

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2015.04.013

不同溶解氧水平对鲮生长、能量代谢和氧化应激的影响

刘旭佳, 黄国强, 彭银辉

(广西海洋研究所, 海洋生物技术重点实验室, 广西北海 536000)

摘要: 为研究溶解氧(DO)对鲮(*Mugil cephalus*)生长、能量代谢和氧化应激的影响,选择体质量为 (29.24 ± 0.08) g的鲮,在 $\rho(\text{DO})$ 分别为 (1.56 ± 0.39) mg·L⁻¹、 (4.13 ± 0.45) mg·L⁻¹和 (7.22 ± 0.46) mg·L⁻¹的流量控制循环水系统中养殖40 d,测定其特定生长率(SGR)、血浆、肌肉、肝脏和鳃组织的乳酸(LD)含量、过氧化物歧化酶(SOD)活力、总抗氧化能力(T-AOC)、抗超氧阴离子活力(ASOR)和丙二醛(MDA)含量,然后在循环水控温装置中 $[(25.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}]$ 测定每DO处理鲮的耗氧率、排氨率和氧氮比。结果表明,实验结束时鲮体质量随 $\rho(\text{DO})$ 的提高而增大,SGR与 $\rho(\text{DO})$ 呈正相关关系,DO对鲮的生长影响显著。鲮在DO_{7.22}处理下的耗氧率和排氨率最高,而氧氮比却明显低于其他2种DO水平。肝脏中T-SOD活力、T-AOC活力和ASOR活力均与SGR负相关,表明在此实验条件下,肝脏氧化应激指标的提高与快速生长冲突,即消耗较多的能量和物质参与氧化应激可能导致用于生长的能量物质减少,致使鲮生长速度下降。

关键词: 溶解氧; 鲮; 能量代谢; 氧化应激

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2015)04-0088-07

Effect of different dissolved oxygen levels on growth, energy metabolism and oxidative stress of *Mugil cephalus*

LIU Xujia, HUANG Guoqiang, PENG Yinhui

(Key Lab. of Marine Biotechnology, Guangxi Institute of Oceanology, Beihai 536000, China)

Abstract: To study the effects of dissolved oxygen levels on the growth, energy metabolism and oxidative stress of mullets (*Mugil cephalus*), we cultivated the healthy mullets at average body weight of (29.24 ± 0.08) g for 40 d in a circulating water flow control system $[(25 \pm 1)^\circ\text{C}]$ at dissolved oxygen levels of (1.56 ± 0.39) mg·L⁻¹, (4.13 ± 0.45) mg·L⁻¹ and (7.22 ± 0.46) mg·L⁻¹, respectively. The specific growth rate (SGR), LD, SOD, T-AOC, ASOR and MDA in the plasma, muscle, lung and gill were measured; the oxygen consumption rate, ammonia excretion rate and O : N ratio were also determined. The results show that the weight gain increased with increasing dissolved oxygen content; the SGR was positively correlated with dissolved oxygen content which had significant effect on the growth of mullets. The oxygen consumption rate and ammonia excretion rate were the highest at dissolved oxygen level of 7.22 mg·L⁻¹, while O : N value was the lowest. The contents of T-SOD, T-AOC and ASOR in liver were negatively correlated with SGR. It is revealed that since the increase of oxidative stress was conflict with rapid growth, the mullets will consumed more energy under oxidative stress, which leads to slow growth.

Key words: dissolved oxygen; *Mugil cephalus*; energy metabolism; oxidative stress

在天然或养殖水体中,常由于物理、化学或者生物等因素季节性或突发性变动,引起水体中溶解

收稿日期: 2014-11-20; 修回日期: 2014-12-25

资助项目: 广西自然科学基金项目(2011GXNSFA018116); 广西科技攻关计划项目(桂科攻 1222013-3)

作者简介: 刘旭佳(1986-),女,硕士,助理研究员,从事养殖生态学研究。E-mail: lxu0312@126.com

通信作者: 黄国强(1973-),男,博士,研究员,从事养殖生态学研究。E-mail: hughhgq@hotmail.com

氧(DO)降低甚至缺氧。水体缺氧不但使水域自净能力下降,还会导致水中有机物不能有效快速分解而引起有毒有害物质不断积累,同时富营养化更会加剧了水质恶化,严重影响到水生生物的生长和繁殖^[1-3]。研究发现,当 $\rho(\text{DO}) \leq 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,天然水域中的鱼类表现出逃避低氧环境和改变自身生活习性行为的现象,人工池塘养殖的鱼则出现生长缓慢、代谢受阻和抗病力差等现象^[4],当 $\rho(\text{DO})$ 为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可能出现死亡现象。由此可见,生活于缺氧水体的鱼类都可能会受到生理胁迫,使机体面临多种氧化压力和环境问题,从而影响养殖生物的健康生长和发育。研究低DO条件下鱼类能量代谢变化及其氧化应激情况不仅对水产养殖具有指导意义,还可为探讨鱼类适应DO变动环境的策略提供参考数据。

鲮(*Mugil cephalus*)是中国咸淡水养殖的重要经济鱼类之一,具有生长迅速、适应性强、养殖成本较低的特点。在实际养殖生产中,鲮具有净化养殖水质的作用,对维持养殖水域生态平衡和优化环境起到重要作用,具有较高的经济效益和环境效益。目前中国对于鲮的研究主要集中于繁殖生物学、营养、生理生态、养殖技术方面^[5-13],而DO对其生长、能量代谢和氧化应激影响的相关研究尚未见报道。因此探讨不同DO水平下鲮生长、能量代谢规律和对其氧化应激的影响意义重大,不但可以丰富鲮生理生态学的研究内容,还可为鲮适应水体低氧环境的机制提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料与驯养

实验鲮为2013年4月从广东茂名沿海捕获的体质量为约2g的天然鲮苗2000尾,运输至广西海洋研究所海水增殖试验基地后,在面积为 10 m^2 、深度为1m的水泥池中驯养约1个月,期间每天投喂2次(08:00和18:00),饲料为海马牌鳊鱼粉料,与细米糠按体积比1:1混匀后加水调和成面团状投喂,投饵量以每次投饵后1h后有少量剩饵为准。投饵1h后清理残饵和粪便。驯养期间海水水温为 $(25.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$;海水盐度为29~31,pH为 7.9 ± 0.2 ;自然光照周期,约为14L:10D。

1.2 实验设施

1.2.1 养殖实验 养殖实验装置为自行设计的

流量控制循环水系统,向各水族箱供水的蓄水池和高位蓄水池连续充气以保证DO水平接近饱和。玻璃水族箱规格为 $50 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$,水体约为80L。水族箱一侧以PVC管从底部供水,再从另一侧上方的溢水孔流出。在预实验的基础上,用PVC球阀控制进入每个水族箱的供水量来控制水族箱内的DO供应量,从而达到控制水族箱内的DO质量浓度。由于鲮跳跃能力较强且很活跃,因此每个水族箱用网眼为1cm的网片遮盖以防止其跳出。实验期间3个处理的流量分别控制在 $800 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $1300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $>2000 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,每天用哈希LDO溶氧仪监测水族箱 $\rho(\text{DO})$,结果显示 $\rho(\text{DO})$ 的平均值 \pm 标准误($\bar{X} \pm \text{SE}$)分别控制在 $(1.56 \pm 0.39) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(4.13 \pm 0.45) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(7.22 \pm 0.46) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此实验处理分别根据对应 $\rho(\text{DO})$ 编号为 $\text{DO}_{1.56}$ 、 $\text{DO}_{4.13}$ 和 $\text{DO}_{7.22}$ 。

1.2.2 能量代谢实验 采用容量为约30L的白色塑料桶作为测定能量代谢的容器,以可控温循环水系统作为水浴控制测定时的温度 $(25.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$,将白色塑料桶放入容量为800L的蓝色大桶(循环水控温)中测定耗氧率和排氨率。

1.3 实验设计

1.3.1 生长实验 实验设计3个 $\rho(\text{DO})$ 处理,分别为接近饱和 $7.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、接近一般鱼类缺氧临界值 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和较严重缺氧的 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每一处理设4个重复,使用12个水族箱,按照完全随机化原则设计水族箱的排列位置,每个水族箱放鱼12尾,实验共持续40d。实验用鱼采用在水泥池中驯化1月后,再挑选健康且体质量较均匀的鱼放入水族箱中进行为期10d的驯化,然后禁食24h,经 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的MS-222麻醉后,用吸水纸吸干表面水分后放入水族箱中进行实验,实验鱼初始平均体质量为 $(29.24 \pm 0.08) \text{ g}$ (表1)。

1.3.2 能量代谢实验 采用氮气排除水体中氧气的方法,分别将水体的初始 $\rho(\text{DO})$ 控制在 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,测定鲮幼鱼在8h内的耗氧率和排氨率。每一处理设置10个重复,并设置3个不放鱼的空白对照以测定水体耗氧量。每组实验用鱼为生长实验结束后的鲮,平均体质量分别为 $(31.45 \pm 1.06) \text{ g}$ 、 $(40.85.45 \pm 0.84) \text{ g}$ 和 $(55.36 \pm 2.10) \text{ g}$ 。

表1 溶解氧对鲮生长的影响

Tab. 1 Effect of dissolved oxygen on growth of mullets

处理 treatment	初始体质量/g initial body weight	终末体质量/g final body weight	特定生长率/%·d ⁻¹ specific growth rate
DO _{1.56}	29.25 ± 0.37 ^a	33.37 ± 1.02 ^a	0.33 ± 0.10 ^a
DO _{4.13}	29.31 ± 0.45 ^a	43.42 ± 0.34 ^b	0.98 ± 0.05 ^b
DO _{7.22}	29.16 ± 0.36 ^a	58.15 ± 2.28 ^c	1.72 ± 0.10 ^c

注：同一列中没有相同字母上标的数值相互之间差异显著，下表同此

Note: Values with different letters in the same row indicate significant difference among groups ($P < 0.05$). The same case in the following tables.

1.4 样品采集及预处理

1.4.1 生长实验 组织样品：实验鱼每个处理取样20尾，用100 mg·L⁻¹的MS-222麻醉后解剖，各取约0.5 g鳃、肝脏和肌肉，按1:9体积比加入0.09%生理盐水，然后在冰水浴中用IKA匀浆机匀浆10 min，在0℃下10 000 r·min⁻¹离心10 min，取上清液放入-30℃冰箱中保存待用。血液样品采集：在1.5 mL的离心管中各加入50 μL肝素钠抗凝剂，在65℃烘干24 h，冷却后备用。实验结束时，实验鱼用100 mg·L⁻¹的MS-222麻醉后，用经4℃预冷并用抗凝剂润洗的1 mL注射器从尾静脉取血，取出血液转移到离心管中摇匀，然后在0℃下10 000 r·min⁻¹离心10 min，取上清液放入-30℃冰箱中保存待用。

1.4.2 能量代谢实验 在生长实验结束时，将鱼禁食24 h，然后放入白色塑料桶，同时采取水样，用2.4 mol·L⁻¹氯化锰和碱性碘化钾(NaOH 6.4 mol·L⁻¹和KI 1.8 mol·L⁻¹)各1 mL混匀固定水体中DO待测，并取500 mL水样加入1 mL三氯甲烷(CHCl₃)固定保存氨氮水样待测。计时8 h后用同样的方法取水样保存。

1.5 样品分析与测试

组织和血浆中的总过氧化物歧化酶(SOD)活力、总抗氧化能力(T-AOC)、抗超氧阴离子活力(ASOR)、丙二醛(MDA)、乳酸(LD)和葡萄糖含量的测定采用南京建成生物工程研究所的试剂盒。

水样DO质量浓度采用碘量法进行滴定测定，氨氮质量浓度采用次溴酸钠氧化法进行测定。

1.6 数据计算

1.6.1 特定生长率(SGR)的计算方法为：SGR(%

·d⁻¹) = 100 × ln(W_F/W_I)/40。其中W_F和W_I分别为实验结束和实验开始时鲮的体质量，40表示实验持续时间为40 d。

1.6.2 耗氧率的计算方法为：耗氧率[mg·(g·h)⁻¹] = (OI - OF) × V/W/t。其中OI和OF分别为实验开始和实验结束时的ρ(DO)(mg·L⁻¹)，V为测定耗氧率的白色塑料桶容积(L)，W为实验用鱼体质量(g)，t为耗氧率测定持续时间(d)。

1.6.3 排氨率的计算方法为：排氨率[mg·(g·h)⁻¹] = (ANF - ANI) × V/W/t。其中ANF和ANI分别为实验开始和实验结束时的水体氨氮质量浓度(mg·L⁻¹)。

1.6.4 氧氮原子数比的计算方法为：氧/氮 = (耗氧率/16)/(排氨率/14)

1.7 数据统计分析

对所有实验数据进行单因子方差分析，并对不同处理间的数据进行Duncan多重比较，以P < 0.05作为差异显著的标准。由于实验处理设置只有3个，对主要氧化应激指标和特定生长、氧化应激指标与耗氧率之间的相关性仅进行了Pearson相关分析，获得了相关系数。数据的统计分析采用SPSS 11.0软件。

2 结果

2.1 DO对生长的影响

DO对鲮幼鱼的生长影响显著，实验结束时鲮的体质量随ρ(DO)的提高而增大，且实验期间的SGR也与DO呈正相关关系(表1)。

2.2 DO对能量代谢的影响

DO对鲮幼鱼的耗氧率、排氨率和氧氮比都有显著影响，DO_{7.22}处理组的耗氧率和排泄率都最高，氧氮比明显低于其余2个处理组(表2)。

表 2 溶解氧对鲮能量代谢的影响

Tab. 2 Effect of dissolved oxygen on energy metabolism of mullets

处理 treatment	耗氧率/mg·(g·h) ⁻¹ oxygen consumption rate	排氨率/mg·(g·h) ⁻¹ amonia-N excretion rate	氧氮比 O/N
DO _{1.56}	0.363 ± 0.023 ^{ab}	0.016 ± 0.001 ^a	20.64 ± 1.09 ^b
DO _{4.13}	0.338 ± 0.012 ^a	0.014 ± 0.001 ^a	23.19 ± 1.83 ^b
DO _{7.22}	0.463 ± 0.053 ^b	0.026 ± 0.003 ^b	16.21 ± 0.43 ^a

2.3 DO 对氧化应激指标的影响

血浆 T-SOD 活力存在显著差异, DO_{7.22} 处理组显著高于其他处理, DO_{4.13} 处理组的 MDA 水平显著高于 DO_{1.56} 处理组, DO_{7.22} 处理组的 LD 浓度显著高于其他处理, 不同处理的葡萄糖浓度则未出现显著差异(表 3)。

肝脏 T-SOD 和 ASOR 活力随 DO 升高而下降, T-AOC 活力、b(MDA) 和 b(LD) 不存在显著差异。肌肉 ASOR 活力随 DO 上升而提高, 其余指标不存在显著差异。鳃的 T-SOD 活力和 ASOR 活力均随 DO 提高而下降, T-AOC 活力、b(MDA) 和 b(LD) 均随 DO 提高而上升(表 4)。

表 3 溶解氧对鲮血浆氧化应激的影响

Tab. 3 Effect of dissolved oxygen on oxidative stress of plasma in mullets

处理 treatment	总过氧化物歧化酶/U·mL ⁻¹ T-SOD	c(丙二醛)/nmol·L ⁻¹ MDA	c(乳酸)/mmol·L ⁻¹ LD	c(葡萄糖)/mmol·L ⁻¹ glucose
DO _{1.56}	0.32 ± 0.03 ^a	1.72 ± 0.19 ^a	18.74 ± 1.51 ^a	30.86 ± 2.69 ^a
DO _{4.13}	0.25 ± 0.05 ^a	2.24 ± 0.09 ^b	16.95 ± 0.90 ^a	33.37 ± 1.80 ^a
DO _{7.22}	0.51 ± 0.17 ^b	2.01 ± 0.11 ^{ab}	24.32 ± 1.80 ^b	29.81 ± 1.18 ^a

表 4 溶解氧对鲮的不同组织氧化应激的影响

Tab. 4 Effect of dissolved oxygen on the oxidative stress of different tissues

组织 tissue	处理 treatment	总过氧化物歧化酶 /U·mg ⁻¹ T-SOD	总抗氧化能力 /U·mg ⁻¹ T-AOC	抗超氧阴离子活力 /U·g ⁻¹ ASOR	b(丙二醛) /nmol·g ⁻¹ MDA	b(乳酸) /mmol·g ⁻¹ LD
肝脏 liver	DO _{1.56}	24.95 ± 3.36 ^b	0.24 ± 0.04 ^a	64.35 ± 7.27 ^b	0.11 ± 0.02 ^a	0.54 ± 0.06 ^a
	DO _{4.13}	15.23 ± 1.44 ^a	0.16 ± 0.02 ^a	46.11 ± 4.70 ^a	0.10 ± 0.02 ^a	0.67 ± 0.04 ^a
	DO _{7.22}	11.33 ± 1.21 ^a	0.18 ± 0.02 ^a	45.05 ± 2.91 ^a	0.06 ± 0.01 ^a	0.64 ± 0.04 ^a
肌肉 muscle	DO _{1.56}	21.78 ± 2.86 ^a	0.44 ± 0.11 ^a	38.76 ± 3.71 ^a	0.56 ± 0.06 ^a	1.81 ± 0.55 ^a
	DO _{4.13}	17.43 ± 0.75 ^a	1.22 ± 0.29 ^a	45.61 ± 2.05 ^{ab}	0.50 ± 0.05 ^a	1.77 ± 0.07 ^a
	DO _{7.22}	16.72 ± 0.81 ^a	1.09 ± 0.27 ^a	49.38 ± 2.97 ^b	0.48 ± 0.05 ^a	1.77 ± 0.09 ^a
鳃 gill	DO _{1.56}	24.67 ± 1.29 ^b	0.33 ± 0.07 ^a	85.45 ± 2.91 ^b	1.21 ± 0.04 ^a	0.66 ± 0.07 ^a
	DO _{4.13}	23.76 ± 1.97 ^b	0.37 ± 0.16 ^a	78.33 ± 7.88 ^b	1.09 ± 0.06 ^a	0.88 ± 0.08 ^a
	DO _{7.22}	15.38 ± 2.52 ^a	2.15 ± 0.11 ^b	38.98 ± 15.46 ^a	1.74 ± 0.05 ^b	1.86 ± 0.08 ^b

2.4 氧化应激指标与生长和能量代谢的关系

此实验中测定的肝脏中主要氧化应激指标 T-SOD 活力、T-AOC 活力、ASOR 活力和 MDA 含量均与其 SGR 和耗氧率负相关。肌肉中 T-SOD 活力和 MDA 含量与 SGR 和耗氧率负相关, T-AOC 活

力和 ASOR 活力与 SGR 和耗氧率正相关。鳃中 T-SOD 活力和 ASOR 活力与 SGR 和耗氧率负相关, T-AOC 活力和 MDA 含量与 SGR 和耗氧率正相关。血浆的 T-AOC 活力和 MDA 含量与 SGR 正相关, T-SOD 活力与耗氧率正相关, 而 MDA 含量

与耗氧率负相关(表5)。由于肝脏是氧化应激的最主要器官,此实验条件下肝脏氧化应激指标含量的增加与提高耗氧率产生的快速生长冲突,说

明鳊消耗了较多的物质和能量参与氧化应激反应,可能导致用于生长的物质能量减少,致使鳊SGR下降。

表5 不同组织氧化应激与特定生长率和耗氧率的 Pearson 相关系数

Tab. 5 Pearson correlation coefficient of oxidative stress in different tissues associated with specific growth rate and oxygen consumption rate

氧化指标 parameters of oxidative	特定生长率/ $\% \cdot d^{-1}$ specific growth rate	耗氧率/ $mg \cdot (g \cdot h)^{-1}$ oxygen consumption rate
肝脏 liver T-SOD / $U \cdot mg^{-1}$	-0.961 260	-0.577 120
肌肉 muscle T-SOD / $U \cdot mg^{-1}$	-0.908 540	-0.447 010
鳃 gill T-SOD / $U \cdot mg^{-1}$	-0.922 120	-0.961 310
血浆 plasma T-SOD / $U \cdot mL^{-1}$	0.732 088	0.997 333
肝脏 liver T-AOC / $U \cdot mg^{-1}$	-0.694 170	-0.090 780
肌肉 muscle T-AOC / $U \cdot mg^{-1}$	0.753 688	0.176 369
鳃 gill T-AOC / $U \cdot mg^{-1}$	0.892 927	0.978 162
肝脏 liver ASOR / $U \cdot g^{-1}$	-0.871 720	-0.373 090
肌肉 muscle ASOR / $U \cdot g^{-1}$	0.979 412	0.637 438
鳃 gill ASOR / $U \cdot g^{-1}$	-0.941 580	-0.945 120
肝脏 liver $b(MDA)/nmol \cdot g^{-1}$	-0.956 480	-0.928 570
肌肉 muscle $b(MDA)/nmol \cdot g^{-1}$	-0.949 740	-0.544 700
鳃 gill $b(MDA)/nmol \cdot g^{-1}$	0.789 633	0.999 876
血浆 plasma $c(MDA)/nmol \cdot L^{-1}$	0.525 032	-0.123 290

3 讨论

3.1 DO对鳊幼鱼生长的影响

研究发现,不同DO水平下体质量相近的鳊幼鱼养殖40d后,鳊的体质量随着DO水平的提高而增大,接近饱和DO水平的DO_{7.22}处理组幼鱼的SGR显著高于其他2个DO水平组,这与舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[14]和黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[15]的研究结果一致。DO越高,鳊幼鱼摄食积极,对营养物质的利用效率也高,饱和DO环境能更加有效使蛋白质、脂质等营养物质转化为生长能^[16];DO越低,鳊幼鱼的摄食活动受到抑制,从而导致摄食量下降,产生厌食行为,进而引起机体所储存的有效能量降低或机体将蛋白质、脂质等营养物质转化为生长能的能力减弱,最终导致其生长缓慢。

3.2 DO对鳊幼鱼能量代谢的影响

鱼类主要通过有氧代谢提供日常活动所需能

量,水体DO含量的变化能够明显影响其能量代谢。由于鱼类的能量代谢底物以蛋白质为主,因此耗氧率和氨氮排泄率的变化可以反映鱼类能量代谢强度的变化。在此实验中,饱和DO_{7.22}处理组的鳊耗氧率和排氨率都显著高于DO_{1.56}和DO_{4.13}处理组($P < 0.05$),表明缺氧环境中鳊能量代谢强度明显下降,这与褐牙鲈(*Paralichthys olivaceus*)^[4]、大菱鲈(*Scophthalmus maximus*)^[2,17]、黄颡鱼^[15]、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)^[18]、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[19]、鲫(*Carassius carassius*)^[20]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[21]、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)^[22]等水生动物能量代谢对水体DO含量的响应一致。

鱼类可以通过动员肌肉和肝脏中的糖原及游离氨基酸等来调整能量代谢底物组成以获得能量来适应低氧环境^[23]。此实验中DO水平接近饱和程度处理组DO_{7.22}的鳊氧/氮比值(16.21 ± 0.43),显著低于缺氧水平处理组,表明在DO含量较低的水体

中, 鲮减少了代谢底物中蛋白质的比例, 增加了脂肪和糖类的比例。梭鱼 (*Liza haematocheila*) 的氧氮比在 DO 含量从近饱和和下降到窒息点过程中出现剧烈波动, 先显著上升然后迅速下降到约 10 的水平^[24], 表明在急性 DO 下降中梭鱼的能量代谢底物组成有很大的变动。褐牙鲂的氧氮比在水体 DO 含量下降过程中也出现显著变化^[4], 但幅度比梭鱼小。在获得相同的能量情况下, 用糖和脂肪做代谢底物比用蛋白质做代谢底物需要的氧分子少^[25], 因此鲮与其他鱼类类似, 在 DO 含量下降时可以通过调节代谢底物组成, 在一定程度上降低对氧的需求来获取日常活动所需能量。

3.3 DO 对鲮幼鱼氧化应激的影响

DO 是影响鱼类等耗氧动物自身生理活动的重要环境因子, 同时也影响着鱼类的抗氧化防御体系^[26-28]。MDA 作为脂质过氧化反应的最终产物, 是反映动物机体氧化应激反应的重要指标, 不仅可以反映活性氧(ROS)自由基含量, 而且还是组织细胞脂质过氧化反应的强度和脂质过氧化物增减的重要体现^[29]。在处于低氧环境时, 动物机体短期内利用厌氧代谢会造成生物体内 LD 和 MDA 等代谢产物以及 ROS 的快速积累, 生物体将面临严重的氧化胁迫^[24]。

肝脏中的 MDA 含量比肌肉和鳃中的偏低, 说明肝脏是主要的氧化应激器官(表 4)。在低 DO 和饱和条件下, 鲮幼鱼肝脏和肌肉中的 LD 和 MDA 含量差异不显著, 而血浆和鳃中的 LD 和 MDA 含量显著低于饱和 DO_{7.22}组, 可能主要是由于血液和鳃作为运输器官, 需要将产生的氧化产物进行扩散输出的缘故。有研究指出, 鱼类的白肌组织是 LD 和 MDA 产生和清除的主要部位^[30], 此研究结果显示肌肉在低氧条件下产生的 LD 和 MDA 含量相差不大, 这说明鲮的肌肉具备一定的厌氧代谢能力, 可以通过厌氧代谢提供能量, 使 LD 和 MDA 等代谢产物含量维持在一定范围内, 从而减少对肝脏等重要器官的损伤, 同时提高鲮适应低氧环境的能力。

在正常生理条件下, 机体主要依靠抗氧化防御体系来清除自由基和 ROS 以免对机体造成氧化损伤^[28,31]。SOD、T-AOC 和 ASOR 可反映机体抗氧化能力。有研究提出, 鱼类在经历缺氧胁迫时会提前提高某些抗氧化酶的活力^[32-33], 以提高其应对恢复正常 DO 环境可能带来的氧化应激能力。此实验

中, 肝脏和鳃中的 T-SOD 和 ASOR 活力均随 DO 下降而升高, 由此可推测鲮在低氧环境下可以提高氧化应激指标来应对低氧胁迫, 从而缓解了低氧胁迫对组织细胞膜质的损伤, 维持其正常的生长代谢。而肝脏、肌肉和鳃组织中的 T-AOC 在 3 种 DO 水平下变化不大, 这从侧面说明了鲮本身可能具有较强的清除自身自由基的能力, 是一个比较耐受低氧环境的种类, 机体在对抗低氧胁迫时能够较快地通过自身调节来适应环境的变化。实验结果还显示, 鲮肌肉 ASOR 活力和鳃 T-AOC 都随 DO 上升而提高, 且它们在最低 DO_{1.56}处理组都显著低于饱和 DO_{7.22}处理组, 说明肌肉和鳃组织应对氧化压力的能力较差, 肝脏则是氧化应激的主要器官。

3.4 鲮幼鱼氧化应激指标与生长和能量代谢的关系

鲮幼鱼不同组织的氧化应激指标与 SGR 和耗氧率的关系没有呈现统一的趋势, 但肝脏主要氧化应激指标 T-SOD 活力、T-AOC 活力、ASOR 活力和 MDA 含量均与 SGR 呈负相关。由于肝脏是鱼类最主要的应激器官, 这种氧化应激指标与生长之间的负相关可能表明氧化应激指标的提高与快速生长冲突, 即消耗较多的能量和物质参与氧化应激可能使用于生长的能量物质减少, 从而导致生长速度下降。

参考文献:

- [1] 董晓煜. 溶氧水平与养殖密度对褐牙鲂幼鱼生长及其生理机能的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [2] 宋协法, 陈义明, 彭磊, 等. 溶解氧、非离子氨和亚硝酸氮对大菱鲂幼鱼生长代谢的影响研究[J]. 渔业现代化, 2012, 39(6): 35-38.
- [3] 陈义明. 大菱鲂幼鱼生长、代谢及循环水养殖研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [4] 李洁. 限制溶解氧供应对褐牙鲂幼鱼生长的影响及其机制的实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [5] 施兆鸿, 彭士明, 侯俊利. 我国鲮、梭鱼类资源开发及其生态养殖前景的探讨[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(2): 121-124.
- [6] 彭士明, 施兆鸿, 陈超, 等. 鲮、梭鱼营养与环境因子方面的研究现状及展望[J]. 海洋渔业, 2008, 30(4): 356-362.
- [7] 李加儿, 余勉余. 鲮养殖技术[M]//雷霖霖. 海水鱼类养殖理论与技术. 北京: 中国农业出版社, 2005: 892-904.
- [8] 蔡小辉, 刘旭佳, 彭银辉, 等. 人工感染 3 种弧菌对鲮血清酶活力的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(1): 137-142.
- [9] 徐华珊. 福建莆田近海鲮鱼渔业现状及秋冬季产卵群体特点[J]. 福建水产, 2012, 34(4): 316-319.

- [10] 于娜, 李加儿, 区又君, 等. 盐度胁迫及昼夜变化对鲮幼鱼消化酶活力的影响[J]. 南方水产科学, 2011, 7(6): 52 - 57.
- [11] 刘建勇, 杨廷宝. 我国沿海鲮鱼 (*Mugil cephalus*) 不同地理群体形态差异研究[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(5): 572 - 576.
- [12] 李加儿, 曹守花, 区又君, 等. 鲮幼鱼耗氧率、排氨率和窒息点的研究[J]. 四川动物, 2014, 33(3): 434 - 439.
- [13] 李加儿, 曹守花, 区又君, 等. 温度、盐度和 pH 对鲮幼鱼耗氧率、排氨率以及窒息点的影响[J]. 中国水产科学, 2014, 21(5): 954 - 962.
- [14] THETMEYER H, WALLER U, BLACK K D, et al. Growth of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) under hypoxic and oscillating oxygen conditions [J]. *Aquaculture*, 1999, 174(3/4): 355 - 367.
- [15] 杨凯, 樊启学, 张磊, 等. 溶氧水平对黄颡鱼稚鱼摄食、生长及呼吸代谢的影响[J]. 淡水渔业, 2010, 40(2): 24 - 29.
- [16] WELKER A F, MOREIRA D C, CAMPOS E G, et al. Role of redox metabolism for adaptation of aquatic animals to drastic changes in oxygen availability [J]. *Comp Biochem Physiol A*, 2013, 165(4): 384 - 404.
- [17] PICHAVANT K, RUYET P L J, BAYON N L, et al. Effects of hypoxia O₂ growth and metabolism of juvenile turbot[J]. *Aquaculture*, 2000, 188(1/2): 103 - 114.
- [18] 蔡露, 房敏, 林少明, 等. 溶氧对齐口裂腹鱼呼吸代谢的影响[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2013, 2(1): 81 - 84.
- [19] 段研妍, 张秀梅, 张志新. 溶解氧对凡纳滨对虾生长及消化酶活性的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(2): 8 - 14.
- [20] 张伟, 曹振东, 付世建. 溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5806 - 5812.
- [21] 吴垠, 张洪, 赵慧慧, 等. 在循环养殖系统中不同溶氧量对虹鳟幼鱼代谢水平的影响[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(5): 437 - 442.
- [22] 李泽键. 低氧胁迫对中华绒螯蟹能量代谢、呼吸代谢及抗氧化代谢的影响[D]. 保定: 河北大学, 2012: 11 - 22.
- [23] WILHELM F D, TORRES M A, ZANIBONI F E, et al. Effects of different oxygen tensions on weight gain, feed conversion, and antioxidant status in piapara, *Leporinus elongates* (Valenciennes, 1847) [J]. *Aquaculture*, 2005, 244(1): 349 - 357.
- [24] 彭银辉, 黄国强, 李洁, 等. 溶氧水平对梭鱼幼鱼能量代谢与氧化应激的影响[J]. 广西科学, 2013, 20(4): 294 - 298.
- [25] JOBLING M. *Fish bioenergetics* [M]. London: Chapman & Hall, 1994: 95.
- [26] 牛化欣, 雷霖霖, 常杰, 等. 冰鲜野杂鱼和商品饲料对大菱鲆生长、脂质代谢及抗氧化功能的影响[J]. 动物营养学报, 2013, 25(11): 2696 - 2704.
- [27] NILSSON G E, RENSHAW G M C. Hypoxic survival strategies in two fishes: extreme anoxia tolerance in the North European crucian carp and natural hypoxic preconditioning in a coral-reef shark[J]. *J Exp Biol*, 2004, 207(18): 3131 - 3139.
- [28] LUSHCHAK V I, BAGNYUKOVA T V, HUSAK V V, et al. Hyperoxia results in transient oxidative stress and an adaptive response by antioxidant enzymes in goldfish tissues [J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2005, 37(8): 1670 - 1680.
- [29] LUSHCHAK V I, BAGNYUKOVA T V. Hypoxia induces oxidative stress in tissues of a goby, the rotan *Percottus glenii* [J]. *Comp Biochem Physiol*, 2007, 148(4): 390 - 397.
- [30] SHARPE P L, MILLIGAN C L. Lactate efflux from sarcolemma vesicles isolated from rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* white muscle is via simple diffusion [J]. *J Exp Biol*, 2003, 206(3): 543 - 549.
- [31] OLSVIK P A, KRISTENSEN T, WAAGBØ R, et al. mRNA expression of antioxidant enzymes (SOD, CAT and GSH-Px) and lipid peroxidative stress in liver of Atlantic salmon (*Salmo salar*) exposed to hyperoxic water during smoltification [J]. *Comp Biochem Physiol C*, 2005, 141(3): 314 - 323.
- [32] LUSHCHAK V I, BAGNYUKOVA T V. Effects of different environmental oxygen levels on free radical processes in fish [J]. *Comp Biochem Physiol B*, 2006, 144(3): 283 - 289.
- [33] LUSHCHAK V I, BAGNYUKOVA T V, LUSHCHAK O V, et al. Hypoxia and recovery perturb free radical processes and antioxidant potential in common carp (*Cyprinus carpio*) tissues [J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2005, 37(6): 1319 - 1330.