显著差异($P>0.05$)。

2.3 溶氧对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响

不同溶氧含量下红鳍东方鲀幼鱼的临界游速和最大游速如表 3 所示。在 2.14~7.36 mg/L 溶氧含量范围内, 随溶氧含量(DO, mg/L)升高, 实验鱼的临界游速(U_{crit} , cm/s)和最大游速(U_{max} , cm/s)均逐渐增加, 临界游速从 10.40 cm/s 升高到 29.54 cm/s, 最大游速从 16.43 cm/s 升高到 33.65 cm/s。溶氧含量与临界游速和最大游速均呈二次函数关系, 关系式分别为 $U_{crit}=0.230DO^2+1.561DO+5.84$, $R^2=0.995$ ($P<0.01$) 和 $U_{max}=-0.806DO^2+11.10DO-3.919$, $R^2=0.985$ ($P<0.01$), (图 2)。方差分析表明, 不同溶氧含量下实验鱼的临界游速和最大游速均存在显著差异($P<0.01$)。Duncan 多重比较显示, 溶氧为 2.14 mg/L、4.10 mg/L 和 5.81 mg/L 时实验鱼的临界游速均显著低于对照组(7.36 mg/L), 2.14 mg/L 时实验鱼的最大游速显著低于 4.10 mg/L、5.81 mg/L 和 7.36 mg/L ($P<0.05$), 而后 3 组无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 水温对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响

水温会影响鱼类的游泳能力, 例如, 低温对中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)的匀加速最大游泳速度有负效应^[10]; 在 4~24℃水温范围内, 白斑红点鲑(*Salvelinus leucomaenis*)的临界游速先增加而后降低^[3]; 随温度升高, 鳊(*Parabramis pekinensis*)幼鱼的临界游速显著升高^[11]。本实验结果也表明, 水温会显著

表 2 不同盐度下红鳍东方鲀幼鱼的临界游速和最大游速
Tab. 2 Critical swimming speed (U_{crit}) and maximum swimming speed (U_{max}) of *Takifugu rubripes* under different salinity
n=6-8

盐度 salinity	临界游速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) U_{crit}			最大游速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) U_{max}		
	平均值±标准误差 $\bar{x} \pm \text{SE}$	最小值 minimum	最大值 maximum	平均值±标准误差 $\bar{x} \pm \text{SE}$	最小值 minimum	最大值 maximum
0	27.37±2.24 ^{ab}	18.49	35.39	38.93±2.47	31.79	48.55
10	26.42±2.97 ^a	17.69	40.44	41.47±2.82	31.79	50.41
20	32.93±1.92 ^b	21.02	40.04	37.75±2.69	28.07	44.82
32	29.54±1.00 ^{ab}	25.54	32.99	33.65±1.27	29.93	39.24
40	24.03±1.57 ^a	17.69	30.47	39.24±0.96	35.51	42.96

注：同一列中标有不同字母的数值间差异显著($P<0.05$).
Note: Values with different letters in the same column are significantly different from each other ($P<0.05$).

表 3 不同溶氧含量下红鳍东方鲀幼鱼的临界游速和最大游速
Tab. 3 Critical swimming speed (U_{crit}) and maximum swimming speed (U_{max}) of *Takifugu rubripes* under different dissolved oxygen content
n=6-8

溶氧/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) dissolved oxygen	临界游速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) critical swimming speed			最大游速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) maximum swimming speed		
	平均值±标准误差 $\bar{x} \pm \text{SE}$	最小值 minimum	最大值 maximum	平均值±标准误差 $\bar{x} \pm \text{SE}$	最小值 minimum	最大值 maximum
2.14	10.40±0.20 ^a	9.45	11.05	16.43±2.06 ^a	13.17	26.20
4.10	15.50±1.00 ^b	11.45	20.09	26.95±3.62 ^b	13.17	37.38
5.81	23.35±2.00 ^c	17.69	32.59	34.59±3.07 ^b	28.07	48.55
7.36	29.54±1.00 ^d	25.54	32.99	33.65±1.27 ^b	29.93	39.24

注：同一列中标有不同字母的数值间差异显著($P<0.05$).
Note: Values with different letters in the same column are significantly different from each other ($P<0.05$).

影响红鳍东方鲀幼鱼的有氧和无氧游泳能力。水温在 15.2℃和 20.2℃时,实验鱼的临界游速、最大游速分别比对照组(25.6℃)降低了 55.58%、47.96%和 23.59%、30.43%。

水温会影响能量底物的动员利用、肌肉收缩机能以及无氧代谢启动时间^[3, 12-13],进而影响鱼类的游泳能力。低温会限制能量底物的动员、活化和利用,能量转化效率降低,进而导致游泳能力下降。随水温升高,能量转化效率逐渐提高,能量底物浓度逐渐增加,肌肉收缩时间缩短,游泳能力随之增强。此外,温度会影响水的物理性质,进而改变鱼类游泳时受到的阻力。水阻主要取决于水的密度和黏度,温度对水黏度的影响大于密度^[14]。随温度升高,水的黏度降低,鱼类游泳时所受阻力减小,游泳效率提高^[15]。

低温会降低红鳍东方鲀幼鱼的游泳能力,进而降低其捕食的成功率,同时增加其被捕食的概率。因此,如果放流水域的水温较低,在放流后苗种的成活率可能会下降。

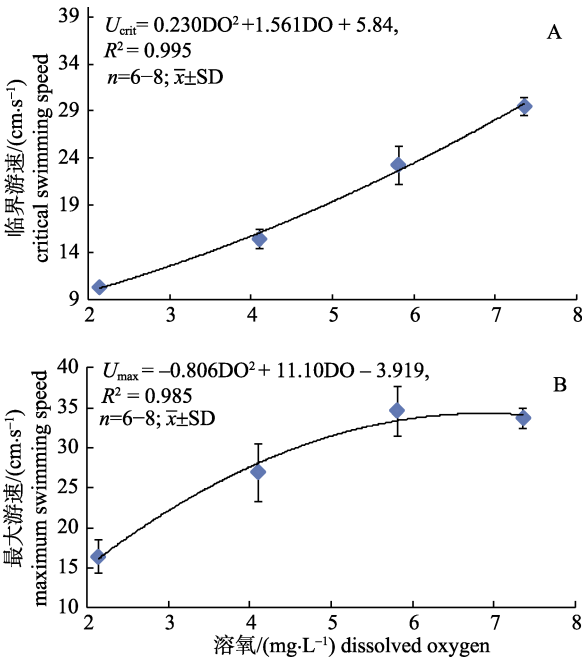


图 2 溶氧含量与红鳍东方鲀幼鱼临界游速(A)和最大游速(B)之间的关系

Fig. 2 The relationship between dissolved oxygen and U_{crit} (A) or U_{max} (B) of *Takifugu rubripes*

3.2 盐度对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响

红鳍东方鲀为广盐性底栖鱼类, 适盐范围为5~45, 最适盐度为15~35^[16]; Lee等^[17]报道, 红鳍东方鲀幼鱼可耐受的盐度范围为28.5~34。本实验结果也表明, 红鳍东方鲀幼鱼可以适应较大的盐度变化范围, 在0~40的盐度范围内, 盐度胁迫并未显著影响实验鱼的有氧和无氧游泳能力。对欧洲鲈(*Dicentrarchus labrax*)和鳉(*Fundulus heteroclitus*)的研究也显示, 盐度变化对其临界游速均无显著影响^[4, 18]。但是, 盐度变化通常会引起鱼类血浆离子浓度、渗透压和组织中水分含量的改变, 进而降低某些鱼类的游泳能力^[19-20], 例如, 盐度升高会显著降低银大麻哈鱼(*Oncorhynchus kisutch*)和鲟(*Acipenser naccarii*)的临界游速^[19, 21]。分析认为, 红鳍东方鲀幼鱼可能具有较强的调控血浆渗透压稳定和组织水分含量平衡的能力。但是, 长期盐度胁迫是否会影响其游泳能力还有待进一步研究。

3.3 溶氧对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响

在缺氧环境下, 鱼类的有氧游泳能力一般会降低。例如, 在1~8 mg/L溶氧条件下, 鳊和中华倒刺鲃幼鱼的临界游速均随溶氧含量的下降而降低^[5]; 锦鲤(*Carassius auratus*)幼鱼的临界游速也随着溶氧含量的下降而呈下降趋势^[22]; 随溶氧含量下降, 大西洋鳕(*Gadus morhua*)作为一种逃避反应其游泳速度先加快, 之后显著降低^[23]。本实验结果也表明, 随溶氧含量下降, 红鳍东方鲀幼鱼的有氧游泳能力显著降低。在2.14 mg/L、4.10 mg/L和5.81 mg/L时, 实验鱼的临界游速分别比对照组(7.36 mg/L)降低了64.79%、47.53%和20.96%。研究发现, 低氧条件下鱼类的临界游速受呼吸系统的限制, 而不同于常氧条件下受运动系统(肌肉组织)的限制^[5, 24]。缺氧时, 鱼类会提高呼吸循环功能以满足游泳运动对氧气的需求, 但这不仅会消耗大量能量, 还会造成渗透压失衡^[22]。因此, 低氧条件下临界游速降低可能是由于呼吸循环系统摄取、运输氧气及代谢废物能力降低所致。

鱼类的有氧游泳运动完全依赖于有氧代谢供能, 而无氧游泳运动主要由白肌无氧代谢供能, 能量底物主要包括糖原、ATP和磷酸肌酸^[7]。本实验结果表明, 缺氧对红鳍东方鲀幼鱼无氧游泳能力的影响程度不如对有氧游泳能力的影响。除溶氧含量为2.14 mg/L时实验鱼的最大游速比对照组降低了

51.18%外, 其他2组并无显著变化。分析认为, 严重缺氧环境下, 鱼类处于生理胁迫状态, 血浆皮质醇和血乳酸含量升高^[23]。而乳酸积累导致血液pH降低, 这会抑制无氧糖酵解酶的活力^[25], 进而减慢肌糖原分解的速度, 降低实验鱼的无氧游泳能力。

由于生理生化存在差异及长期的进化, 不同鱼类对水体溶氧变化的敏感性不同^[5, 22, 24], 进而影响其在环境溶氧骤变时的适应能力及生存。本实验中, 溶氧含量下降21%时红鳍东方鲀幼鱼的临界游速即显著降低, 而当溶氧水平降至50%饱和度或更低时, 瓦氏黄颡鱼(*Peltebagrus vachelli*)和鳊幼鱼的临界游速才显著下降^[5, 24]。这表明红鳍东方鲀幼鱼对环境溶氧水平的敏感性较高, 对低氧的适应性较弱, 溶氧水平下降会降低其有氧游泳能力, 进而影响其觅食和分布。因此, 溶氧水平较高的水域更有利于红鳍东方鲀放流苗种的存活和生长, 也有助于提高增殖放流的成功率。红鳍东方鲀幼鱼的最大游速在溶氧含量下降71%时才显著变化, 这表明其在低溶氧环境下仍可保持较高的捕食和反捕食能力, 这对其生存具有重要意义。

综上, 低温和缺氧会显著降低红鳍东方鲀幼鱼的游泳能力, 而盐度对其游泳能力无显著影响。研究结果为红鳍东方鲀增殖放流技术的改良提供了参考依据。

参考文献:

- [1] Wang Q Y, Zhuang Z M, Deng J Y, et al. Stock enhancement and translocation of the shrimp *Penaeus chinensis* in China[J]. Fish Res, 2006, 80(1): 67-79.
- [2] Masuda R, Tsukamoto K. Stock enhancement in Japan: Review and perspective[J]. Bull Mar Sci, 1998, 62(2): 337-358.
- [3] Zhang Y Q, Yin J S, Xu G F, et al. Effects of the water temperature and the weight on the critical swimming speed and oxygen consumption rate of *Salvelinus leucomaenis*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(4): 661-668. [张永泉, 尹家胜, 徐革峰, 等. 水温和体重对白斑红点鲑临界游泳速度和游动耗氧率的影响[J]. 水生生物学报, 2015, 39(4): 661-668.]
- [4] Yetsko K, Sancho G. The effects of salinity on swimming performance of two estuarine fishes, *Fundulus heteroclitus* and *Fundulus majalis*[J]. J Fish Biol, 2015, 86(2): 827-833.
- [5] Zhao W W, Cao Z D, Fu S J. The effects of dissolved oxygen level on the swimming performances of juvenile *Parabramis pekinensis* and *Spinibarbus sinensis*[J]. Acta Hydro-

- biologica Sinica, 2013, 37(2): 314–320. [赵文文, 曹振东, 付世建. 溶氧水平对鳊鱼、中华倒刺鲃幼鱼游泳能力的影响[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 314–320.]
- [6] Wang P, Gui F K, Wu C W. Classification of fish swimming speed[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(5): 1137–1146. [王萍, 桂福坤, 吴常文. 鱼类游泳速度分类方法的探讨[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1137–1146.]
- [7] Fu S J, Cao Z D, Zeng L Q, et al. Fish Swimming—Strategy and Daptive Evolution[M]. Beijing: Science Press, 2014: 95–97. [付世建, 曹振东, 曾令清, 等. 鱼类游泳运动——策略与适应性进化[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 95–97.]
- [8] Cornelius H. Fatigue and exercise tests with fish[J]. Comp Biochem Physiol A, 1995, 112(1): 1–20.
- [9] Kieffer J D. Perspective-Exercise in fish 50+ years and going strong[J]. Comp Biochem Physiol A, 2010, 156(2): 163–168.
- [10] Pang X, Fu S J, Cao Z D, et al. The effects of fasting and acclimation temperature on the resting metabolism and swimming performance in qingbo (*Spinibarbus sinensis*)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1854–1860. [庞旭, 付世建, 曹振东, 等. 饥饿和温度驯化对中华倒刺鲃静止代谢和游泳能力的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1854–1860.]
- [11] Yang Y, Cao Z D, Fu S J. Effects of water temperature on the critical swimming speed and metabolic scope of juvenile *Parabramis pekinensis*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1260–1264. [杨阳, 曹振东, 付世建. 温度对鳊鱼临界游泳速度和代谢范围的影响[J]. 生态学报, 2013, 32(5): 1260–1264.]
- [12] Xu G F, Wang Y Y, Han Y, et al. Effect of locomotion and feeding on metabolic mode of juvenile lenok, *Brachymystax lenok* (Pallas) under different water temperatures[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1156–1162. [徐革锋, 王裕玉, 韩英, 等. 不同温度条件下运动和摄食对细鳞鲴幼鱼代谢模式的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1156–1162.]
- [13] Xu G F, Mou Z B, Han Y, et al. Effects of temperature and flow velocity on swimming of juvenile manchurian trout *Brachymystax lenok* (Pallas) and the relationship to respiratory metabolism[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(4): 786–792. [徐革锋, 牟振波, 韩英, 等. 温度和流速对细鳞鲴(*Brachymystax lenok*)幼鱼游泳能力的影响及其与呼吸代谢的关系[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(4): 786–792.]
- [14] Fuiman L, Batty R. What a drag it is getting cold: partitioning the physical and physiological effects of temperature on fish swimming[J]. J Exp Biol, 1997, 200(12): 1745–1755.
- [15] Hunt von Herbing I. Effects of temperature on larval fish swimming performance: the importance of physics to physiology[J]. J Fish Biol, 2002, 61(4): 865–876.
- [16] Ma A J, Li W Y, Wang X A, et al. Reasearch progress and outlook of *Takifug rubripes* culture techniques[J]. Marine Sciences, 2014(2): 116–121. [马爱军, 李伟业, 王新安, 等. 红鳍东方鲀养殖技术研究现状及展望[J]. 海洋科学, 2014(2): 116–121.]
- [17] Lee K M, Kaneko T, Aida K. Low-salinity tolerance of juvenile fugu *Takifugu rubripes*[J]. Fish Sci, 2005, 71(6): 1324–1331.
- [18] Chatelier A, McKenzie D J, Claireaux G. Effects of changes in water salinity upon exercise and cardiac performance in the European seabass (*Dicentrarchus labrax*)[J]. Mar Biol, 2005, 147(4): 855–862.
- [19] Brauner C J, Shrimpton J M, Randall D J. Effect of short-duration seawater exposure on plasma ion concentrations and swimming performance in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) parr[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1992, 49(11): 2399–2405.
- [20] McKenzie D J, Cataldi E, Romano P, et al. Effects of acclimation to brackish water on the growth, respiratory metabolism, and swimming performance of young-of-the-year Adriatic sturgeon (*Acipenser naccarii*)[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2001, 58(6): 1104–1112.
- [21] McKenzie D J, Cataldi E, Romano P, et al. Effects of acclimation to brackish water on tolerance of salinity challenge by young-of-the-year Adriatic sturgeon (*Acipenser naccarii*)[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2001, 58(6): 1113–1121.
- [22] Fu S J, Li X M, Zhao W W, et al. The locomotive and metabolic strategies of goldfish under different dissolved oxygen level[J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science, 2010, 27(3): 14–18, 26. [付世建, 李秀明, 赵文文, 等. 不同溶氧水平下锦鲤的运动和代谢适应对策[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2010, 27(3): 14–18, 26.]
- [23] Herbert N A, Steffensen J F. The response of Atlantic cod, *Gadus morhua*, to progressive hypoxia fish swimming speed and physiological stress[J]. Mar Biol, 2005, 147(6): 1403–1412.
- [24] Pang X, Yuan X Z, Cao Z D, et al. The effects of dissolved oxygen levels on resting oxygen consumption and swimming performance in juvenile darkbarbel catfish *Peltebagrus vachelli*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(2): 255–261. [庞旭, 袁兴中, 曹振东, 等. 溶氧水平对瓦氏黄颡鱼幼鱼静止耗氧率和临界游泳运动能力的影响[J]. 水生生物学报, 2012, 36(2): 255–261.]
- [25] Baldwin J, Gupta A, Iglesias X. Scaling of anaerobic energy metabolism during tail flipping behaviour in the freshwater crayfish, *Cherax destructor*[J]. Mar Freshw Res, 1999, 50: 183–187.

Effects of water temperature, salinity, and dissolved oxygen on the swimming ability of Japanese pufferfish, *Takifugu rubripes* juveniles

YU Xiaoming, CUI Wenda, CHEN Lei, XING Binbin, REN Heng, ZHANG Guosheng

Center for Marine Ranching Engineering Science Research of Liaoning, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

Abstract: We investigated the effects of water temperature, salinity, and dissolved oxygen (DO) content on the swimming ability of juvenile tiger puffer *Takifugu rubripes*. The critical swimming speed (U_{crit} , cm/s) and maximum swimming speed (U_{max} , cm/s) of the juveniles was determined under different temperatures (15.2°C, 20.2°C, 25.6°C and 30.4°C), salinities (0, 10, 20, 32 and 40), and DO content (2.14 mg/L, 4.10 mg/L, 5.81 mg/L and 7.36 mg/L). The U_{crit} and U_{max} both increased as water temperature (T , °C) was increased from 15.2 to 30.4°C: U_{crit} increased from 13.12 to 29.07 cm/s; U_{max} increased from 17.51 to 37.38 cm/s. The relationship between T and U_{crit} or U_{max} could be interpreted with quadratic models, as: $U_{crit} = -0.095T^2 + 5.450T - 47.79$, $R^2 = 0.995$ ($P < 0.01$); and $U_{max} = -0.018T^2 + 2.204T - 12.27$, $R^2 = 0.981$ ($P < 0.01$). The U_{crit} and U_{max} also increased as DO was increased from 2.14 to 7.36 mg/L: U_{crit} increased from 10.40 to 29.54 cm/s; U_{max} increased from 16.43 to 33.65 cm/s. The relationship between DO and U_{crit} or U_{max} could be interpreted with quadratic models, as: $U_{crit} = 0.230DO^2 + 1.561DO + 5.84$, $R^2 = 0.995$ ($P < 0.01$); and $U_{max} = -0.806DO^2 + 11.10DO - 3.919$, $R^2 = 0.985$ ($P < 0.01$). The salinity challenges had no significant effects upon U_{crit} and U_{max} of the juvenile tiger puffer ($P > 0.05$). Temperature is known to strongly influence the contractile properties of muscles. According to “compression of the recruitment order theory”, recruiting all of a fish’s aerobic fibers at a lower speed results in reduced sustainable performance. The effects of temperature on the physical properties of water may also affect fish swimming ability. The viscosity of water decreases as temperature increases, and this may increase the swimming efficiency of fish in warmer waters. The swimming ability of juvenile tiger puffer might be limited by the cardiorespiratory system in response to hypoxia as a result of impaired functioning of the oxygen transport and exchange system. Furthermore, as another response to hypoxia, increases in respiratory frequency to improve the absorbance of oxygen must evoke an additional energy cost to the animal. The absence of any significant changes in the U_{crit} and U_{max} of the juvenile tiger puffer following the various salinity challenges could be a direct result of this species’ exceptional ability for maintaining plasma homeostasis and water balance in the tissues. In natural environments, lower temperatures and hypoxia would reduce the swimming ability of juvenile tiger puffer and thereby weaken their predation and/or predator-avoidance capacity. These findings increase our understanding of the biology and ecology of the tiger puffer, and may be useful for enhancing stocks of this near-threatened species.

Key words: *Takifugu rubripes*; temperature; salinity; dissolved oxygen; critical swimming speed; maximum swimming speed

Corresponding author: ZHANG Guosheng. E-mail: hyx-zhang@dlou.edu.cn