

环境因子对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响

王刚^{①②} 李加儿^{①*} 区又君^① 王静香^{①②} 张建生^③

① 中国水产科学研究院南海水产研究所 广州 510300; ② 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306;

③ 省级饶平石鲈科鱼类良种场 广东 饶平 515723

摘要:运用封闭流水式实验方法研究温度、盐度、pH 和流速对卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*) 幼鱼耗氧率和排氨率的影响。实验结果表明,随着温度的升高,耗氧率和排氨率均是先增大后减小,当温度为 27℃ 时,耗氧率和排氨率达最大值,温度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响显著 ($P < 0.01$);耗氧率和排氨率随着盐度的升高均出现降低的趋势,盐度对耗氧率和排氨率的影响均显著 ($P < 0.01$);随着 pH 的升高,耗氧率的变化不明显 ($P > 0.05$),排氨率呈先增大后减小的趋势,pH 对卵形鲳鲹幼鱼排氨率的影响显著 ($P < 0.05$);随着流速的增大,耗氧率和排氨率先增大后减小,在流速为 150 ml/min 时达最大值,流速对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响均达显著水平 ($P < 0.01$)。

关键词:卵形鲳鲹;幼鱼;环境因子;耗氧率;排氨率

中图分类号:Q493 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2011)06-80-08

Influence of Environmental Factors on Oxygen Consumption and Ammonia Excretion of Juvenile *Trachinotus ovatus*

WANG Gang^{①②} LI Jia-Er^{①*} OU You-Jun^① WANG Jing-Xiang^{①②} ZHANG Jian-Sheng^③

① South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300;

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

③ Provincial Well-bred Pomadasids Fish Farm, Raoping, Guangdong 515723, China

Abstract: The effects of temperature, salinity, pH and water velocities on oxygen consumption and ammonia excretion of *Trachinotus ovatus* were determined by the closed flow experimental methods. The results showed that the oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile *T. ovatus* would be increasing as water temperature increasing, and the volumes reached to a peak value at 27°C. Water temperature had significant effects on oxygen consumption and ammonia excretion ($P < 0.01$). The oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile *T. ovatus* decreased as the salinity increasing, and salinity also had significant effects on the oxygen consumption and ammonia excretion ($P < 0.01$). As the pH increases, the oxygen consumption did not change significantly ($P > 0.05$). The value of pH had a significant effect on the ammonia excretion ($P < 0.05$), the ammonia excretion was increased first, then decreased with pH increasing. Oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile *T. ovatus* increased gradually as water velocity increasing and reached to peak values at 150 ml/min, then decreased gradually as water velocity over 150 ml/min. The effects of water velocities on oxygen consumption and ammonia excretion in juvenile *T. ovatus* were significant ($P < 0.01$).

Key words: *Trachinotus ovatus*; Juvenile; Environmental factors; Oxygen consumption; Ammonia excretion

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (No. 2008YD02);

* 通讯作者, E-mail: lje001@126.com;

第一作者简介 王刚,男,硕士研究生;研究方向:水产养殖基础生物学;E-mail: gangg1111@126.com。

收稿日期:2011-05-21,修回日期:2011-09-06

卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)隶属于鲈形目(Perciformes) 鲳科(Carangidae) 鲳亚科(Trachinotinae) 鲳属,俗称金鲳、卵鲳、黄腊鲳、红三等^[1]。卵形鲳鲹为广盐暖水性中上层鱼类,适宜温度为16~36℃,当水温下降至16℃以下时,停止摄食,水温在16~18℃时,摄食减少,当温度低于14℃时,会出现死亡;适宜盐度3~33。分布于中国的东海、南海和黄海,主要集中在广东、福建、海南、广西等省区沿海水域^[2]。

呼吸和排泄是鱼类进行能量代谢的基本生理活动,它不仅能够反映鱼类的生理状态,也同时反映了环境条件对其自身的影响。通过对鱼类呼吸和排泄的研究,能够了解鱼类的新陈代谢规律、生理和生存状况,为鱼类生理、鱼类阶段发育的研究和鱼类养殖的实际生产应用提供参考。目前,有关鱼类呼吸与排泄方面国内外学者进行了一些研究^[3-11]。笔者对卵形鲳鲹胚胎及早期仔鱼、幼鱼的耗氧率和排氮率等方面的研究已做了报道^[12-13],本文为上述研究的续篇,旨在探讨温度、盐度、pH及流速等环境因子对卵形鲳鲹幼鱼呼吸和排泄的影响,为卵形鲳鲹呼吸生理学研究提供系统的基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料 实验所用卵形鲳鲹幼鱼于2010年7~8月取自广东省饶平县省级石鲈科鱼类良种场,为人工繁育培养苗种。选取健康无病,大小均匀,体重为(5.604±0.967)g($n=456$ 尾)的个体进行实验。实验开始前,先将幼鱼放入室内水池暂养2周,暂养期间控制水温(29.0±0.5)℃,每天投喂2次配合饲料,早晚各换水一次。实验用水取自当地自然海水经沉淀、砂滤,水温29℃,盐度30,pH为7.9。

1.2 实验方法 采用封闭流水式实验方法,即将实验鱼放入密闭的呼吸室中,将流速控制在150 ml/min,保持稳定,保证呼吸室内含有较充足的溶解氧。实验鱼放入呼吸室后,排尽呼吸室内空气,水由贮水箱流出,经进水口流入呼吸室内。实验鱼在呼吸室内适应2~3 h后开始取样,测定进出水口的水温、溶氧量和氨氮浓度

等数据。每实验组于同一呼吸室中放入实验鱼8尾,同时设3个平行组和1个空白对照组,实验组与对照组均采用同一水源,取平均值作为测定的最终结果。水中的溶解氧含量用Winkler 碘量法测定,水中氨氮含量用次溴酸盐氧化法测定^[14]。

1.3 实验梯度设计 温度实验中设5个梯度,即为21℃、24℃、27℃、30℃和33℃,通过控温设备控制实验海水温度并保持稳定;盐度实验设5个梯度,即13、18、23、28和33,高盐度海水用加海盐后海水与普通海水进行调配,低盐度海水由普通海水加淡水调配,采用日产ATAGO型折光计测定海水盐度;pH也设5个梯度,即7.5、8.0、8.5、9.0、9.5,采用1 mol/L的NaOH或1 mol/L的HCl调节海水的pH,并用PHB-3笔式pH计进行测定;流速实验设定4个梯度:100 ml/min、150 ml/min、200 ml/min、250 ml/min。

1.4 实验数据处理 实验数据处理采用李加儿等^[7]的方法。每次实验结束后,吸干实验鱼体表水分,用感量为0.01 g的电子天平精确称量鱼体重量,用下列公式计算实验结果。

耗氧量(OC)(mg/h) = $(D_1 - D_2) \times V$; 耗氧率(OC_R)[mg/(g·h)] = $(D_1 - D_2) \times V/W$; 排氮量(AE)(mg/h) = $(N_2 - N_1) \times V$; 排氮率(AE_R)[mg/(g·h)] = $(N_2 - N_1) \times V/W$; 氨熵(AQ) = AE_R/OC_R ; 能量代谢率(R_m) = $K \times OC_R$; 式中, D_1 为进水口溶氧量(mg/L), D_2 为出水口溶氧量(mg/L), N_1 为进水口氨氮含量(mg/L), N_2 为出水口氨氮含量(mg/L), V 为实验流速(ml/min), W 为实验鱼体重(g), K 为氧卡系数(13.56 J/mg, O_2)。

实验结果中数据用平均值±标准差的形式描述,并采用Excel和SPSS软件对数据进行统计分析,利用方差分析检验不同环境因子对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率、排氮率影响的显著性,组间差异采用Duncan's多重比较,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 温度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氮率的影响 卵形鲳鲹幼鱼耗氧率在不同温度下的变

化见图 1,伴随着温度的升高,耗氧率先增大后减小,当温度为 27℃ 时,耗氧率达最大值 1.195 mg/(g·h),经方差分析,温度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率的影响显著($P < 0.01$)。温度与耗氧率之间的相关关系可用二元方程 $Y = -0.140 2X^2 + 0.913 5X - 0.389 6$ ($R^2 = 0.881 8$) 表示,式中, Y 为耗氧率, X 为温度。不同温度对卵形鲳鲹幼鱼排氨率的影响见图 2,排氨率

先随着温度的升高而增加,当温度为 27℃ 时,排氨率达最大值 4.86×10^{-2} mg/(g·h),之后随着温度的增加而减小。经方差分析,温度对卵形鲳鲹幼鱼排氨率的影响显著($P < 0.01$),温度与排氨率之间的相关关系可用二元方程 $Y = -0.007 1X^2 + 0.046 6X - 0.030 6$ ($R^2 = 0.943 9$) 表示,式中, Y 为排氨率, X 为温度。

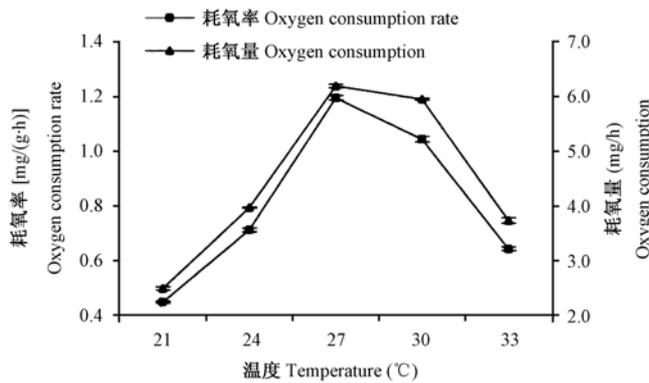


图 1 温度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧量、耗氧率的影响

Fig. 1 The effect of temperature on oxygen consumption and oxygen consumption rate in *Trachinotus ovatus*

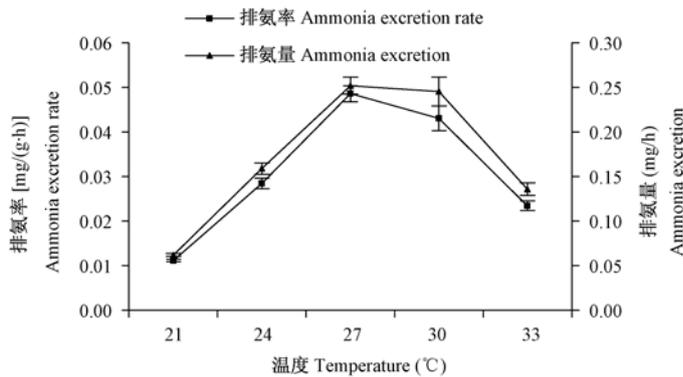


图 2 温度对卵形鲳鲹幼鱼排氨量、排氨率的影响

Fig. 2 The effect of temperature on ammonia excretion and ammonia excretion rate in *Trachinotus ovatus*

2.2 盐度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响 从图 3 和图 4 中可以看出,卵形鲳鲹幼鱼的耗氧率和排氨率在低盐情况下较高,伴随着盐度的升高,耗氧率和排氨率均降低。经方差分析,盐度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响均显著($P < 0.01$);不同盐度组间比较,在盐度 13 与 18 组之间,23、28 和 33 组之间,盐度对耗氧率的影响不显著($P > 0.05$),在盐度

13 与 18 组之间,28 和 33 组之间,盐度对排氨率的影响也不显著($P > 0.05$)。盐度与耗氧率之间的相关关系可用二元方程表示为 $Y = -0.006 5X^2 - 0.080 5X + 0.918 2$ ($R^2 = 0.974 2$),式中, Y 为耗氧率, X 为盐度。盐度与排氨率之间的相关关系可用二元方程 $Y = -0.000 4X^2 - 0.003 9X + 0.058 6$ ($R^2 = 0.963 9$) 来表示,式中, Y 为排氨率, X 为盐度。

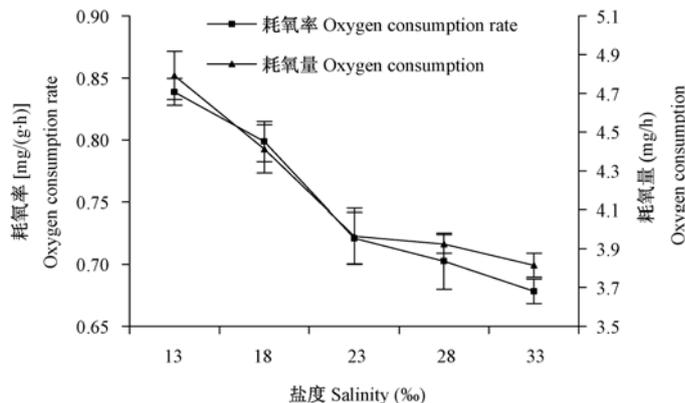


图 3 盐度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧量、耗氧率的影响

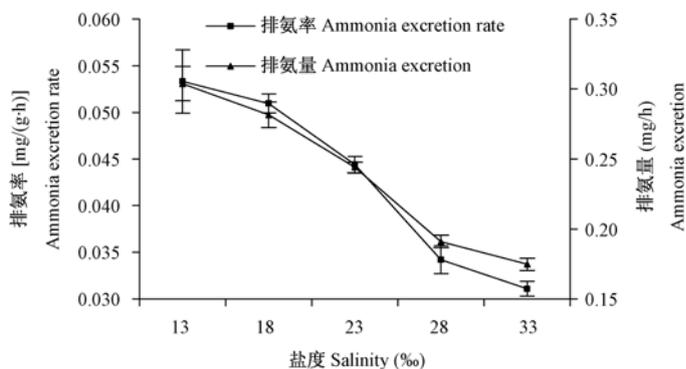
Fig. 3 The effect of salinity on oxygen consumption and oxygen consumption rate in *Trachinotus ovatus*

图 4 盐度对卵形鲳鲹幼鱼排氨量、排氨率的影响

Fig. 4 The effect of salinity on ammonia excretion and ammonia excretion rate in *Trachinotus ovatus*

2.3 pH 对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响 pH 对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响见图 5 和图 6, 随着 pH 的升高, 耗氧率的变化不明显, 经方差分析, pH 对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率的影响不显著 ($P > 0.05$); 排氨率呈先增大后减小的趋势, 在 pH 为 8.0 时排氨率达最大值 $3.00 \times 10^{-2} \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 经方差分析, pH 对卵形鲳鲹幼鱼排氨率的影响显著 ($P < 0.05$)。pH 与卵形鲳鲹幼鱼排氨率之间的相关关系可用二次方程 $Y = -0.0010X^2 + 0.0056X + 0.0221$ ($R^2 = 0.9265$) 表示, 式中, Y 为排氨率, X 为 pH。

2.4 流速对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响 不同流速对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响见图 7、8。随着流速的增大, 耗氧率和排氨率先增大后减小, 在流速为 150 ml/min

时达最大值, 分别为 $1.299 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 $3.92 \times 10^{-2} \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。经方差分析, 流速对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响均达显著水平 ($P < 0.01$), 其中流速组 100 ml/min 与 250 ml/min 之间, 150 ml/min 与 200 ml/min 之间, 流速对排氨率的影响不显著 ($P > 0.05$)。流速与耗氧率和排氨率之间的相关关系可分别用二次方程表达为 $Y = -0.0827X^2 + 0.4389X + 0.7092$ ($R^2 = 0.8821$) (式中, Y 为耗氧率, X 为流速) 和 $Y = -0.0073X^2 + 0.0378X - 0.0078$ ($R^2 = 0.9922$) (式中, Y 为排氨率, X 为流速)。

2.5 不同环境因子对卵形鲳鲹幼鱼氨熵和能量代谢率的影响 温度、盐度、pH 及流速对卵形鲳鲹幼鱼的氨熵和能量代谢率的影响见图 9。从图 9A 中可以看出, 温度、pH、流速对卵形

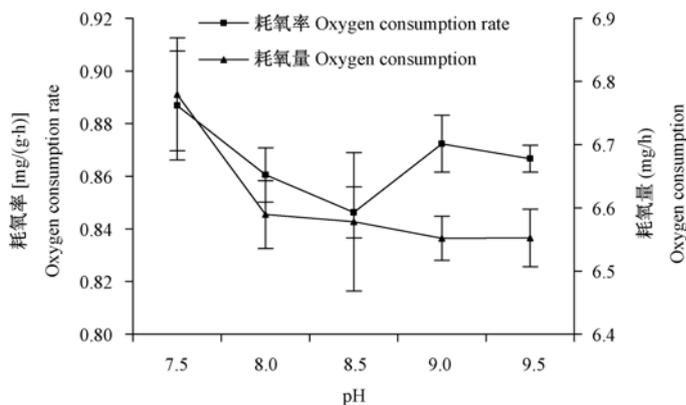


图 5 pH 对卵形鲳鲹幼鱼耗氧量、耗氧率的影响

Fig. 5 The effect of pH on oxygen consumption and oxygen consumption rate in *Trachinotus ovatus*

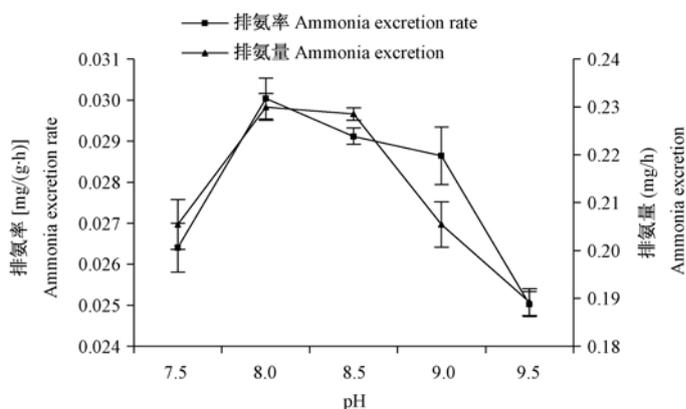


图 6 pH 对卵形鲳鲹幼鱼排氨量、排氨率的影响

Fig. 6 The effect of pH on ammonia excretion and ammonia excretion rate in *Trachinotus ovatus*

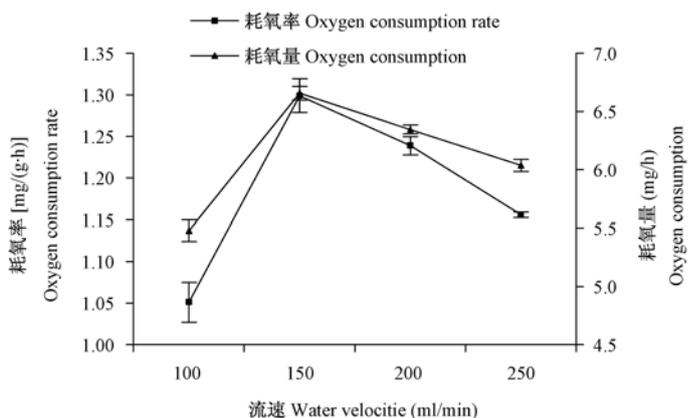


图 7 流速对卵形鲳鲹幼鱼耗氧量、耗氧率的影响

Fig. 7 The effect of water velocity on oxygen consumption and oxygen consumption rate in *Trachinotus ovatus*

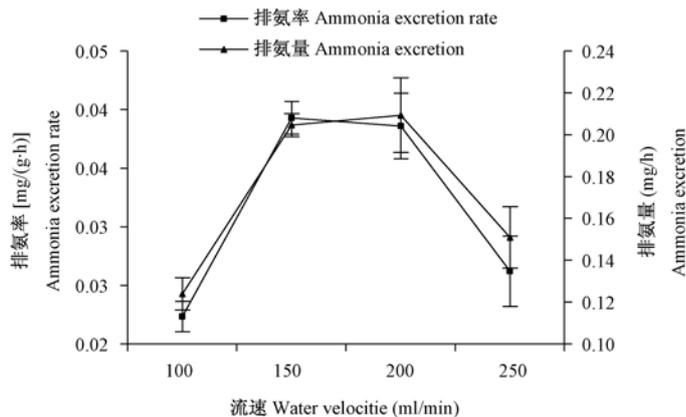


图 8 流速对卵形鲳鲹幼鱼排氨量、排氨率的影响

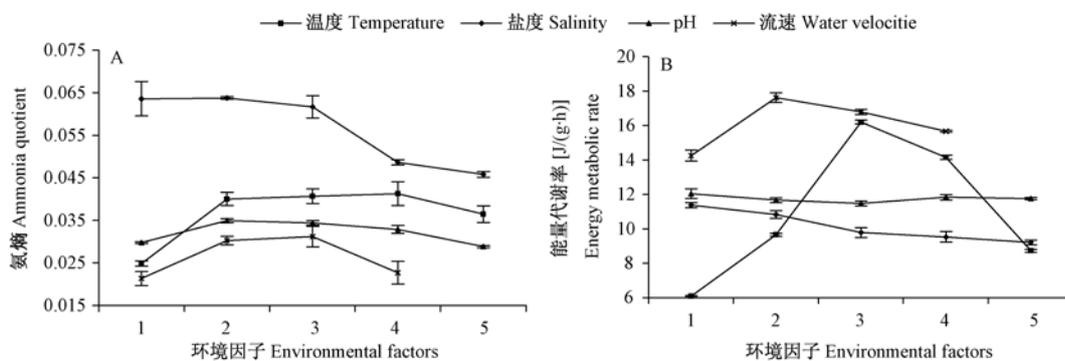
Fig. 8 The effect of water velocity on ammonia excretion and ammonia excretion rate in *Trachinotus ovatus*

图 9 不同环境因子对卵形鲳鲹幼鱼氨氮(A)和能量代谢率(B)的影响

Fig. 9 Influence of environmental factors on ammonia quotient (A) and energy metabolic rate (B) in *Trachinotus ovatus*

图中横坐标刻度(1,2,3,4,5)分别代表不同温度梯度(21,24,27,30,33℃),盐度梯度(13,18,23,28,33), pH 梯度(7.5,8.0,8.5,9.0,9.5),流速梯度(100,150,200,250 ml/min)。

The abscissa shown (1, 2, 3, 4, 5) represent the temperature gradient (21, 24, 27, 30, 33℃), the salinity gradient (13, 18, 23, 28, 33), the pH gradient (7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5) and the water velocity gradient (100, 150, 200, 250 ml/min), respectively.

鲳鲹幼鱼氨氮的影响相似,均呈先增后减的趋势,盐度对卵形鲳鲹幼鱼氨氮的影响变化明显,呈逐渐下降的趋势。经方差分析,温度、盐度和 pH 对卵形鲳鲹幼鱼氨氮的影响显著 ($P < 0.01$),流速对卵形鲳鲹幼鱼氨氮的影响也达到显著水平 ($P < 0.05$)。从图 9B 中可以看出,温度和流速对卵形鲳鲹幼鱼能量代谢率的影响曲线相似,均呈单峰曲线;随着盐度的升高,卵形鲳鲹幼鱼能量代谢率逐渐下降;pH 对卵形鲳鲹幼鱼能量代谢率的影响变化不明显。经方差分析,温度、盐度、流速均对卵形鲳鲹幼鱼能量代谢率的影响显著 ($P < 0.01$),pH 对卵形鲳

幼鱼能量代谢率的影响不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 温度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响 温度是影响生物生长、发育及新陈代谢的主要环境因子之一。许多学者已证实水温与耗氧率和排氨率存在密切的关系,在一定范围内,水温的高低与耗氧率和排氨率的大小呈正比^[15]。鱼类是变温动物,会随着外界环境的改变发生相应的变化,在适宜温度范围内,水温的升高促使鱼体温的升高,鱼体组织细胞内的各种酶活性增强,组织内生理生化反应加快,新陈

代谢水平增高,进而耗氧率和排氨率也随之增大,反之呼吸作用减弱,耗氧率和排氨率减小^[16]。通过对牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)^[17]、梭鱼(*Liza haematocheila*)^[18]、花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[19]的代谢的研究,认为鱼类的耗氧率和排氨率均随水温的上升而增加。卵形鲳鲹幼鱼的耗氧率和排氨率在一定的温度范围内符合此规律,幼鱼耗氧率和排氨率随着水温的升高而增加,当超过这个范围后,耗氧率和排氨率也随之降低。从本实验卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率最大值出现的温度推断,水温 26 ~ 30℃ 是卵形鲳鲹较快生长的最适温度。

3.2 盐度对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响 盐度也是影响鱼体新陈代谢的重要环境因子之一,各项研究表明,盐度对多种鱼类的胚胎发育、早期阶段的生长等都存在着显著的影响^[20-21]。鱼的标准代谢可由两部分组成,一是组织的修复与更新所消耗的能量;二是维持内稳态所消耗的能量。鱼类在等渗点时消耗能量最少,生长率最高,而远离等渗点时因消耗更多的能量用于渗透压调节,耗氧率高^[22-23]。本次盐度梯度实验发现,卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的最大值均出现在低盐组,随着盐度的增高,耗氧率和排氨率均减小,没有发现最低点,有关卵形鲳鲹幼鱼最适宜生长盐度需进一步的研究。

3.3 pH 对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响 水体的 pH 变化对鱼类的呼吸和排泄都会产生影响,在适合 pH 范围内,鱼类的耗氧率较低,这是由于体内脂肪和碳水化合物分解代谢的比例远大于蛋白质的代谢水平;而当 pH 不适合时,鱼体将通过改变体内代谢状况,消耗较多的能量以适应外界环境变化,即增加蛋白质代谢比例,耗氧率升高。吴常文等对杂交鲟(hybrid sturgeon)^[24]的研究发现,在一定 pH 范围内,杂交鲟耗氧率是随 pH 的增大而升高,反之降低;而闫茂仓等对鲢鱼(*Miichthys mizuy*)^[25]的研究发现,当 pH 6.5 ~ 9.0 时,鲢鱼幼鱼的耗氧率变化并不明显。本实验中,pH 对卵形鲳鲹幼鱼的耗氧率的影响变化也不明显,可能是因为卵形鲳鲹幼鱼对 pH 有较强的适应性,具体

原因有待于进一步的研究。

3.4 流速对卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的影响 水流是鱼类生活环境中的非生物性因子,能够刺激鱼类的感觉器官,使其产生相应的活动方式及反应机制^[26]。对竹荚鱼(*Trachurus trachutits*)^[27]、舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[28]和银大麻哈鱼(*Oncorhynchus kisutch*)^[29]的研究结果发现,鱼类在静水条件下的耗氧率要明显低于流水条件下,且随着流速的提高,其耗氧率也逐渐增加。本实验结果表明,适宜的水流范围内,卵形鲳鲹幼鱼的耗氧率和排氨率均随水流速提高而增大,说明水流对鱼体造成的逆流游泳运动会增加机体的耗能,从而提高代谢率;一旦水流速度超出适宜的范围,逆流游泳运动减少,代谢率也随之降低。

参 考 文 献

- [1] 区又君,李加儿. 卵形鲳鲹的早期胚胎发育. 中国水产科学, 2005, 12(6): 787-789.
- [2] 成庆泰,郑葆珊. 中国鱼类系统检索. 北京: 科学出版社, 1987: 341-342.
- [3] 孙宝柱,黄浩,曹文宣,等. 厚唇鲂和圆口铜鱼耗氧率与窒息点的测定. 水生生物学报, 2010, 34(1): 88-93.
- [4] Cao Z D, Fu S J. The effect of exhaustive exercise training and fasting on post-exercise oxygen consumption rate in southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen). Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(5): 837-843.
- [5] 庄平,徐滨,章龙珍,等. MS-222 和丁香酚对中华鲟幼鱼耗氧率与排氨率的影响. 中国水产科学, 2009, 16(4): 612-618.
- [6] 李加儿. 尖吻鲈幼鱼耗氧率初步研究. 海洋学报, 1991, 13(3): 424-430.
- [7] 李加儿,刘士瑞,区又君,等. 浅色黄姑鱼幼鱼耗氧率、排氨率及窒息点的初步研究. 海洋学报, 2008, 30(5): 165-170.
- [8] 李加儿,刘士瑞,区又君,等. 花尾胡椒鲷幼鱼的呼吸和排泄代谢. 南方水产, 2009, 5(2): 34-39.
- [9] Herrmann J P, Enders E C. Effect of body size on the standard metabolism of horse mackerel. Journal of Fish Biology, 2000, 57(3): 746-760.
- [10] Yamamoto K, Takao S. Relationship between oxygen consumption and body weight in 36 marine teleost fish under resting and normoxic condition. Suisan Zoshoku, 1990, 38(1): 41-45.

- [11] Clause R G. Oxygen consumption in fresh water fishes. *Ecology*, 1936, 17(2): 216 - 226.
- [12] 王刚, 李加儿, 区又君, 等. 卵形鲳鲹幼鱼耗氧率和排氨率的初步研究. *动物学杂志*, 2010, 45(3): 116 - 121.
- [13] 王刚, 李加儿, 区又君, 等. 卵形鲳鲹胚胎及早期仔鱼耗氧量的研究. *生态科学*, 2010, 29(6): 518 - 523.
- [14] 湛江水产专科学校. *淡水养殖水化学*. 北京: 农业出版社, 1980: 219 - 224.
- [15] 殷名称. *鱼类生态学*. 北京: 中国农业出版社, 1995: 137 - 138.
- [16] 王跃斌, 孙忠, 余方平, 等. 温度对黑鳍棘鲷耗氧率与排氨率的影响. *海洋渔业*, 2007, 29(4): 375 - 379.
- [17] 张兆琪, 张美昭, 李吉清, 等. 牙鲆鱼耗氧率、氮排泄率与体重及温度的关系. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 1997, 27(4): 483 - 489.
- [18] 线薇薇, 朱鑫华. 梭鱼标准代谢、内源氮排泄与体重和温度的关系. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2002, 32(3): 368 - 374.
- [19] 沈勤, 徐善良, 严小军, 等. 温度对花鲈饥饿代谢的影响. *中国水产科学*, 2008, 15(3): 500 - 505.
- [20] 许晓娟, 李加儿, 区又君. 盐度对卵形鲳鲹胚胎发育和早期仔鱼的影响. *南方水产*, 2009, 5(6): 31 - 35.
- [21] Rao G M M. Oxygen consumption of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) in relation to activity and salinity. *Canadian Journal of Zoology*, 1968, 46(4): 781 - 786.
- [22] De Silva C D, Premawansa S, Keembiyahetty C N. Oxygen consumption in *Oreochromis niloticus* (L.) in relation to development, salinity, temperature and time of day. *Journal of Fish Biology*, 1986, 29(2): 267 - 277.
- [23] Farmer G J, Beamish F W H. Oxygen consumption of *Tilapia nilotica* in relation to swimming speed and salinity. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1969, 26(4): 2807 - 2821.
- [24] 吴常文, 朱爱意, 赵向炯. 海水养殖杂交鲟耗氧量、耗氧率和窒息点的研究. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2005, 24(2): 100 - 104.
- [25] 闫茂仓, 单乐州, 邵鑫斌, 等. 盐度和 pH 值对鳊鱼幼鱼耗氧率和氨氮排泄率的影响. *台湾海峡*, 2007, 26(1): 85 - 91.
- [26] 何大仁, 蔡厚才. *鱼类行为学*. 厦门: 厦门大学出版社, 1998: 141 - 145.
- [27] Wardle C S, Soofiani N M, O' Neill F G. Measurements of aerobic metabolism of a school of horse mackerel at different swimming speeds. *Journal of Fish Biology*, 1996, 49(5): 854 - 862.
- [28] Herskin J, Stefensen J F. Energy savings in sea bass swimming in a school: measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds. *Journal of Fish Biology*, 1998, 53(2): 366 - 376.
- [29] Lee C G, Devlin R H, Farrell A P. Swimming performance, oxygen consumption and excess post-exercise oxygen consumption in adult transgenic and ocean-ranched coho salmon. *Journal of Fish Biology*, 2003, 62(4): 753 - 766.