

肠呼吸抑制胁迫对大鳞副泥鳅呼吸代谢和抗氧化能力的影响

刘亚秋^{①②} 李新辉^① 赵健蓉^② 王志坚^{②*}

① 中国水产科学研究院珠江水产研究所 广州 510380; ② 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 水产科学重庆市市级重点实验室 重庆 400715

摘要: 为研究肠呼吸抑制胁迫对气呼吸鱼类大鳞副泥鳅 (*Paramisgurnus dabryanus*) 的鳃和肠道呼吸代谢及抗氧化能力的影响, 初步探究其生理反馈调节机制, 本文选取大鳞副泥鳅成熟个体 ($n = 60$) 进行肠呼吸抑制胁迫实验。分别对实验组 (肠呼吸抑制, $n = 30$) 与空白对照组 ($n = 30$) 的大鳞副泥鳅饲养驯化 2 周, 测定其整体静止代谢率、呼吸频率、鳃和肠道各段的乳酸脱氢酶 (LDH)、琥珀酸脱氢酶 (SDH)、 Na^+/K^+ ATP 酶 (NKA)、过氧化氢酶 (CAT) 以及超氧化物歧化酶 (SOD) 活性。肠呼吸抑制胁迫下, 实验组与对照组大鳞副泥鳅整体静止代谢率无显著差异 ($P > 0.05$), 而实验组大鳞副泥鳅鳃部呼吸频率显著加快 ($P < 0.05$)。与对照组相比, 实验组大鳞副泥鳅鳃部的琥珀酸脱氢酶活性显著升高 ($P < 0.05$), 而后肠琥珀酸脱氢酶和 Na^+/K^+ ATP 酶显著降低 ($P < 0.05$)。同时实验组大鳞副泥鳅后肠的乳酸脱氢酶活性显著升高 ($P < 0.05$)。实验组和对照组之间, 大鳞副泥鳅鳃和前中肠的过氧化氢酶以及超氧化物歧化酶活性无显著差异 ($P > 0.05$), 后肠则有显著性升高 ($P < 0.05$)。当大鳞副泥鳅肠呼吸受到抑制时, 会加强其鳃部有氧呼吸代谢, 弥补肠呼吸缺失部分, 满足机体生理需求, 而气呼吸的后肠会有一定氧化应激反应。

关键词: 大鳞副泥鳅; 肠呼吸; 呼吸代谢酶; 抗氧化能力

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2017) 05-857-08

Effect of Intestinal Air-breathing Restriction on Respiratory Metabolism and Antioxidant Capability of Loach (*Paramisgurnus dabryanus*)

LIU Ya-Qiu^{①②} LI Xin-Hui^① ZHAO Jian-Rong^② WANG Zhi-Jian^{②*}

① Pearl River Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510380; ② Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, the Key Laboratory of Aquatic Science of Chongqing, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Loach, *Paramisgurnus dabryanus*, a small-sized fish belonging to the family of Cobitidae of the

基金项目 公益性行业 (农业) 科研专项 (No. 201203086);

* 通讯作者, E-mail: wangzj1969@126.com;

第一作者介绍 刘亚秋, 男, 硕士; 研究方向: 渔业生态与环境; E-mail: liuyq1990@foxmail.com。

收稿日期: 2016-11-24, 修回日期: 2017-02-10 DOI: 10.13859/j.cjz.201705015

order Cypriniformes, can breathe air through its mouth when swimming to the water surface. And its accessory breathing organ for O₂ and CO₂ exchange is its posterior intestine. To investigate the effect of respiratory metabolism and oxidation resistance of gill and intestine as well as related physiological feedback mechanism in *P. dabryanus*, an air-breathing model under intestine breathing restrain treatment was employed. Mature individuals were chosen for intestine respiratory restriction by limiting them under the water surface. The total static metabolism rate, respiratory rate, lactic dehydrogenase activity (LDH), succinate dehydrogenase activity (SDH), Na⁺/K⁺ATPase activity (NKA), catalase activity (CAT) and superoxide dismutase (SOD) activity of gill and intestine were examined after 2 weeks' acclimation in control and treatment groups. Data were expressed as Mean ± SE. All the measured data were analyzed and compared with one-way ANOVA and t-test using spss 19.0 and excel. The level of significant difference was set at $P < 0.05$. The result showed that total static metabolism rates in control and treatment group did not differ significantly ($P > 0.05$) (Table 1). However, the gill of *P. dabryanus* in treatment group breathed more quickly than the control group ($P < 0.05$) (Table 1). In treatment group, succinate dehydrogenase activity of gill showed a significant increase ($P < 0.05$), while succinate dehydrogenase activity and Na⁺/K⁺ATPase activity of posterior intestine showed a significant decrease ($P < 0.05$) (Fig. 1b, c). At the same time, lactic dehydrogenase activity of posterior intestine increased significantly in treatment group (Fig. 1a). Although there was no significant difference in catalase or superoxide dismutase activity in the gill, anterior and middle intestine between the control and treatment group ($P < 0.05$), the enzyme activity of posterior intestine in treatment group was lower than that of control group ($P < 0.05$) (Fig. 2a, b). When *P. dabryanus* was intestine breathing restricted, it would enhance its gill aerobic respiratory metabolism as an offset for intestine breathing loss, in order to meet physiological requirements and its air-breathing posterior intestine would have an oxidative stress response. Respiratory metabolism of the gill and posterior intestine of air-breathing loach *P. dabryanus* could be adjusted to adapt environment under different environment stress conditions.

Key words: Loach, *Paramisgurnus dabryanus*; Intestinal air-breathing; Respiratory metabolism; Antioxidant capability

大多数硬骨鱼类在水中一般依靠鳃进行气体交换, 鳃呼吸却并不是鱼类获取氧气的惟一方式 (刘文生等 2004)。有些鱼类生活在静水中, 会遇到定期的干旱, 其生活环境严重缺氧。在这种低氧的环境中, 某些硬骨鱼类为适应环境变化, 进化形成辅助呼吸器官进行气体交换, 以满足其生存以及生活的需求 (Nelson 2014)。这些鱼类通过进化, 使得皮肤、鱼鳃、气囊、胃、肠道等具备进行辅助呼吸功能 (Graham 2011)。依靠肠道进行辅助呼吸的鱼类, 不断通过口吞咽空气, 然后从肛门排出 (Juc á-Chagas et al. 2006)。目前关于冈特似鳞头鳅 (*Lepidocephalichthys guntea*) (Moitra et al.

1989)、泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) (Goncalves et al. 2007)、侧斑兵鲃 (*Corydoras aeneus*) (Podkowa et al. 2002)、护胸鲃 (*Hoplosternum thoracatum*) (Huebner et al. 1978) 等鱼类肠呼吸研究已有报道。鱼类肠呼吸作为进化过程中形成的一种生理行为, 当受抑制胁迫时, 对鱼类正常的生理和行为活动及其代谢模式和氧化应激的影响, 尚未见文献报道。大鳞副泥鳅 (*Paramisgurnus dabryanus*), 隶属于鲤形目花鳅科副泥鳅属, 是一种杂食性底栖生活的小型经济鱼类。目前广泛分布于中国长江中下游以及珠江流域 (You et al. 2009)。其常出没于沼泽、水田、池塘等低氧环境, 喜

欢吞食气泡，是依靠肠道辅助呼吸的鱼类（刘亚秋等 2016）。因此，本研究探讨了肠呼吸抑制胁迫对大鳞副泥鳅呼吸代谢和抗氧化能力的影响，有助于阐明肠呼吸抑制胁迫对于气呼吸鱼类代谢模式和氧化应激的影响，为气呼吸鱼类适应性生理进化研究提供基础资料。

1 材料与amp;方法

1.1 实验鱼的来源与驯化

实验大鳞副泥鳅成熟成熟个体来自于实验室大棚养殖池塘，暂养于实验室循环水缸（长 × 宽 × 高：180 cm × 120 cm × 80 cm），于（21.5 ± 1.5）℃ 条件下驯养 2 周。驯化期间，养殖水体溶氧（6.2 ± 0.6）mg/L、pH 7.5 ~ 8.2。光照周期 12 L : 12 D。每天早晚各投喂一次常规沉性饲料（希望饲料有限公司）。

1.2 实验设计

驯养结束后，选取大小相近，体重（14.6 ± 3.6）g、体长（13.7 ± 2.2）cm，身体健康的实验鱼 60 尾，随机分为两组，一组为实验组，即利用自制网箱，将网箱固定于水面之下（图 1），水流正常通过，而大鳞副泥鳅被限制于网箱内，使其始终保持在水面以下，无法进行肠道呼吸（ $n = 30$ ），另外一组为对照组（不进行抑制处

理）（ $n = 30$ ），同时驯养 2 周。实验期间，大鳞副泥鳅饲养条件以及光周期与驯养期相同，实验前禁食 2 d，保持消化道处于排空状态。

1.3 大鳞副泥鳅整体静止代谢率 MO_2 total 及鳃呼吸频率测定

整体静止代谢率 MO_2 total 采用实验室自行研制的鱼类流水式呼吸仪测定（Fu et al. 2009）。实验鱼代谢以耗氧率作为衡量的指标，采用水体溶氧探头（HQ20, Hach Company, Loveland, CO, USA）测定。测定实验鱼的呼吸频率，以每 1 min 鳃盖或口张开的次数为 1 次呼吸，每隔 15 min 记录 1 次，3 次记录取平均值（陈松波等 2006）。

1.4 样品采集

从每组各随机选取 6 尾鱼，用于呼吸代谢酶和抗氧化酶活性的测定。为了准确测定鱼体内酶活性，实验在早上投喂前取样。用 0.1 g/L 的 MS-222 麻醉后计量体重和体长。将鱼体置于冰盘上，迅速取鳃、前肠、中肠和后肠放入液氮中，然后放置于 - 80℃ 超低温冰箱保存，用于进一步酶活性的测定。

1.5 酶活性的测定

从冰箱中取出待测样品，置于冰上解冻。解冻完成后将样品称重，按样品质量与匀浆稀



图 1 大鳞副泥鳅肠呼吸抑制实验装置

Fig. 1 Experimental device of Loach intestinal air-breathing restriction

释液体积比为 1 : 9 加入匀浆稀释液,以匀浆器进行匀浆。所得匀浆液用低温超速离心机 4℃ 3 000 r/min 离心 20 min, 取上清液用于呼吸代谢酶和抗氧化酶活力测定。可溶性蛋白、乳酸脱氢酶、琥珀酸脱氢酶、Na⁺/K⁺ATP 酶、过氧化氢酶以及超氧化物歧化酶活性测定均使用南京建成公司生产的试剂盒检测。

1.6 数据处理

所有实验数据使用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 计算和统计,所有统计值均用平均值 ± 标准误 (Mean ± SE) 表示。使用 *t* 检验和单因素方差分析 (ANOVA) 差异显著性,显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 大鳞副泥鳅的鱼体形态及呼吸代谢变化

驯化 2 周后, 实验组与对照组大鳞副泥鳅形态学指标无显著差异 ($P > 0.05$), 整体静止代谢率差异不显著 ($P > 0.05$), 而实验组大鳞副泥鳅鳃的呼吸频率显著高于对照组 ($P < 0.05$) (表 1)。

2.2 大鳞副泥鳅呼吸代谢酶活性变化

驯化 2 周后, 实验组大鳞副泥鳅后肠的乳酸脱氢酶活性显著高于对照组 ($P < 0.05$), 而其鳃、前肠以及中肠与对照组无显著差异 (图 2a)。实验组大鳞副泥鳅鳃部的琥珀酸脱氢酶活性显著高于对照组 ($P < 0.05$), 而其后肠琥珀酸脱氢酶活性显著低于对照组 ($P < 0.05$), 前肠、中肠与对照组差异不显著 (图 2b)。实验组大鳞副泥鳅后肠 Na⁺/K⁺ATP 酶活性显著低于对照组 ($P < 0.05$), 而其鳃、前肠以及中肠与对照组无显著差异 (图 2c)。

2.3 大鳞副泥鳅抗氧化能力变化

驯化 2 周后, 实验组与对照组大鳞副泥鳅的鳃部至后肠过氧化氢酶活性均呈现出逐渐降低的趋势, 对照组与实验组鳃部的过氧化氢酶活性无显著差异, 而后肠的过氧化氢酶活性差异显著 ($P < 0.05$) (图 3a)。实验组和对照组大鳞副泥鳅的前肠超氧化物歧化酶活性均最高, 对照组大鳞副泥鳅的后肠的超氧化物歧化酶活性显著低于实验组 ($P < 0.05$) (图 3b)。

表 1 实验组和对照组大鳞副泥鳅的鱼体形态及呼吸代谢参数比较

Table 1 Comparison of basic morphological and respiratory parameters between restricted group and control group

	对照组 Control group	实验组 Restricted group
体重 Body mass (g)	14.9 ± 2.9 (8)	14.7 ± 2.5 (8)
体长 Fork length (cm)	13.3 ± 1.0 (8)	13.4 ± 1.2 (8)
肠重 Intestine mass (g)	0.22 ± 0.16 (6)	0.21 ± 0.05 (6)
肠长 Intestine length (cm)	6.7 ± 0.81 (6)	6.1 ± 0.62 (6)
鳃重 Gill mass (g)	0.25 ± 0.03 (6)	0.27 ± 0.09 (6)
比肠重 Intestine mass/body mass ratio	0.01 ± 0.01 (6)	0.01 ± 0.01 (6)
比肠长 Intestine length/fork length ratio	0.49 ± 0.04 (6)	0.46 ± 0.06 (6)
比鳃重 Gill mass/body mass ratio	0.02 ± 0.01 (6)	0.02 ± 0.01 (6)
整体静止代谢率 Total rest metabolic rate MO_{2total} [mg/(h kg)]	110.3 ± 6.5 (8)	105.4 ± 6.9 (8)
鳃呼吸频率 (次/min) Gill respiratory rate (times/min)	75.8 ± 2.9 (8)	91.3 ± 3.1* (8)

表中数据均为平均值 ± 标准误, 括号中为样本量 *n*; “*” 示实验组与对照组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Values in the table are represented as Mean ± SE (*n*); “*” notes significant difference between restricted group and control group ($P < 0.05$).

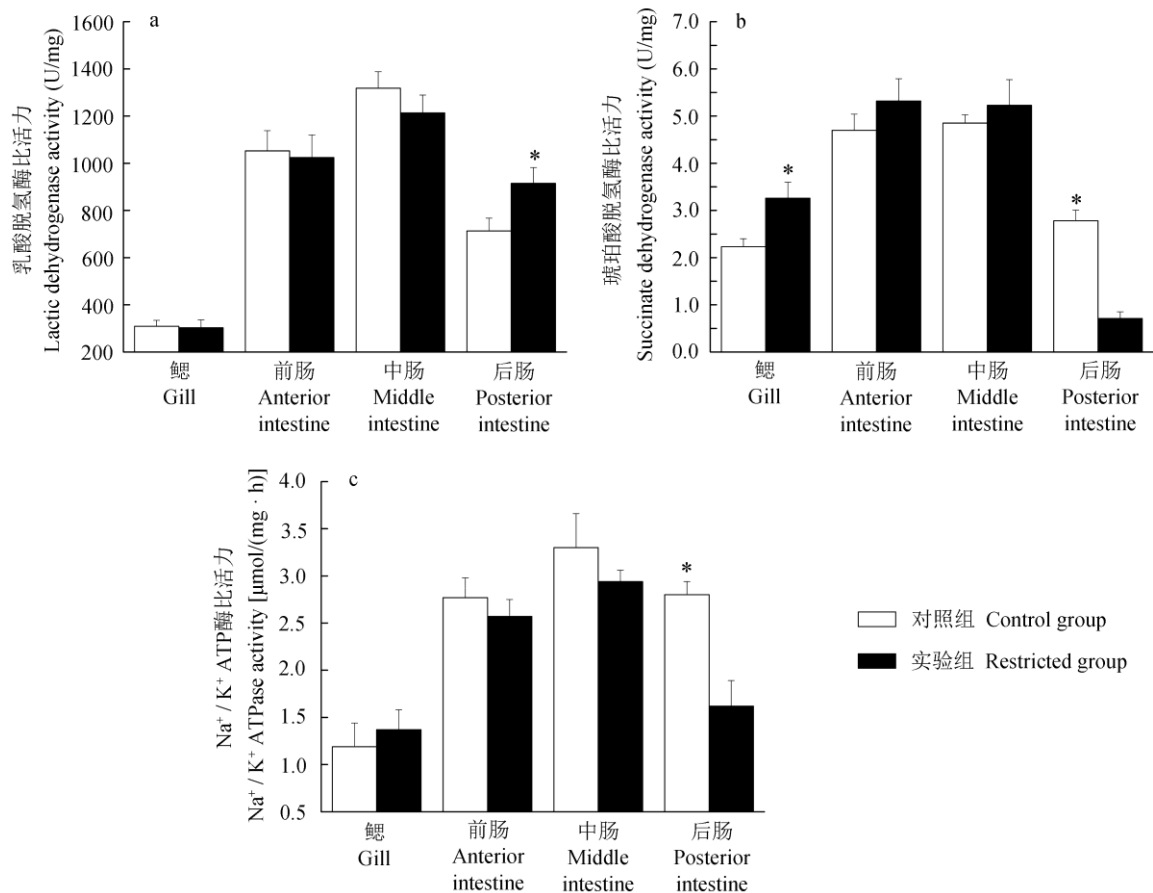


图2 大鳞副泥鳅呼吸代谢酶活性变化

Fig. 2 Change of respiratory metabolic enzyme activities in the Loach

a. 乳酸脱氢酶; b. 琥珀酸脱氢酶; c. Na⁺/K⁺ATP酶。a. Lactic dehydrogenase; b. Succinate dehydrogenase; c. Na⁺/K⁺ATPase.

图中结果表示为平均值 ± 标准误, n = 6, “*” 示实验组与对照组之间差异显著, P < 0.05。

Values in the table are represented as Mean ± SE, n = 6; “*” notes significant difference between restricted group and control group, P < 0.05.

3 讨论

乳酸脱氢酶可催化丙酮酸和乳酸之间的相互转化, 是机体无氧代谢的标志酶之一, 其活力可以反映无氧呼吸的强度 (Viru 1994)。有学者的研究表明, 琥珀酸脱氢酶为有氧代谢过程中很重要的 1 种调控酶, 其活性高低反映有氧代谢水平 (Cohen et al. 2001)。持续对实验组大鳞副泥鳅肠呼吸抑制驯化 2 周后, 实验组与对照组的整体静止代谢率并没显著性的差异。而

实验组大鳞副泥鳅鳃部呼吸频率显著增加, 且琥珀酸脱氢酶活性显著升高。有研究表明, 当双重呼吸鱼类气呼吸受抑制时, 会加强鳃的有氧呼吸效率满足自身生理需求 (Sollid et al. 2003, Perry et al. 2006)。肠呼吸抑制驯化 2 周后, 后肠乳酸脱氢酶活性显著高于对照组, 而其琥珀酸脱氢酶活性则显著降低。后肠无法进行正常气体交换, 有氧呼吸受到抑制, 无氧呼吸的增强弥补能量代谢的需求。Huang 等 (2015) 的研究发现, 气呼吸鱼类会随着环境的

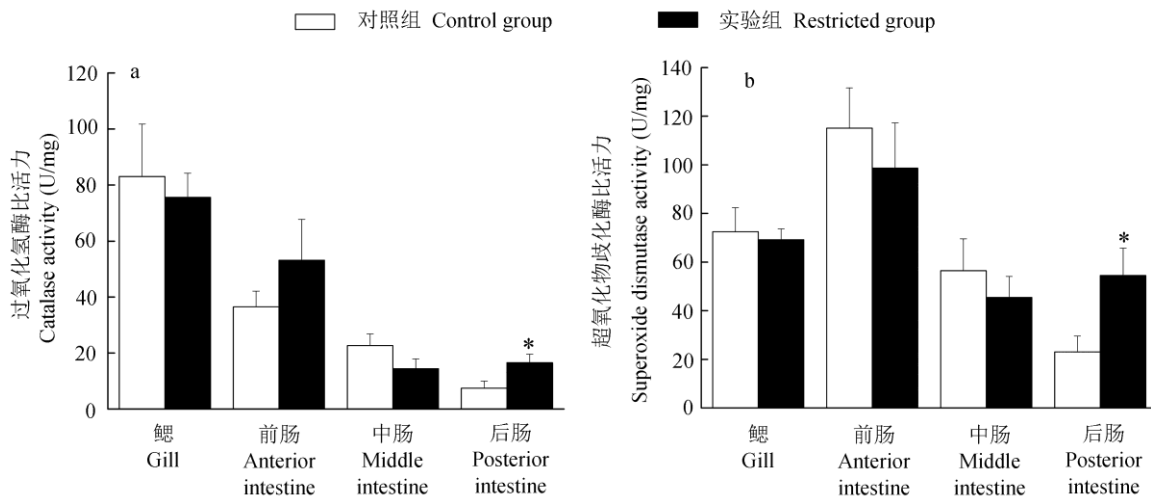


图3 大鳞副泥鳅抗氧化能力变化

Fig. 3 Change of antioxidant capability in the Loach

a. 过氧化氢酶; b. 超氧化物歧化酶。a. Catalase; b. Superoxide dismutase.

图中结果表示为平均值 \pm 标准误, $n = 6$, “*” 示实验组与对照组之间差异显著, $P < 0.05$ 。Values in the table are represented as Mean \pm SE, $n = 6$; “*” notes significant difference between restricted group and control group, $P < 0.05$.

改变, 来调整自身的代谢平衡, 以适应环境。 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATP}$ 酶是鱼类参与呼吸代谢的重要酶类。其主要位于基底侧质膜上, 参与细胞两侧 Na^+ 、 K^+ 离子的跨膜主动运输, 从而维持细胞内外的离子梯度和膜电位, 可调节细胞的体积, 并驱动细胞中糖和氨基酸的运送 (房文红等 2001)。实验中, 对照组与实验组大鳞副泥鳅鳃的 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATP}$ 酶活性没有显著差异。这与气呼吸鱼类拉利毛足鲈 (*Trichogaster lalius*) 研究结果一致 (Huang et al. 2015)。而后肠 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATP}$ 酶活性显著降低也表明其有氧呼吸代谢的减弱与琥珀酸脱氢酶结果一致。缺氧会引起 $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATP}$ 酶活性降低已在多种鱼类的实验中得到证实 (Richards et al. 2007)。

环境中氧代谢的变化是体内自由基产生的主要原因之一 (Pelster et al. 2016)。在鱼体的不同组织或不同鱼体相同组织中研究发现, 不同环境压力条件下鱼体内抗氧化酶的活性差异显著 (Lushchak et al. 2006, Pelster et al. 2016)。本研究中, 大鳞副泥鳅在肠呼吸被抑制后, 后肠超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活力显

著升高。有研究表明, 当环境不适时, 活性氧自由基产生大于活性氧自由基清除, 即体内活性氧自由基含量增加, 从而造成氧化胁迫, 导致机体处于病理状态 (Hur et al. 2001)。不同环境条件下, 机体自身组织活性氧自由基常受到其组织氧气利用率波动变化的影响, 此时机会强化防御系统, 消除活性氧分子 (Welker et al. 2013)。Lushchak 等 (2001) 研究表明, 德国镜鲤 (*Cyprinus carpio*) 脑、肝和鳃中超氧化物歧化酶活力以及银鲫 (*Carassius auratus*) 肝中过氧化氢酶的活力在缺氧环境下升高。此外, 低氧会导致抗氧化酶活力被抑制, 如银鲫血浆中超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活力在低氧状态下显著降低 (熊向英等 2016)。Pelster 等 (2016) 研究提出, 鱼体抗氧化能力随着环境条件变化而变化。肠呼吸的被抑制, 主要气呼吸器官无法正常进行气体交换, 环境胁迫使其后肠相关抗氧化酶的活性显著升高。曾有学者提出, 耐受环境无氧或缺氧的鱼类在经历缺氧胁迫时会提前提高某些抗氧化酶的活力, 以提高其应对恢复正常溶解氧环境可能带来的氧化应

激的能力 (Lushchak et al. 2006, 管越强等 2010)。

参 考 文 献

- Cohen A, Nugegoda D, Gagnon M M. 2001. Metabolic responses of fish following exposure to two different oil spill remediation techniques. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 48(3): 306–310.
- Fu S J, Zeng L Q, Li X M, et al. 2009. Effect of meal size on excess post-exercise oxygen consumption in fishes with different locomotive and digestive performance. *Journal of Comparative Physiology B*, 179(4): 509–517.
- Goncalves A F, Filipe L, Cristina C, et al. 2007. Is there a compromise between nutrient uptake and gas exchange in the gut of *Misgurnus anguillicaudatus*, an intestinal air-breathing fish? *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 2(4): 345–355.
- Graham J B. 2011. The biology, diversity, and natural history of air-breathing fishes: an introduction // Farrell A P. *Encyclopedia of Fish Physiology*. New York: Academic Press, 1850–1860.
- Huang C Y, Lin H H, Lin C H, et al. 2015. The absence of ion-regulatory suppression in the gills of the aquatic air-breathing fish *Trichogaster lalius* during oxygen stress. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 179: 7–16.
- Huebner E, Chee G. 1978. Histological and ultrastructural specialization of the digestive tract of the intestinal air breather *Hoplosternum thoracatum* (teleost). *Journal of Morphology*, 157(3): 301–328.
- Hur E, Chang K Y, Lee E, et al. 2001. Mitogen-activated protein kinase kinase inhibitor PD98059 blocks the trans-activation but not the stabilization or DNA binding ability of hypoxia-inducible factor-1alpha. *Molecular Pharmacology*, 59(5): 1216–1224.
- Jucá-Chagas R, Boccardo L. 2006. The air-breathing cycle of *Hoplosternum littorale* (Hancock, 1828) (Siluriformes: Callichthyidae). *Neotropical Ichthyology*, 4(3): 371–373.
- Lushchak V I, Bagnyukova T V. 2006. Effects of different environmental oxygen levels on free radical processes in fish. *Comparative Biochemistry & Physiology Part B: Biochemistry & Molecular Biology*, 144(3): 283–289.
- Lushchak V I, Lushchak L P, Mota A A, et al. 2001. Oxidative stress and antioxidant defenses in goldfish *Carassius auratus* during anoxia and reoxygenation. *Ajp Regulatory Integrative & Comparative Physiology*, 280(1): 100–107.
- Moitra A, Singh O N, Munshi J S. 1989. Microanatomy and cytochemistry of the gastro-respiratory tract of an air-breathing cobitid fish. *Lepidocephalichthys guntea*. *Japanese Journal of Ichthyology*, 36(2): 227–231.
- Nelson J A. 2014. Breaking wind to survive: fishes that breathe air with their gut. *Journal of Fish Biology*, 84(3): 554–576.
- Pelster B, Giacomini M, Wood C M, et al. 2016. Improved ROS defense in the swim bladder of a facultative air-breathing erythrinid fish, jeju, compared to a non-air-breathing close relative, traira. *Journal of Comparative Physiology B*, 186(5): 1–10.
- Perry S F, Gilmour K M. 2006. Acid-base balance and CO₂ excretion in fish: unanswered questions and emerging models. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 154(1/2): 199–215.
- Podkowa D, Goniakowska-Witalińska L. 2002. Adaptations to the air breathing in the posterior intestine of the catfish (*Corydoras aeneus*, Callichthyidae). A histological and ultrastructural study. *Folia Biologica*, 50(1/2): 69–82.
- Richards J G, Wang Y S, Brauner C J, et al. 2007. Metabolic and ionoregulatory responses of the Amazonian cichlid, *Astronotus ocellatus*, to severe hypoxia. *Journal of Comparative Physiology B*, 177(3): 361–374.
- Sollid J, Angelis P D, Gundersen K, Nilsson G E. 2003. Hypoxia induces adaptive and reversible gross morphological changes in crucian carp gills. *Journal of Experimental Biology*, 206(20): 3667–3673.
- Viru M. 1994. Differences in effects of various training regimens on metabolism of skeletal muscles. *Journal of Sports Medicine & Physical Fitness*, 34(3): 217–227.
- Welker A F, Moreira D C, Campos E G, et al. 2013. Role of redox metabolism for adaptation of aquatic animals to drastic changes in oxygen availability. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 165(4): 384–404.
- You C, Yu X, Tong J. 2009. Detection of hybridization between two loach species (*Paramisgurnus dabryanus* and *Misgurnus anguillicaudatus*) in wild populations. *Environmental Biology of Fishes*, 86(1): 65–71.
- 陈松波, 范兆廷, 陈伟兴. 2006. 不同温度下鲤鱼呼吸频率与耗氧

- 率的关系. 东北农业大学学报, 37(3): 352–356.
- 房文红, 王慧, 来琦芳, 等. 2001. 斑节对虾鳃 Na^+/K^+ -ATPase 的活性. 上海海洋大学学报, 10(2): 140–144.
- 管越强, 李利, 王慧春, 等. 2010. 低氧胁迫对日本沼虾呼吸代谢和抗氧化能力的影响. 河北大学学报: 自然科学版, 30(3): 301–306.
- 刘文生, 王凤麟. 2004. 胡子鲇、月鳢、泥鳅具气呼吸作用器官呼吸上皮的电镜观察. 水生生物学报, 28(5): 519–525.
- 刘亚秋, 高胜涛, 胡雨, 等. 2016. 大鳞副泥鳅消化系统胚后发育组织学观察. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 33(3): 33–39.
- 熊向英, 黄国强, 彭银辉, 等. 2016. 低氧胁迫对鲮幼鱼生长、能量代谢和氧化应激的影响. 水产学报, 40(1): 73–82.