

摄食水平对岩原鲤幼鱼摄食代谢和力竭运动后代谢特征的影响

李秀明^{1,2}, 陈昌瑞¹, 吴川¹, 付世建², 张耀光^{1*}

(1. 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;

2. 重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 为考察摄食水平对岩原鲤幼鱼摄食代谢和力竭运动后代谢特征的影响, 在(25±0.5) °C条件下, 将实验鱼[体质量(13.05±0.17) g]轻度麻醉后灌喂不同摄食水平(通威鲤鱼种饲料, 饵料分别为体质量的0%、0.5%、1%和2%)的混合饵料, 随后在不同时间点测量其耗氧率并计算相关参数。结果显示, 各个摄食处理组和对照组的静止代谢(RMR)无显著性差异; 摄食后, 各摄食水平组岩原鲤代谢率均呈现先上升后下降的整体变化趋势; 0.5%和1%摄食水平的SDA耗能和峰值时间无显著性差异, 但都显著低于2%摄食水平组($P < 0.05$)。摄食水平从0.5%上升到2%, 摄食代谢峰值(PMR)和SDA系数无显著性变化; 摄食组运动前代谢率显著高于禁食组($P < 0.05$), 但摄食组的运动代谢峰值、代谢率增量和过量耗氧(EPOC)与禁食组无显著性差异; 岩原鲤幼鱼的最大代谢率MMR和MMR/RMR显著大于其PMR和PMR/RMR($P < 0.05$)。研究表明, 随着摄食水平的上升, 岩原鲤幼鱼主要通过SDA时间的延长来满足SDA耗能增加的需求; 摄食对岩原鲤力竭运动后代谢恢复过程无显著性影响。

关键词: 岩原鲤; 特殊动力作用; 运动后过量耗氧; 摄食水平; 代谢率

中图分类号: Q 591.1; S 917.4

文献标志码: A

动物摄食过程中代谢耗能增加的现象常称为特殊动力作用(specific dynamic action, SDA), 它包括所有与营养代谢有关的食物的消化、吸收、代谢转换和生长等过程的能量支出^[1]。鱼类在不同摄食水平下所表现出来的SDA特征与其消化能力和生态习性等有着紧密关联^[2]。也有研究发现, 鱼类SDA的大小与其生长率呈正相关^[1]。因此, 研究鱼类在不同摄食水平下的SDA特征有利于评价鱼类养殖性能, 为养殖实践提供重要的基础数据。

与摄食一样, 力竭性运动作为鱼类逃逸、捕食、繁殖等行为实现的主要方式, 为其生存、生长及繁衍提供了基本保障。力竭性运动后的过量耗氧(excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)是指动物运动后恢复期内超过静止状态耗氧水平的额外耗氧量^[3]。许多研究发现, 体质量、水温、

运动方式等因素均会对EPOC产生影响^[3-5], 有关鱼类摄食对其EPOC影响的研究较少^[6-7]。

在自然界中, 动物经常需要同时执行摄食和运动这两种生理功能。但是, 在一定条件下, 动物在理论上具有一个最大代谢率(maximum metabolic rate, MMR), 它与动物维持基本功能的代谢水平即静止代谢率(rest metabolic rate, RMR)的差值称为代谢范围(metabolic scope), 是动物执行各种生理功能可能占用的潜在代谢空间^[8]。因此, 当摄食和运动同时进行, 两者可能受到其代谢范围的限制而表现出不同的适应特征。这些特征与鱼类的消化能力、运动能力以及生活习性密切相关^[2]。更多不同生态习性鱼类的相关研究将有利于进一步揭示鱼类摄食代谢和运动代谢的生态适应策略。

收稿日期: 2012-03-02 修回日期: 2012-09-06

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项经费(200903048-08); 国家自然科学基金项目(31172096); 重庆市自然科学基金项目(cstc2011jjA80012)

通讯作者: 张耀光, E-mail: zhangyg@swu.edu.cn

岩原鲤(*Procypris rabaudi*), 又名岩鲤, 隶属鲤形目(Cypriniformes), 鲤科(Cyprinidae), 原鲤属(*Procypris*), 是一种栖居于长江中上游江河岩石缝间的底层鱼类^[9]。该鱼肉质细嫩、味道鲜美、营养丰富、无肌间刺、含肉率高, 深受消费者所喜爱, 是一种上等食用鱼类^[10]。由于三峡水利枢纽等坝闸的兴建和滥捕等原因, 使岩原鲤野生资源日益枯竭, 《中国濒危动物红皮书(鱼类)》中已将其列为易危物种^[11]。随着岩原鲤人工繁殖技术的日益成熟, 已有部分地区正在逐步开展其人工养殖实践^[12]。但由于岩原鲤生长速度较为缓慢, 养殖周期较长且产量不高等原因, 严重制约了其大规模养殖的推广。目前, 有关该种鱼的基础生物学、消化能力、营养品质等方面已有研究涉及^[10,13], 但其摄食代谢和 EPOC 的研究尚未见报道。本实验以岩原鲤幼鱼为对象, 考察摄食水平对其摄食代谢和 EPOC 特征的影响, 不仅有助于揭示其相关的生理生态适应对策, 同时还能够为岩原鲤的大规模养殖提供重要的参考数据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源与驯养

实验采用的岩原鲤幼鱼购于重庆万州水产研究所, 实验前在室内循环水养殖系统中以通威鲤鱼种配合饲料为饵料(粗脂肪、碳水化合物、粗蛋白质和灰分百分比分别为 7.5±0.5、37.1±1.2、35.2±0.9、9.1±0.4), 每天饱足投喂 2 次(9:00 和 17:00), 驯养 4 周。驯养期间水温控制在(25±0.5) °C, 溶氧水平大于 6 mg/L, 为消除光照对摄食代谢的影响, 依据国内外相关研究的通用方法, 整个实验过程为全光照^[14-15]。

1.2 实验设计

采用麻醉灌喂方法^[16]以解决在测定条件下实验鱼主动摄食不充分的问题。根据相关文献^[17]和预备实验发现实验鱼的单次最大摄食水平约为体质量的 2%左右, 据此本实验以通威鲤鱼种配合饲料为饵料进行 3 个不同摄食水平(0.5%、1%和 2%体质量的饵料, 样本量分别为 7、7 和 6 尾)的处理, 以麻醉假灌喂(0%摄食水平, 样本量为 6 尾)作为处理组对照。为了考察麻醉灌喂可能对岩原鲤代谢产生的影响, 另设置了 1 个非麻醉非灌喂组(样本量为 6 尾)为假灌喂对照组。

为了研究摄食对 EPOC 的影响, 首先对实验鱼进行麻醉假灌喂(灌喂水平为 0%, 样本量为 6 尾)和麻醉饱食灌喂(灌喂水平分别为 2%, 样本量为 6 尾)处理, 分别称为禁食组和摄食组, 然后将实验鱼追赶至力竭后进行 EPOC 的测定^[4]。

1.3 实验设备与代谢率测定

采用鱼类流水式呼吸仪^[15]测定实验鱼的耗氧率, 作为代谢率的指标。呼吸仪中呼吸室入水口的上方有一个可开启的投喂孔, 在呼吸室后下方有一个可开启的排粪孔。实验鱼单独放置在呼吸室(0.1 L)内。每次测定包括一个空白对照和数个测定呼吸室。实验鱼代谢率(R , mg O₂/h)由以下公式计算:

$$R = \Delta O_2 \times V \quad (1)$$

式中, ΔO_2 是装有实验鱼的呼吸室和没有实验鱼的空白呼吸室的溶氧差值(mg/L), V 是装有实验鱼的呼吸室水流速度(L/h)。为了消除鱼体质量不同对耗氧率产生的影响, 以 0.75 为体质量系数把耗氧率标准化为 1 kg 体质量^[2]:

$$R' = (1/M)^{0.75} \times R \quad (2)$$

式中, R' 为标准体质量代谢率, R 同(1)式, M 为鱼体质量(kg)。

溶氧值用溶氧仪(HQ40d, Hach Company, Loveland, CO, USA)测定。水流速度用呼吸室出水口的水流装满 100 mL 容量瓶所需时间计算得到。每一个呼吸室的流速(约 0.66 L/h)在实验过程中基本保持不变, 确保大于 70 %的溶氧饱和度, 避免低氧对实验鱼造成生理胁迫。

1.4 实验操作

摄食代谢测定 待实验鱼禁食 24 h 后, 选取体质量相近、鱼体健康的岩原鲤幼鱼[(12.93±0.23) g, $n=33$]分别放入呼吸室内驯化 24 h, 然后分别在第二天的 09:00、15:00 和 21:00 时测定单尾鱼的耗氧率, 以 3 次耗氧率的平均值作为实验鱼的静止代谢率(resting metabolic rate, RMR)。将单尾鱼从呼吸室中取出并放入含有麻醉剂(3-氨基苯甲酸乙酯甲基磺酸盐, MS-222, 50 mg/L)的水中麻醉 2 min (剂量和时间由预备实验结果确定), 使其基本丧失正常反应能力, 然后用事先准备好的装有稀释饲料(颗粒饲料以 1:1.5 的比例加水稀释)的 1 mL 塑料注射器(去掉针头)经口咽腔插入实验

鱼前肠前端, 将不同灌喂水平的饲料推入前肠内, 处理对照组只进行麻醉和灌喂动作处理, 并无任何饲料灌入其前肠内。随后将其放回呼吸室内, 整个灌喂过程在 2 min 内完成。此后每间隔 2 h 测定 1 次耗氧率, 连续测定 30 h。2%摄食水平组有 1 条实验鱼未能灌入足够的饲料, 故放弃这条实验鱼代谢数据的测定。因此, 假灌喂对照组、处理对照组、0.5%、1%和 2%摄食水平组最终样本量分别为 6、6、7、7 和 6 尾。

EPOC 的测定 岩原鲤[(13.36±0.12) g, $n=12$]在呼吸室内驯化 24 h, 进行麻醉假灌喂(0%灌喂水平)和麻醉饱食灌喂(2%灌喂水平, 样本数各为 6 尾)。在灌喂结束后 12 h 进行力竭运动前代谢率测定(据以上岩原鲤摄食代谢测定结果得知 2%摄食水平组的 SDA 峰值时间出现在 12 h 左右), 随后将实验鱼从呼吸室取至环形水道中(容量 150 L, 流速约为 65 cm/s), 用手不断追逐(2~3 min)使鱼被迫持续运动至力竭性状态, 通常为失去平衡或当继续追逐不再有明显应激反应^[4]; 然后立即将力竭性状态的实验鱼放回呼吸室(0.1 L)内进行耗氧率的测定(该过程在 15 s 内完成), 测定时间点设定为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60 min。呼吸室的水流速度为 0.6 L/min, 根据公式^[18]计算, 该呼吸室的水体在 1 min 内即可置换 99%, 足以准确考察实验鱼的最大运动代谢水平。

1.5 实验参数及统计方法

实验主要采取以下参数描述摄食代谢特征。

(1)摄食水平(%body weight): 灌喂饲料重量占鱼体质量的百分比; (2)能量摄食率(kJ/kg): 实验鱼单位体质量所灌喂的食物所含能量, 灌喂的稀释饲料含能量采用 XRY-1B 微机氧弹热量计测定, 结果为(7.07±0.03) kJ/g; (3)静止代谢率[mg O₂/(kg·h)]: 将实验鱼禁食驯化 24 h, 然后分别在 09:00、15:00 和 21:00 时测定每尾实验鱼的耗氧率, 以平均值作为其静止代谢率; (4)摄食代谢峰值(peak metabolic rate, PMR)[mg O₂/(kg·h)]: 摄食代谢过程观察到的代谢率中的最大值作为摄食代谢峰值; (5)峰值到达时间(h): 摄食代谢峰值出现的时间; (6)SDA 时间(h): 从灌喂开始到摄食代谢率回落至与静止代谢率无显著性差异对应的时间长度为 SDA 时间; (7) SDA 总耗能量(kJ/kg): 用 SDA 时间内各段摄食代谢率和静止代谢率之差在时间上的积分求得每尾鱼单位体质量的耗氧量, 该耗氧量与氧热当量系数(13.84 J/mg O₂)相乘得到 SDA 总耗能量; (8) SDA 系数(%): SDA 总耗能量占摄入食物能量的比例。

力竭运动后代谢特征参数: (1)运动前代谢率[mg O₂/(kg·h)]: 力竭运动前实验鱼的耗氧率; (2)运动代谢峰值[mg O₂/(kg·h)]: 实验鱼在力竭运动后恢复过程中的最大耗氧率, 与鱼类的有氧代谢能力相关, 作为其最大代谢率的指标^[4]; (3)过量

表 1 摄食水平对岩原鲤幼鱼摄食代谢参数的影响(平均值±标准误)

Tab.1 Effect of meal size on several variables of postprandial metabolic response in *P. rhabaudi* mean±SE

参数 parameters	假灌喂对照 sham feeding control	处理对照 control	摄食水平处理组 meal size groups (% body weight)		
			0.5	1	2
样本数 sample size	6	6	7	7	6
体质量/g body weight	13.10±0.67	13.33±0.61	12.44±0.28	12.90±0.56	12.98±0.58
静止代谢率/[mg O ₂ /(kg·h)] resting metabolic rate	49.50±2.60	48.96±1.13	47.83±1.45	47.30±2.09	48.21±3.04
摄食水平/(%body weight) meal size	—	—	0.52±0.01 ^c	1.03±0.02 ^b	2.00±0.01 ^a
能量摄食率/(kJ/kg) energy ingested	—	—	36.57±1.04 ^c	72.99±1.17 ^b	141.73±0.95 ^a
SDA 时间/h duration	—	—	16	20	24
峰值时间/h time to peak metabolic rate	—	—	4.29±0.81 ^b	6.57±0.95 ^b	11.67±1.96 ^a
摄食代谢峰值/[mg O ₂ /(kg·h)] peak metabolic rate	—	—	61.98±4.07	60.68±3.02	68.22±2.97
SDA 总耗能量/(kJ/kg) energy expended on SDA	—	—	4.55±1.46 ^b	5.61±1.72 ^b	11.05±1.90 ^a
SDA 系数/% SDA coefficient	—	—	12.40±3.78	7.73±2.34	7.81±1.35

注: SDA 即特殊动力作用, 上标字母不同的同一行数值差异显著($P<0.05$)。

Notes: SDA represents specific dynamic action. Values in each row without a common superscript indicates a significant difference ($P<0.05$).

氧耗(mg O₂/kg): 实验鱼在力竭运动后恢复过程中各个时间点高于运动前耗氧率的差值在时间上的积分, 常被作为评价鱼类无氧代谢能力的重要参数^[19]; (4)代谢率增量[mg O₂/(kg·h)]: 运动代谢峰值与运动前代谢率的差值; (5) 运动后恢复时间(h): 力竭运动恢复过程中代谢率回落到与运动前代谢率无显著性差异所对应的时间。

实验数据用 EXCEL(2003)进行常规计算后, 用 SPSS 11.5 软件进行单因素方差分析, 如差异显著进行 Duncan 氏多重比较。描述统计值用平均值±标准误, 显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 摄食水平对岩原鲤幼鱼摄食代谢的影响

实验中各组鱼的体质量和静止代谢率都没有显著性差异(表 1); 除了假灌喂对照组和处理对照组外, 其余各实验处理组摄食代谢率在灌喂 2 h 后显著增加($P<0.05$), 峰值出现在灌喂后的 4~12 h, 然后代谢率总体上逐步下降到灌喂前水平(图 1); 将假灌喂对照组和处理对照组各测定时间点的代谢率进行 t -检验, 发现各数据点均无显著差异, 表明本实验中所采用的麻醉灌喂操作处理对代谢率的测定没有显著影响。

当摄食水平从 0.5 %增加到 2%时, SDA 时间和峰值到达时间均呈现增加趋势, SDA 时间分别为 16、20 和 24 h, 峰值到达时间分别为 4.29、6.57 和 11.67 h (表 1); 各个摄食水平组的摄食代

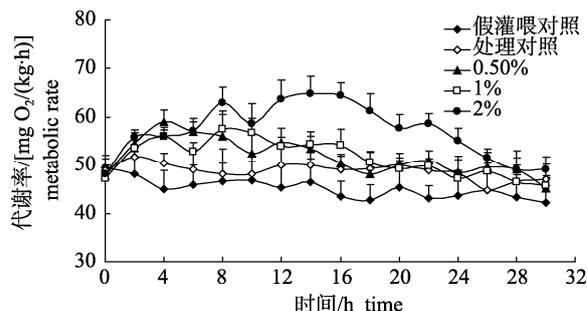


图1 摄食水平对岩原鲤幼鱼摄食代谢率的影响 (平均值±标准误)

Fig.1 The postprandial metabolic response of *P. rabaudi* after feeding with different meal sizes and sham force-feeding (mean±SE)

谢峰值无显著性差异, 0.5%、1%和 2%摄食水平组的摄食代谢峰值分别为 61.98、60.68 和 68.22 mg O₂/(kg·h); 随着摄食水平的增加, 岩原鲤幼鱼的 SDA 总耗能呈现上升趋势, 其中 0.5%和 1%摄食水平组无显著性差异, 但显著小于 2%摄食水平组($P<0.05$); 各摄食水平组的 SDA 系数(%)之间无显著性差异, 分别为 12.40、7.73 和 7.81(表 1)。

2.2 摄食对岩原鲤幼鱼力竭运动后代谢率的影响

摄食组(2%摄食水平)运动前代谢率为 64.82 mg O₂/(kg·h), 显著高于禁食组[49.38 mg O₂/(kg·h)] ($P<0.05$)(表 2); 摄食组和禁食组代谢率在力竭运动后 1~2 min 达到最大值, 然后代谢率总体上逐步下降到运动前水平(图 2); 摄食组和禁食组运动后恢复时间分别为 30 和 45 min;摄食组运动代谢

表 2 禁食组和摄食组岩原鲤幼鱼力竭运动后代谢率和力竭运动恢复过程代谢率曲线拟合方程($y = a + be^{-cx}$)参数
Tab.2 EPOC response in fasting and feeding *P. rabaudi* and variables in the equation $y = a + be^{-cx}$ described the time course of post-exercise oxygen consumption in fasting and feeding fish

参数 parameters	禁食组(0%) fasting group	摄食组(2%) feeding group
体质量/g body weight	13.35±0.18	13.37±0.19
摄食水平/(%body weight) meal size	—	1.97± 0.02
运动前代谢率/[mg O ₂ /(kg·h)] pre-exercise metabolic rate	49.38±2.38 ^b	64.82±1.73 ^a
运动代谢峰值/[mg O ₂ /(kg·h)] peak post-exercise metabolic rate	190.21±11.59	196.01± 8.60
代谢率增量/[mg O ₂ /(kg·h)] increment of metabolic rate	140.82±10.82	131.19± 9.98
运动后恢复时间/min duration	45	30
过量耗氧/(mg O ₂ /kg) EPOC magnitude	32.02± 3.35	28.42±2.86
a	47.2 ± 6.1	52.4 ± 3.9
b	143.1 ± 26.3	146.5 ± 4.4
c	0.052 ± 0.007	0.065 ± 0.004
R^2	0.75	0.82
P	<0.001	<0.001

注: 上标字母不同的同一行数值差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values in each row without a common superscript indicate a significant difference ($P<0.05$).

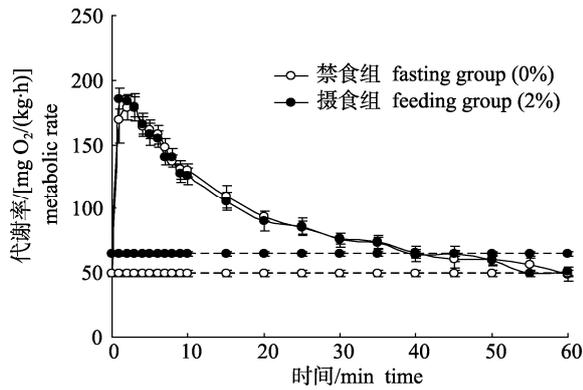


图2 禁食和摄食状态下岩原鲤幼鱼力竭运动后的代谢反应

Fig.2 EPOC response in fasting and feeding *P. rabaudi*

峰值、代谢率增量和过量耗氧分别为 196.01、131.19 mg O₂/(kg·h)和 28.42 mg O₂/kg, 与禁食组无显著性差异(分别为 190.21、140.82 mg O₂/(kg·h)和 32.02 mg O₂/kg)(表 2)。力竭运动后代谢率和时间关系可以通过以下公式^[4]描述:

$$y = a + be^{-cx} \quad (3)$$

式中, a 表示运动前代谢率, b 表示代谢率增量, c 表示代谢恢复速率(c 值越大表示恢复速率越快)。

2.3 岩原鲤幼鱼的最大代谢率(MMR)

实验测得岩原鲤幼鱼的最大代谢率约为 (196.01±8.60) mg O₂/(kg·h), 为其静止代谢率的 (3.96±0.15)倍(图 3), 其绝对大小及上升比率均显著大于最大摄食水平组的摄食代谢峰值(64.82±1.73 mg O₂/(kg·h))和峰值比率(1.31±0.05) ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 摄食水平对岩原鲤幼鱼摄食代谢的影响

研究表明, 随着摄食水平的提高, 多数鱼类的 PMR 与(或者)SDA 时间会呈现增加趋势以满足耗能增加的需求^[15,20]。随着摄食水平的提高, 南方鲇(*Silurus meridionalis*)的 PMR 和 SDA 时间都显著性增加, 这有利于尽快完成消化过程, 最大程度的利用食物资源和快速生长^[15]; 而锦鲤(*Carassius auratus*)仅仅通过 PMR 的提高来满足代谢耗能增加的需求^[21], 研究者认为这有利于摄食后迅速消化吸收, 为再次摄食做准备。与南方鲇和锦鲤不同, 当摄食水平从 0.5%增加到 2%时, 岩原鲤幼鱼 SDA 时间显著性增加(从 16 h 增加到 24 h), 而 PMR 却无显著性变化(表 1)。由此表明, 岩原鲤仅仅通过延长消化时间来满足消化耗能增

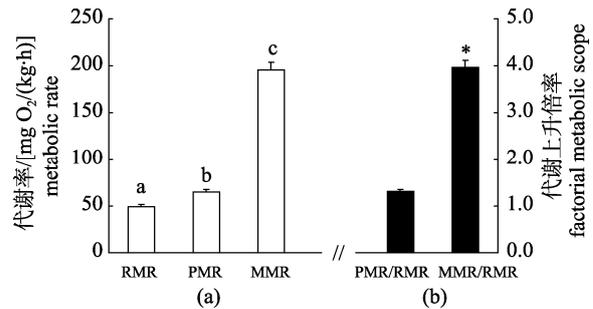


图3 岩原鲤静止代谢率(RMR)、最大摄食代谢峰值(PMR)和最大运动代谢率(MMR)(a)及岩原鲤摄食代谢上升倍率(PMR/RMR)和运动代谢上升倍率(MMR/RMR)(b)

柱形图上的不同字母表示差异显著($P<0.05$)(平均值±标准误)。*表示 PMR/RMR 和 MMR/RMR 之间差异显著($P<0.05$)。

Fig.3 Resting metabolic rate, peak metabolic rate and maximum metabolic rate of *P. rabaudi*(a) and the factorial metabolic scope (PMR/RMR and MMR/RMR) of *P. rabaudi* (b)

Bars without a common letter indicate a significant difference ($P<0.05$). * denotes a significant difference in values between MMR/RMR and PMR/RMR ($P<0.05$)

加的需求, 暗示其消化速率较慢。加之岩原鲤幼鱼单次最大摄食水平(约 2%)较低, 这些都可能是该种鱼生长较慢的原因。

与陆生脊椎动物相比, 鱼类的 SDA 系数较小, 一般在 9%~19%^[1]。虽然少数鱼类的 SDA 系数随着摄食水平的提高显示出不同的变化趋势^[2,20]。但是, 鱼类 SDA 的能量消耗与消化食物总量呈线性相关, 在不同的摄食水平下 SDA 系数无显著性差异^[15, 22]。本研究发现, 摄食水平从 0.5%增加到 2%, 岩原鲤幼鱼的 SDA 系数均无显著性差异。

3.2 摄食对岩原鲤幼鱼力竭运动后代谢的影响

有研究者发现, 禁食状态下鱼类运动前后代谢率特征与其活跃性密切相关^[7]。为了维持较为频繁的活动, 相对活跃的锦鲤和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)运动前代谢率(即静止代谢率)、运动代谢峰值和运动后恢复速率要显著高于活动较为迟缓的瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)和南方鲇^[7], 这可能是因为活跃型鱼类具有较强的循环和呼吸系统功能, 能够更快地摄取和分配氧气。通过与以上 4 种鱼的比较, 实验发现在禁食状态下, 岩原鲤幼鱼运动前代谢率和运动后代谢峰值要低于锦鲤和草鱼, 但高于瓦氏黄颡鱼和南方鲇, 运动后恢复速率(c 值)仅仅大于南方鲇(表 3)。由此表明, 岩原鲤幼鱼的活动性低于锦鲤和草鱼等活

表 3 几种鱼类禁食状态下运动前代谢率、运动后代谢峰值和代谢恢复速率(c 值)的比较

Tab.3 The pre-exercise metabolic rate, peak post-exercise metabolic rate and recovery rate of some fasting fish species

种类 specie	水温/℃ temperature	体质量/g body weight	摄食水平/ (%body weight) meal size	运动前代谢率 /[mg O ₂ /(kg·h)] pre-exercise meta- bolic rate	运动后代谢峰值 /[mg O ₂ /(kg·h)] peak post-exercise metabolic rate	代谢恢复速率 (c 值) recovery rate	文献 reference
南方鲇 <i>S. meridionalis</i>	25.0	16.4	0	42.2	127.1	0.035	[7]
瓦氏黄颡鱼 <i>P. fulvidraco</i>	25.0	6.0	0	44.0	166.5	0.162	[7]
锦 鲫 <i>C. auratus</i>	25.0	6.1	0	69.8	294.3	0.519	[7]
草 鱼 <i>C. idellus</i>	25.0	7.4	0	56.2	303.4	0.243	[7]
岩原鲤 <i>P. rabaudi</i>	25.0	13.4	0	49.4	196.0	0.052	this paper

跃型的鲤科鱼类,这可能与喜欢栖息躲藏于江河底层较暗的石缝和深坑的生活习性有关。

摄食对运动能力的影响与鱼类摄食代谢率密切相关^[7]。通常鱼类的 PMR 越大,对其运动能力的影响也会越大。南方鲇在最大摄食水平下,PMR 与 MMR 在数值上相近,均约为 RMR 的 4 倍^[15,23],摄食活动几乎能够占用所有的代谢范围[(PMR - RMR)/(MMR - RMR)约为 100%],并且 PMR 能够持续较长时间。不过,此时其临界游泳速度和过量耗氧显著下降,摄食导致其运动能力显著降低^[2,7]。这可能是由于其位于食物链顶端,缺乏天敌,采用伏击取食和静息隐匿消化食物的生活习性,因此,不需要将更多代谢范围用于避敌索饵等其它生理活动^[15]。相比于南方鲇,瓦氏黄颡鱼的 PMR 远低于 MMR,其摄食代谢仅占用总代谢范围的 40%左右,PMR 同样能够持续较长时间^[20]。但是,在最大摄食水平下其临界游泳速度和过量耗氧并未显著下降,即摄食对有氧和无氧运动能力无显著性影响^[2,7]。笔者认为,消化食物这一生理活动对瓦氏黄颡鱼代谢范围的占用并不大,可能与其在消化食物之外需要频繁进行觅食活动的的生活习性有关^[20]。本研究发现,岩原鲤幼鱼 PMR/RMR 的比值明显小于 MMR/RMR(分别为 1.31 和 3.96)(图 3),摄食代谢仅仅占用总代谢范围的 10%左右,PMR 也能够持续较长时间(10 h 左右)(图 1)。此外,摄食组和禁食组岩原鲤幼鱼的运动代谢峰值和过量耗氧都无显著性差异。由此暗示,摄食并没有影响岩原鲤幼鱼的有氧和无氧运动代谢能力。这与草鱼的研究结果相似,主要原因可能是其摄食代谢反应

不太明显所导致^[7]。由于岩原鲤在自然界中的营养等级较低,摄食这一生理过程占用岩原鲤代谢范围较少,在摄食消化过程中保持较高的运动能力,可能有利于避敌和索饵,进而提高其生存适合度。

参考文献:

- [1] Jobling M. The influences of feeding on the metabolic rate of fishes: a short review[J]. *Journal of Fish Biology*, 1981, 18(5): 385-400.
- [2] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, *et al.* The behavioural, digestive and metabolic characteristics of fishes with different foraging strategies [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(14): 2296-2302.
- [3] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, *et al.* Excess post-exercise oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*Oncorhynchus kisutch*) salmon following critical speed swimming [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(18): 3253-3260.
- [4] 彭姜岚,曹振东,付世建. 鲇鱼力竭性运动后的过量耗氧及其体质量的影响[J]. *水生生物学报*, 2008, 32(3): 380-386.
- [5] Kieffer J D, Wakefield A M, Litvak M K. Juvenile sturgeon exhibit reduced physiological responses to exercise [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(24): 4281-4289.
- [6] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of feeding and fasting on excess post-exercise oxygen consumption in southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2007, 146(3): 435-439.
- [7] Fu S J, Cao Z D, Peng J L, *et al.* Effects of meal size on excess post-exercise oxygen consumption in fishes with different locomotive and digestive performance [J].

- Journal of Comparative Physiology B, 2009, 179(4): 509–517.
- [8] 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.
- [9] 蔡焰值, 蔡焯强, 何长仁, 等. 岩原鲤的生物学初步研究[J]. 水利渔业, 2003, 23(4): 17–21.
- [10] 施白南. 岩原鲤的生活习性及其资源保护[J]. 西南师范学院学报: 自然科学版, 1980, 2(1): 93–103.
- [11] 汪松, 乐佩琪, 陈宜瑜. 中国濒危动物红皮书(鱼类)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 170–172.
- [12] 吕小江, 刘宏. 岩原鲤池塘养殖技术[J]. 渔业现代化, 2007, 34(5): 37–38.
- [13] 叶元土, 罗莉, 林仕梅, 等. 岩原鲤消化能力和营养价值的初步研究[J]. 四川动物, 1998, 17(1): 7–10.
- [14] Hunt VHI, White L. The effects of body mass and feeding on metabolic rate in small juvenile Atlantic cod[J]. Journal of Fish Biology, 2002, 61(4): 945–958.
- [15] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of meal size on specific dynamic action in southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology A, 2005, 140(4): 445–451.
- [16] Thorarensen H, Farrell A P. Postprandial intestinal blood flow, metabolic rate, and exercise in Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2006, 79(4): 688–694.
- [17] 张从义, 李圣华. 岩原鲤苗种培育及人工养殖技术[J]. 养殖与饲料, 2005, 5(1): 29–31.
- [18] Steffensen J F. Some errors in respirometry of aquatic breathers: how to avoid and correct for them[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 1989, 6(1): 49–59.
- [19] Hancock T V, Gleeson T T. Metabolic recovery in the desertiguana (*Dipsosaurus dorsalis*) following activities of varied intensity and duration[J]. Functional Ecology, 2002, 16(1): 40–48.
- [20] 李秀明, 曹振东, 付世建. 摄食水平对瓦氏黄颡鱼餐后代谢特征的影响[J]. 动物学杂志, 2009, 44 (6): 10–16.
- [21] 庞旭, 曹振东, 付世建. 摄食水平对锦鲤幼鱼特殊动力作用的影响[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2009, 26(1): 22–26.
- [22] Chakraborty S C, Ross L G, Ross B. Specific dynamic action and feeding metabolism in common carp, *Cyprinus carpio* L. [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 1992, 103(4): 809–815.
- [23] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of meal size on specific dynamic action in Chinese catfish[J]. Journal of Comparative Physiology B, 2006, 176(5): 489–495.

Effect of meal size on postprandial metabolic response and excess post-exercise oxygen consumption in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi*)

LI Xiu-ming^{1,2}, CHEN Chang-rui¹, WU Chuan¹, FU Shi-jian², ZHANG Yao-guang^{1*}

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

2. Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Key Laboratory of Animal Biology,

Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To investigate the effect of meal size on postprandial metabolic response and excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi*) [(13.05±0.17) g, n=44], experimental fish were lightly anaesthetized and force-fed with compound feed (meal sizes: 0%, 0.5%, 1% and 2% body weight) at (25±0.5)°C. After diet offered, oxygen consumption rates at different intervals were measured. Variables of postprandial metabolic and EPOC responses were calculated. The results of present study showed that resting metabolic rates (RMR) were not significantly different among all groups. The postprandial metabolic rate first increased and then slowly decreased to pre-fed level. The time to peak metabolic rate and the energy expended on Specific dynamic action (SDA) in 0.5% and 1% meal size groups were lower than that of 2% meal size group ($P<0.05$). The peak metabolic rates (PMR) and the SDA coefficients were not significantly different among 0.5%, 1% and 2% meal size groups. Pre-exercise metabolic rate in feeding group was significantly higher than that of fasting group ($P<0.05$). Peak post-exercise metabolic rate, metabolic rate increment and excess post-exercise oxygen consumption magnitude were not significantly different between feeding group and fasting group. The maximum metabolic rate (MMR) and MMR/RMR were significantly higher than PMR and PMR/RMR ($P<0.05$). The fish fulfilled the increased energy demand during digestive process by means of prolonged SDA duration with the increase of meal size. EPOC was not influenced by feeding in the fish.

Key words: *Procypris rabaudi*; specific dynamic action; excess post-exercise oxygen consumption; force-feeding sizes; metabolic rate

Corresponding author: ZHANG Yao-guang. E-mail: zhangyg@swu.edu.cn