

温度和摄食对南方鲇能量代谢特征和低氧耐受的影响*

史函颖¹, 杨洁¹, 谭淦¹, 郭正浩¹, 庞旭^{1,2}

(1. 西南大学水产学院; 2. 西南大学淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要:为考察研究温度和摄食对鱼类能量代谢特征和低氧耐受的影响,以南方鲇(*Silurus meridionalis*)幼鱼为对象,在15、20、25和30℃条件下,分别测定禁食组和摄食组实验鱼的日常代谢率(RMR)、临界氧压(COP)和失去平衡点(LOE)。结果显示:1)温度对南方鲇的RMR、COP和LOE均有统计学意义上的影响($p < 0.05$)。2)摄食对南方鲇的RMR、COP均有统计学意义上的影响($p < 0.05$);在20、25、30℃条件下,摄食组的RMR与空腹组的RMR相比有统计学意义上的提升($p < 0.05$);在15、20℃条件下,摄食组的COP与空腹组的COP相比有统计学意义上的提升($p < 0.05$)。3)摄食对南方鲇的LOE的影响无统计学意义。上述结果提示温度上升以及在较低温度下摄食将削弱南方鲇的低氧耐受能力,而在较高温度下摄食对南方鲇的低氧耐受能力有一定补偿作用。

关键词:淡水鱼类;临界氧压;日常代谢率;失去平衡点;南方鲇;温度;摄食

中图分类号:Q591.4;S965.116

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)06-0032-06

由于水具有特殊的理化性质,因而水体温度、溶解氧等生态环境因子存在着广泛的时空异质性,且这些因子的变化将会影响鱼类的生理过程和生态结果^[1]。鱼类需要从水体中摄取氧进行能量代谢,进而完成各项生命活动,因此低氧耐受与鱼类的生存适合度紧密关联^[2-3]。在一定温度范围内,由于生化反应速率加快,鱼类的代谢能力随温度的上升而增强^[2,4]。鱼类摄食后,由于特殊动力作用(即机体由于摄取食物而引起体内能量消耗增加的现象)的存在,因此它的代谢水平也会相应增加^[5];且鱼类摄食代谢在高温条件下更为剧烈^[4]。然而,水中饱和溶解氧水平随温度上升而下降,那么在高温条件下鱼类将面临机体对溶解氧需求的增加而水体中溶解氧水平较低的矛盾。这一矛盾对鱼类的生理适应构成了严重挑战^[3-4]。

南方鲇(*Silurus meridionalis*)为底栖、肉食、伏击取食鱼类,主要分布于中国长江流域,也是中国重要的经济养殖鱼类^[6]。本研究以南方鲇为研究对象,重点考察了该鱼种在不同温度条件下分别处于空腹与摄食状态的日常代谢率(Routine metabolic rate, RMR)、临界氧压(Critical oxygen pressure, COP)、失去平衡点(Loss of equilibrium, LOE)等鱼类生理生态学参数^[3,7],进而分析了该鱼种的生理生态适应对策,旨在为相关领域研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源与驯化

实验用南方鲇幼鱼共200尾于重庆市合川区渔民处购得,体质量范围为15~30g。将实验鱼带回实验室后放入控温循环水槽中进行14d的适应性暂养。暂养期间实验用水为曝气后自来水,水温为(20±1)℃,水体溶解氧水平保持在90%饱和溶解氧水平以上;每2d以肉食性鱼类饲料饱食投喂1次,该饲料中蛋白质、脂类和糖类质量分数分别为46.38%、12.79%和9.53%,饲料的可消化能为17.64 kJ·g⁻¹;日换水量约为暂养水体总体积的30%。暂养完成后将实验鱼随机平均分为4个温度处理组,每组50尾,分别进行15、20、25、30℃的温度处理。除温度为20℃的处理组外,其他3个温度处理组均从初始驯化水温(20±1)℃开始,以每日1℃的变温速率进行升/降温,直至各组所设定的温度,并在相应处理温度下进行为期21d以上的温度驯化。此外,驯化期的

* 收稿日期:2023-04-07 修回日期:2023-07-29 网络出版时间:2024-01-29T09:53

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 31702020);重庆市自然科学基金项目(No. cstc2020jcyj-msxmX0479)

第一作者简介:史函颖,女,研究方向为鱼类生理生态学,E-mail:861447864@qq.com;通信作者:庞旭,男,副教授,博士,E-mail:pangxu9@hotmail.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20240126.1545.006

其他驯养条件和操作仍同暂养期时保持一致。在正式实验前,所有实验鱼禁食 72 h^[4]。

1.2 代谢率测定

代谢率测定采用密闭式呼吸仪进行测定^[8],其中温度为 15、20 和 25 °C 的处理组呼吸室容积为 630 mL,而温度为 30 °C 的处理组呼吸室容积为 950 mL。在测定各温度处理组中空腹组实验鱼代谢率时,需在正式测定开始前 6 h 将单尾实验鱼转入呼吸室内进行驯化适应,在此期间保持呼吸室内外水体充分交换。对于各温度处理组中摄食组实验鱼而言,上述操作需改为在正式测定开始前 8 h 进行单尾投喂且能量摄食率约为 450 kJ·g⁻¹。实验鱼驯化完成后密封呼吸室,开始进行代谢率测定。数据采集为每 3 min 用美国 Hach 公司生产的 HQ30 型溶解氧仪测定 1 次溶解氧质量浓度,直到实验鱼身体失去平衡结束实验。各温度处理组在上述测定中实际采用的样本数为 16 尾,空腹组与摄食组实验鱼数量各 8 尾。实验鱼的代谢率根据以下公式进行计算:

$$V_{MR} = \Delta\rho(O_2) \times (V / (m \times \Delta t)),$$

其中: V_{MR} 为代谢率的数值(单位:mg·kg⁻¹·h⁻¹); $\Delta\rho(O_2)$ 是相邻 2 次测定的溶解氧质量浓度的数值差(单位:mg·L⁻¹); V 是呼吸室及附属循环系统扣除鱼体积后的体积数值(单位:L); m 为实验鱼体质量数值(单位:kg); Δt 为相邻 2 次测定间隔时间数值(单位:h),本研究中 $\Delta t = 0.05$ 。

根据溶解氧质量浓度和与代谢率之间的关系,采用双线法(two-segmented straight lines)^[9]求出代谢率随溶解氧质量浓度下降而出现的转折点,此时所对应的溶解氧质量浓度即为实验鱼 COP;并将溶解氧质量浓度在 COP 以上数据点所对应代谢率的平均值作为实验鱼的 RMR。

1.3 数据统计

用 Excel 2003 对实验数据进行常规计算,结果均以“平均值±标准误”表示。采用 SPSS 17.0 软件就温度和摄食对实验鱼 RMR、COP 和 LOE 的影响进行双因素方差分析,并对这 3 个参数间的相关关系进行 Pearson 相关性分析。当 $p < 0.05$ 时,统计分析结果具有统计学意义。

2 结果

2.1 温度对 RMR、COP 和 LOE 影响

研究结果显示,温度对实验鱼 RMR、COP 和 LOE 的影响均具有统计学意义($p < 0.05$)(图 1、表 1)。由表 1 可知:1) RMR 随温度的上升而升高,但无论是空腹组还是摄食组,温度为 20 和 25 °C 的处理组间数据差异不具有统计学意义。2) COP 温度的上升而增加,在空腹状态下,仅温度为 15 与 30 °C 的处理组间数据差异具有统计学意义($p < 0.05$);在摄食状态下,温度为 30 °C 的处理组与温度为 15 和 20 °C 的处理组的 COP 值差异具有统计学意义($p < 0.05$)。3) LOE 也随温度的上升而增加,在空腹状态下,温度为 30 °C 的处理组的 LOE 比其余温度处理组的 LOE 更高,有关数据差异均具有统计学意义($p < 0.05$);在摄食状态下,温度为 15 和 20 °C 的处理组的 LOE 值差异不具有统计学意义。

2.2 摄食对 RMR、COP 和 LOE 影响

研究结果表明,摄食对实验鱼 RMR 和 COP 的影响均具有统计学意义($p < 0.001$),且摄食与温度在影响这 2 个参数方面具有交互效应($p < 0.05$),然而摄食对实验鱼 LOE 的影响无统计学意义(图 1、表 1)。表 1 还显示:1) 在温度为 20~30 °C 条件下,摄食组的 RMR 均比空腹组的 RMR 更高,两者差异具有统计学意义($p < 0.05$);然而当温度降至 15 °C 时,摄食组与空腹组的 RMR 没有统计学意义上的差异。2) 在温度为 15~20 °C 条件下,摄食组的 COP 均比空腹组的 COP 更高,数据差异具有统计学意义($p < 0.05$);然而在温度为 25~30 °C 条件下,摄食组与空腹组的 COP 没有统计学意义上的差异。

2.3 RMR、COP 和 LOE 间的关系

图 2 显示:RMR 与 COP 间呈统计学意义上的正相关关系($p < 0.05$);RMR 与 LOE、COP 与 LOE 间的相关关系均不具有统计学意义。

3 讨论

3.1 温度对南方鲇低氧耐受的影响

温度作为最重要的生态因子之一,深刻地影响着鱼类的代谢。在本研究中,随温度的上升,由于机体内生化反应速率的上升和机体对能量需求的增加,南方鲇的 RMR 有明显的上升趋势,这与过去的有关研究结果一

致^[2,4]。本研究发现,南方鲇 COP 随温度的上升而明显升高,这与对鳕(*Gadus morhua*)、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)的相关研究结果一致;然而温度对鲤(*Cyprinus carpio*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)等鱼类的 COP 影响并不明显;此外鳊(*Parabramis pекinensis*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)的 COP 随温度的上升反而降低^[10-12]。出现上述情况的原因与以下 2 点有关:一方面,在高温条件下,鱼类对氧的需求增加,而自身低氧耐受能力遭到削弱;另一方面,在高温条件下,鱼类代谢能力增强,从而增强了自身生理调节能力。温度对鱼类 COP 影响受多方因素所控制。本研究发现南方鲇的 RMR 与 COP 呈统计学意义上的正相关关系,这与对中华倒刺鲃的研究结果一致^[12],因此南方鲇的 COP 对温度的响应更倾向于随着温度的上升而自身低氧耐受能力遭到削弱。

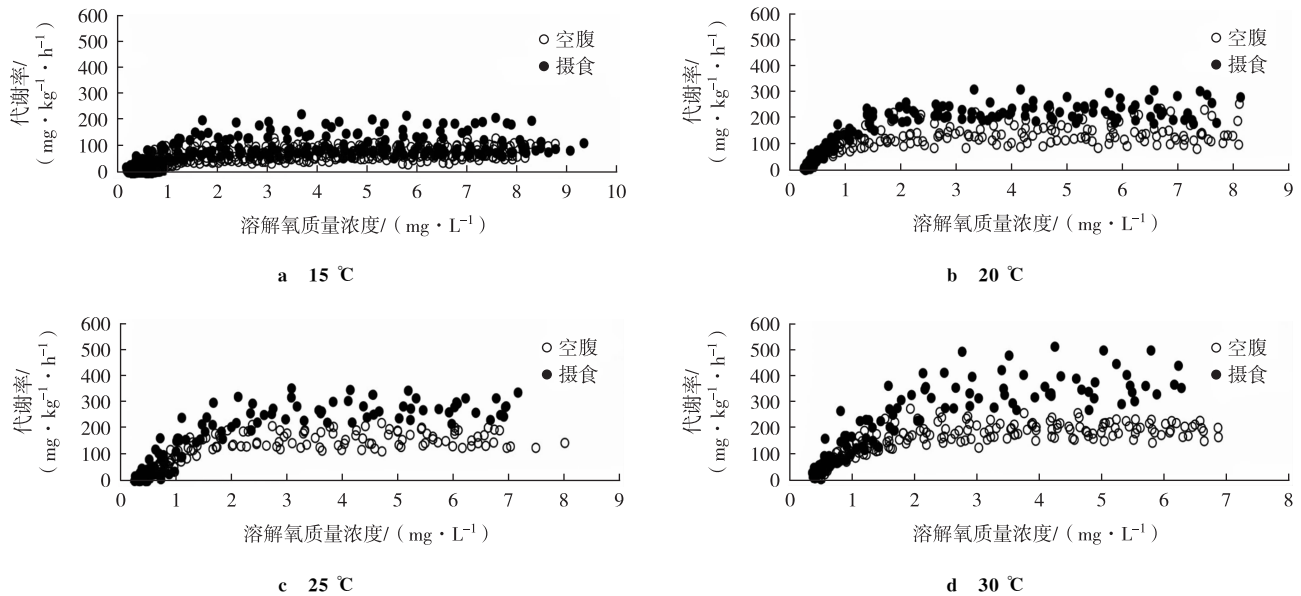


图 1 温度和溶氧对南方鲇代谢率的影响

Fig. 1 Effects of temperature and dissolved oxygen on metabolic rate of *S. meridionalis*

表 1 驯化温度和摄食对南方鲇 RMR、COP 和 LOE 的影响

Tab. 1 Effects of acclimation temperature and feeding on RMR, COP, and LOE in *S. meridionalis*

参数	状态	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
体质量/g	空腹	37.96±2.42	34.11±2.75	37.13±2.05	31.41±1.51
	摄食	37.51±1.28	32.29±2.55	38.14±2.35	37.00±1.52
体长/cm	空腹	17.70±0.50	16.83±0.41	17.48±0.21	16.26±0.29
	摄食	17.84±0.50	16.84±0.20	17.28±0.40	17.85±0.20
RMR/(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	空腹	87.72±8.89 ^a	150.41±13.08 ^b	164.12±9.33 ^b	198.93±9.66 ^c
	摄食	122.76±17.46 ^a	227.22±10.28 ^{b*}	270.85±14.01 ^{b*}	340.97±19.43 ^{c*}
COP/(mg·L ⁻¹)	空腹	1.05±0.07 ^a	1.23±0.05 ^{ab}	1.49±0.15 ^{bc}	1.88±0.09 ^c
	摄食	1.41±0.10 ^{a*}	1.67±0.06 ^{ab*}	1.84±0.16 ^{bc}	2.15±0.19 ^c
LOE/(mg·L ⁻¹)	空腹	0.31±0.01 ^a	0.31±0.01 ^a	0.34±0.02 ^a	0.40±0.01 ^b
	摄食	0.27±0.02 ^a	0.29±0.01 ^{b*}	0.33±0.02 ^b	0.39±0.01 ^c

注:不同小写字母表示在空腹/摄食状态下不同驯化温度处理组间数据差异具有统计学意义($p < 0.05$);“*”表示同一驯化温度条件下摄食与空腹组间数据差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

当水体中溶解氧水平低于 COP 时,鱼类要么被迫降低代谢,要么动用无氧代谢产能以维持生命活动;若溶解氧水平进一步降低,特别是当神经系统出现缺氧状况时,鱼类将无法维持身体平衡,因此 LOE 反映了鱼类对极端低氧的耐受能力^[13]。本研究发现,南方鲇的 LOE 随温度的上升而明显增加,然而在对鳕、鲫(*Carassius*

auratus)、鳊等鱼类的相关研究中,温度对它们的 LOE 没有明显影响^[14-15]。此外,南方鲇的 LOE 与 RMR 的相关关系没有统计学意义,这与过去对淡水鱼类种间比较和对鲫个体进行相关研究的结果一致,即鱼类的 LOE 与 RMR 间不存在统计学意义上的关联^[3]。上述结果提示鱼类的 LOE 主要受例如鳃结构改变、特殊的代谢途径、空气呼吸行为等特化的形态结构或生理过程的限制^[12]。此外,南方鲇的 LOE 与 RMR、COP 相比,前者的温度系数(Q_{10})值更低(表 2),表明南方鲇的 LOE 具有更低的热敏感性。

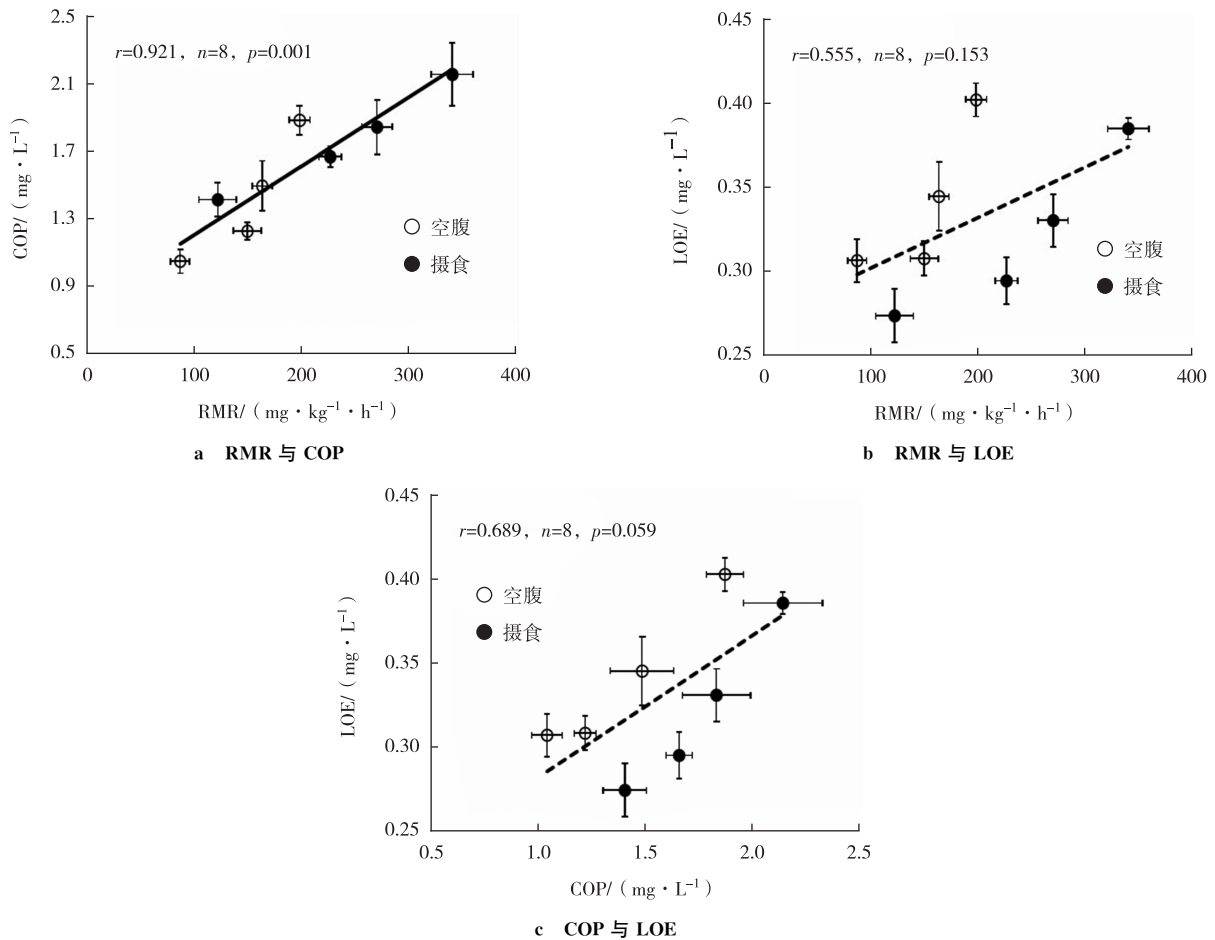


图 2 南方鲇 RMR、COP 和 LOE 之间的关系

Fig. 2 The relationships among RMR, COP, and LOE in *S. meridionalis*

表 2 南方鲇 RMR、COP 和 LOE 的 Q_{10} 值

Tab. 2 Q_{10} values of RMR, COP, and LOE in *S. meridionalis*

参数	参数在不同温度上升阶段的 Q_{10} 值				参数	参数在不同温度上升阶段的 Q_{10} 值			
	15 °C→20 °C	20 °C→25 °C	25 °C→30 °C	15 °C→30 °C		15 °C→20 °C	20 °C→25 °C	25 °C→30 °C	15 °C→30 °C
RMR	2.94	1.19	1.47	1.73	LOE	1.01	1.25	1.36	1.20
COP	1.37	1.48	1.58	1.48					

注: $Q_{10} = (X_2/X_1)^{10/(T_2 - T_1)}$, 其中 T_1 、 T_2 为驯化温度; X_1 、 X_2 为 T_1 、 T_2 下的参数。

3.2 摄食对南方鲇低氧耐受的影响

由于特殊动力作用的存在,摄食组南方鲇的 RMR 均比相同温度处理条件下空腹组的 RMR 更高,且两者的差值即 RMR 增量随温度的上升而增加;在温度为 15、20、25、30 °C 的条件下,摄食组相对于空腹组的 RMR 增量分别为 35.04、76.81、106.73、142.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这一结果与已有研究结果一致^[12]。本研究还发现,在温度为 15 和 20 °C 时,南方鲇摄食后 COP 明显增加,这与对河鲈(*Perca fluviatilis*)、罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、图丽鱼(*Astronotus ocellatus*)、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)等鱼类的相关研究结果一致^[7,16];

然而在温度为 25 和 30 °C 时,南方鲇摄食后 COP 的增加趋势不再明显。摄食对鱼类低氧耐受能力的影响可归结为以下 2 个方面的效应:一方面鱼类在摄食后对能量需求增加,从而代谢率提升,但自身低氧耐受能力遭到削弱;另一方面,消化作用、胃液分泌使鱼类的血液组织碱化,有助于提升鱼类的血氧饱和度和鱼类对乳酸耐受的能力,从而使低氧耐受能力有所增强^[17]。特殊动力作用越强,碱化作用亦越强,这与本研究得到的上述结果相吻合。此外,本研究结果显示不同温度处理下南方鲇摄食组与空腹组的 LOE 无统计学意义上的差异,提示摄食碱化作用对鱼类 LOE 效应更为明显,这可能因为 LOE 与鱼类的无氧代谢能力和乳酸耐受能力更为密切相关^[15]。总的来看,鱼类的 LOE 趋于保守,与鱼类的生物遗传特性更为相关,也是经历了长期自然选择后适应环境的结果^[18]。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 朱永久,姚志平,吴兴兵,等.温度对鲈鲤幼鱼耗氧率和窒息点的影响[J].淡水渔业,2014,44(4):101-104.
ZHU Y J,YAO Z P,WU X B,et al. Effects of temperature on the oxygen consumption rate and asphyxiation point in juvenile *Percocypris pingi pingi*[J]. Freshwater Fisheries,2014,44(4):101-104.
- [3] PANG X,PU D Y,XIA D Y,et al. Individual variation in metabolic rate, locomotion capacity and hypoxia tolerance and their relationships in juveniles of three freshwater fish species[J]. Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology,2021,191(4):755-764.
- [4] PANG X,CAO Z D,PENG J L,et al. The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish, *Silurus meridionalis*, acclimated at different temperatures[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology. 2010,155(2):253-258.
- [5] SECOR S M. Specific dynamic action;a review of the postprandial metabolic response[J]. Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology,2009,179(1):1-56.
- [6] 丁瑞华.四川鱼类志[M].成都:四川科学技术出版社,1994.
DING R H. The fishes of Sichuan[M]. Chengdu:Sichuan Science and Technology Press,1994.
- [7] 谭淦,史函颖,陈拥军,等.摄食和饥饿对大口黑鲈游泳运动能力和低氧耐受的影响[J].水生生物学报,2022,46(6):826-831.
TAN G,SHI H Y,CHENG Y J,et al. Feeding and fasting on swimming performance and hypoxia tolerance of *Micropterus salmoides*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2022,46(6):826-831.
- [8] 陈波见,曹振东,付世建,等.温度对鳊鱼静止代谢和耐低氧能力的影响[J].动物学杂志,2010,45(5):1-8.
CHEN B J,CAO Z D,FU S J,et al. Temperature effect on rest metabolic rate and hypoxia tolerance in chinese bream *Parabramis pekinensis*[J]. Chinese Journal of Zoology,2010,45(5):1-8.
- [9] YEAGER D P,ULTSCH G R. Physiological regulation and conformation;a basic program for the determination of critical points [J]. Physiological Zoology,1989,62(4):888-907.
- [10] SCHURMANN H,STEFFENSEN J F. Effects of temperature,hypoxia and activity on the metabolism of juvenile Atlantic cod [J]. Journal of Fish Biology,1997,50(6):1166-1190.
- [11] OTT M E,HEISLER N,ULTSCH G R. A re-evaluation of the relationship between temperature and the critical oxygen tension in freshwater fishes[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A:Physiology,1980,67(3):337-340.
- [12] CHEN B J,FU S J,CAO Z D,et al. Effect of temperature on critical oxygen tension (P_{crit}) and gill morphology in six cyprinids in the Yangtze river,China[J]. Aquaculture,2019,508:137-146.
- [13] RICHARDS J G. Physiological, behavioral and biochemical adaptations of intertidal fishes to hypoxia [J]. Journal of Experimental Biology,2011,214(2):191-199.
- [14] BARNES R K,KING H,CARTER C G. Hypoxia tolerance and oxygen regulation in Atlantic salmon, *Salmo salar* from a Tasmanian population[J]. Aquaculture,2011,318(3/4):397-401.
- [15] HE W,CAO Z D,FU S J. Effect of temperature on hypoxia tolerance and its underlying biochemical mechanism in two juvenile cyprinids exhibiting distinct hypoxia sensitivities[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology,2015,187:232-241.

- [16] ROGERS N J, URBINA M A, REARDON E E, et al. A new analysis of hypoxia tolerance in fishes using a database of critical oxygen level (P_{crit}) [J]. *Conservation Physiology*, 2016, 4(1): cow012.
- [17] 付世建, 曹振东, 谢小军. 鱼类摄食代谢和运动代谢研究进展 [J]. *动物学杂志*, 2008, 43(2): 150-159.
FU S J, CAO Z D, XIE X J. Feeding metabolism and locomotion metabolism in fishes [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, 43(2): 150-159.
- [18] PANG X, SHAO F, DING S H, et al. Interspecific differences and ecological correlations of energy metabolism traits in freshwater fishes [J]. *Functional Ecology*, 2020, 34(3): 616-630.

Animal Sciences

Effects of Temperature and Feeding on Energy Metabolism Trait and Hypoxia Tolerance of Southern Catfish

SHI Hanying¹, YANG Jie¹, TAN Gan¹, GUO Zhenghao¹, PANG Xu^{1,2}

(1. College of Fisheries, Southwest University; 2. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Education of Ministry, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The aim of the present study was to investigate the effects of temperature and feeding on the energy metabolism trait and hypoxia tolerance of fish. The routine metabolic rate (RMR), critical oxygen pressure (COP), and loss of equilibrium (LOE) of the control group (fasting group) and the feeding group of southern catfish were measured at 15, 20, 25, and 30 °C, respectively. Temperature has a significant impact on RMR, COP, and LOE, and these parameters significantly increase with increasing temperature ($p < 0.05$). Feeding has a significant impact on RMR and COP. Indicated that increasing temperature would weaken the hypoxia tolerance of southern catfish, and feeding would weaken the hypoxia tolerance of this species at low temperature. As well as, feeding had some compensatory effect on hypoxia tolerance at high temperature in this species, and therefore might be related to factors such as energy metabolism characteristic, physiological regulation capability and body acid-base balance at different temperatures.

Keywords: freshwater fish; critical oxygen pressure; routine metabolic rate; loss of equilibrium; *Silurus meridionalis*; temperature; feeding

(责任编辑 方 兴)