



不同体质量中华倒刺鲃的静止代谢率和生长性能

蒲德永, 庞旭, 刘小红, 夏丹阳, 丁艳红, 陈娟, 张耀光*

(西南大学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: 为了探讨不同体质量中华倒刺鲃能量代谢和生长能力的差异, 在 25 °C 条件下分别测定不同体质量大小 (10、20、40、100 和 180 g 组) 中华倒刺鲃的静止代谢率 (RMR); 经过为期 28 d 投喂养殖实验, 测定各实验组的特定生长率 (SGR)、摄食率 (FR) 和饲料转化效率 (FE); 并测定不同体质量大小 (10.4~248.1 g) 实验鱼的生长激素 (GH) 水平。随体质量的增加, 中华倒刺鲃个体 RMR 显著增加, 单位体质量 RMR 显著下降; SGR 和 FR 均显著增加; 体质量对 FE 影响不显著; GH 水平与体质量间呈显著负相关 ($r = -0.753$, $n = 30$)。单位体质量 RMR 与 SGR ($r = 0.586$, $n = 51$) 和 FR ($r = 0.640$, $n = 51$) 均呈显著正相关, 与 FE ($r = 0.100$, $n = 51$) 关系不显著; SGR 与 FR ($r = 0.956$, $n = 51$) 和 FE ($r = 0.447$, $n = 30$) 均呈显著正相关; FR 与 FE ($r = 0.245$, $n = 30$) 关系不显著。研究表明, 小体质量中华倒刺鲃具有相对更高的维持能量的消耗和生长潜能, 归因于小体质量鱼具有更高的摄食消化及同化能力。

关键词: 中华倒刺鲃; 鲤科; 维持能量; 异速增加; 能量积累; 静止代谢

中图分类号: S 917.4

文献标志码: A

代谢是生物体内所发生的用于维持生命的一系列有序化学反应的总称, 包括有机体与环境间所有的物质与能量交换。静止代谢率 (RMR) 指动物在安静、禁食状态下的代谢能量消耗, 在一定程度上反映其维持能量消耗和整体生理状况^[1-2], 与动物诸多的生理功能密切相关^[3-4]。生长是有机体最基本的生物过程之一, 包括体质量的增加, 细胞数目的扩增, 生理功能的完善等, 是动物能量积累的集中体现。鱼类静止代谢与生长能力之间具有复杂的关系, 一方面, 在资源有限的条件下, 高的静止代谢势必消耗更多的能量, 导致生长率降低^[5]; 另一方面, 在资源充足的环境, 高的静止代谢率具有更强的

生化代谢活性, 鱼类具有更强的生长潜能^[5]。

体质量是动物世界里最为显著和重要的特征之一, 影响动物的生理功能、行为反应及生态过程^[6], 具有丰富的生物学内涵。已有大量研究表明, 动物的静止代谢对体质量依赖具有异速增长关系^[7-10], 即静止代谢与体质量之间呈幂函数的增长关系, 且幂指数不等于 1。动物能量代谢异速增长关系的内在生理机制尚存争论^[4,7,11-12], 其中较为著名的假说有 1/4 幂的分形理论, 认为对一个能量转换单位 (如细胞、线粒体等) 提供资源供应时, 有机体是利用类似分形、分级的转换系统进行的, 其幂指数为 3/4^[11]; 比表面积理论认为, 动物表面积与体积 (体质量) 之间的

收稿日期: 2019-12-25 修回日期: 2020-08-20

资助项目: 国家自然科学基金 (31702020); 西南大学博士启动基金 (SWU119006)

第一作者: 蒲德永 (照片), 从事水产生物形态与生理研究, E-mail: jia@swu.edu.cn

通信作者: 张耀光, E-mail: zhangyg@swu.edu.cn



关系存在指数为 2/3 的幂函数关系, 与外界发生能量交换也应遵从 2/3 法则^[12]; 此外, 活性器官假说则认为动物较大个体具有相对较小的活性器官, 在一定程度也能解释异速增长关系^[7]。这些假说均是针对静止代谢中的维持能量成分进行解释; 动物生长(细胞的增殖、能量的积累)快慢也不可避免地在静止代谢上有所反映^[13]。事实上, 鱼类体质量大小对其自身的生长能力也有一定的影响^[14], 该影响可能与其静止代谢的体质量效应具有同步性, 在一定程度上也能解释鱼类静止代谢的异速增长^[13]。

中华倒刺鲃 (*Spinibarbus sinensis*) 主要分布于我国长江上游及其支流, 是营底栖生活, 偏好流水生境, 主要以水生高等植物为食的杂食性鲤科 (Cyprinidae) 鱼类, 通常 3~4 龄达到性成熟^[1]; 也是我国重要的经济鱼类和人工养殖及增殖放流对象。本研究以不同体质量 (6.5~213.0 g) 中华倒刺鲃为对象, 测定 RMR、特定生长率 (SGR)、摄食率 (FR) 和饲料转化效率 (FE), 也测定了不同体质量 (10.4~248.1 g) 鱼的生长激素 (GH) 水平; 考察体质量对这些参数的影响并探讨它们之间的关系; 旨在揭示鱼类在能量代谢和生长性能体质量效应的内在机制, 并为相关研究领域提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验鱼与驯化

不同体质量实验用中华倒刺鲃 (5.0~250.0 g, $n = 400$) 购于重庆北碚静观水产养殖场, 实验鱼属于同一品系, 购回后在自净化循环控温水槽中进行暂养。驯养 1 周后, 将每尾实验鱼转移至实验单元格 (单元格大小约为实验鱼体积的 300 倍, 单元格浸入水槽), 进行为期 3 周的驯养。暂养和驯养期日换水量约为水体总量的 20%, 昼夜光周期为自然光周期; 每天以商业饲料 (饲料营养成分相同, 仅颗粒大小不同。重庆新希望饲料有限公司, 粗蛋白 $\geq 32.0\%$, 粗脂肪 $\geq 3.0\%$) 在上午 9:00 饱食投喂 1 次, 投喂 1 h 后用虹吸管清除残饵和粪便; 实验用水为经充分曝气控温的自来水, 并用充气泵向驯养水体持续泵入空气以保证水体溶解氧始终维持在 7.0 mg/L 以上, 水体中氨氮浓度控制在 0.025 mg/L 以内。暂养和驯养期水温均控制在 $(25 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 。驯养后, 对不

同体质量的实验鱼 (分为 10、20、40、100 和 180 g 组) 进行能量代谢和生长能力相关参数测定。另外选取不同体质量的实验鱼 30 尾进行 GH 水平测定。为了降低繁殖能量效应; 所选实验鱼均在 1.5 龄之内, 尚未性成熟; 为了消除摄食消化对代谢的影响, 实验鱼在正式实验前禁食 24 h 以上^[15]。

1.2 静止代谢率的测定

采用流水式呼吸仪^[16]对实验鱼的耗氧率进行测定。测定实验鱼体质量、体长后将实验鱼转移至呼吸管 (容积为鱼体积的 8~20 倍), 待其在呼吸室内适应 12 h 后, 以 1 h 的时间间隔测定实验鱼耗氧率 6 次, 其平均值作为静止代谢率。测定时水温始终维持在 $(25 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$, 溶解氧含量用溶解氧仪 (HQ20, Hach Company, Loveland, CO, USA) 测定, 实验鱼单尾耗氧率 [MO_2 , (mg/h·尾)] 或单位体质量耗氧率 [MO_2 , (mg/h·kg)] 分别由以下公式进行计算:

$$\text{MO}_2[\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{尾})] = \Delta\text{O}_2 \times v \quad (1)$$

$$\text{MO}_2[\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{kg})] = \Delta\text{O}_2 \times v/m \quad (2)$$

式中, ΔO_2 为实验呼吸室和对照呼吸室 (没有鱼) 溶解氧的差值 (mg/L), v 为呼吸室的流量 (L/h), 通过测定出水口在 1 min 内流出的水量, 计算其水体流速, m 为实验鱼体质量 (kg)。

1.3 生长能力的测定

静止代谢率测定完成后, 将实验鱼转移至驯养单元格, 连续投喂 28 d 进行生长实验。实验鱼仍然用驯养阶段所用商业饲料 (各规格饲料颗粒大小均一致), 每天在 9:00 和 16:00 各饱食投喂 1 次。投喂 1 h 后用虹吸管清除残饵和粪便, 记录每尾鱼的摄食颗粒数以计算其摄食量。在正式实验前完成对实验鱼的体质量、体长测定。实验鱼的生长能力参数计算:

$$\text{摄食率 (FR, \% / d)} = 100\% \times \frac{F_c}{[(W_t + W_0) / 2] / t} \quad (3)$$

$$\text{饲料转化效率 (FE, \%)} = 100\% \times \frac{(W_t - W_0) / F_c}{F_c} \quad (4)$$

$$\text{特定生长率 (SGR, \% / d)} = 100\% \times \frac{(\ln W_t - \ln W_0) / t}{F_c} \quad (5)$$

式中, F_c 表示实验鱼消耗的食物 (g); W_0 和 W_t 分别表示实验鱼初始和终末体质量 (g); t 表示实验周期 (d)。

1.4 生长激素的测定

生长实验结束时, 选取不同体质量的鱼 30 尾, MS 222 (Sigma-Aldrich, USA) 麻醉致死, 尾静脉取血并转至肝素钠处理过的 1.5 mL 离心管, 于 4 °C 下 2 000 r/min 离心 20 min 后, 收集上层血浆。根据鱼生长激素 (GH) 酶联免疫分析 (ELISA) 试剂盒 (上海酶联生物科技有限公司) 说明书进行血浆 GH 含量检测和分析。

1.5 数据分析

用 Excel(2003) 软件对所有实验数据作常规计算, 再用 Statistics 6.0 软件进行方差分析和回归分析。用单因素方差分析体质量对静止代谢率、SGR、FR 和 FE 的影响; 方差分析通过后, 各体质量组间进行 Duncan 氏多重比较。单尾鱼静止代谢率与体质量间的关系经取双对数后, 将幂函数关系转化为线性关系, 进行线性回归

分析; 单位体质量静止代谢率、生长各参数之间用一元线性回归分析。所有数据结果均以平均值±标准误 (mean ± SE) 表示, 显著性水平定为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 体质量对静止代谢率的影响

随体质量增加, 实验鱼个体静止代谢率显著增加, 10 g 组与 20 g 组和 20 g 组与 40 g 组间差异不显著, 其余实验组间差异均显著 ($P < 0.05$, 表 1); 单位体质量实验鱼静止代谢率显著降低, 然而 40、100 和 180 g 3 个实验组间差异均不显著 ($P < 0.05$, 表 1)。经双对数转换后, 单尾实验鱼静止代谢率与体质量间呈显著正相关 ($r = 0.977$, $n = 51$, $P < 0.001$), 其代谢尺度指数为 0.799 (95% 置信区间为 0.749~0.849)(图 1)。

表 1 体质量对中华倒刺鲃静止代谢率的影响

Tab. 1 Effect of body mass on resting metabolic rate in *S. sinensis*

参数 parameters	分组 groups				
	10 g	20 g	40 g	100 g	180 g
样本数/尾 number	18	10	9	7	7
体质量/g body mass	9.88 ± 0.56	22.00 ± 0.62	40.99 ± 0.75	103.59 ± 7.06	176.19 ± 9.99
静止代谢率 [#] [mg/(h·尾)] resting metabolic rate	1.80 ± 0.06 ^d	3.10 ± 0.14 ^{cd}	4.67 ± 0.16 ^c	11.20 ± 1.28 ^b	20.70 ± 2.48 ^a
静止代谢率 [*] [mg/(h·kg)] resting metabolic rate	187.41 ± 7.50 ^a	141.53 ± 6.58 ^b	113.96 ± 3.83 ^c	107.66 ± 8.79 ^c	116.51 ± 10.03 ^c

注: 不同字母表示不同体质量组间差异显著 ($P < 0.05$), 下同; [#]. 单尾鱼个体静止代谢率, ^{*}. 单位体质量静止代谢率

Notes: different lower cases indicate significant difference among the different body mass groups ($P < 0.05$), the same below; [#]. individual resting metabolic rate, ^{*}. resting metabolic rate per unit mass

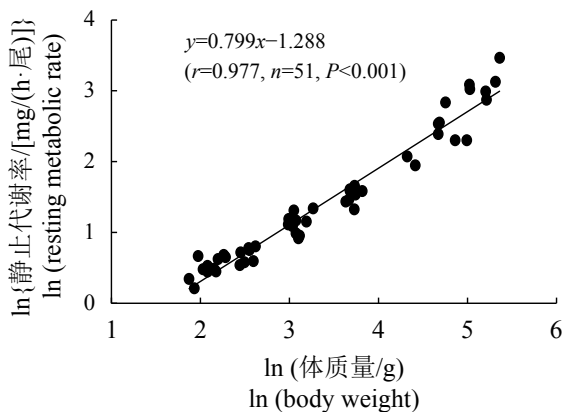


图 1 中华倒刺鲃静止代谢率与体质量间的关系

Fig. 1 Relationships between resting metabolic rate and body weight in *S. sinensis*

2.2 体质量对生长能力的影响

随着体质量增加, 实验鱼 SGR 显著下降, 20 g 组与 40 g 组和 100 g 组与 180 g 组间差异不显著, 其余实验组间差异均显著 ($P < 0.05$, 表 2); 实验鱼 FR 显著下降, 20 g 组与 40 g 组和 100 g 组与 180 g 组间差异不显著, 其余实验组间差异均显著 ($P < 0.05$, 表 2)。体质量对实验鱼 FE 没有显著影响 (表 2)。随体质量增加, 中华倒刺鲃生长激素水平下降, 二者间呈显著负相关 ($r = -0.753$, $n = 30$, $P < 0.001$, 图 2)。

2.3 静止代谢率与生长能力的关系

单位体质量静止代谢率与 SGR ($r = 0.586$, $n = 51$, $P < 0.001$) 和 FR ($r = 0.640$, $n = 51$, $P < 0.001$)

表 2 体质量对中华倒刺鲃生长能力的影响

Tab. 2 Effect of body mass on growth performance in *S. sinensis*

参数 parameters	分组 groups				
	10 g	20 g	40 g	100 g	180 g
样本数/尾 number	18	10	9	7	7
初始体质量/g initial body mass	9.88 ± 0.56	22.00 ± 0.62	40.99 ± 0.75	103.59 ± 7.06	176.19 ± 9.99
终末体质量/g final body mass	17.76 ± 1.29 ^a	32.47 ± 1.19 ^a	62.53 ± 1.52 ^a	127.09 ± 9.80	198.93 ± 15.72
特定增长率/(%/d) specific growth rate	2.85 ± 0.15 ^a	1.94 ± 0.13 ^b	2.11 ± 0.11 ^b	1.00 ± 0.28 ^c	0.56 ± 0.20 ^c
摄食率/(%/d) feeding rate	3.90 ± 0.16 ^a	2.84 ± 0.11 ^b	2.91 ± 0.12 ^b	1.11 ± 0.21 ^c	0.79 ± 0.22 ^c
饲料转化效率/% feed efficiency	50.50 ± 1.46	47.53 ± 1.93	50.92 ± 1.05	55.71 ± 8.02	42.09 ± 7.06

注：“*”代表终末体质量与初始体质量间差异显著($P < 0.05$)

Notes: “*” indicates significant difference between the initial groups and final groups ($P < 0.05$)

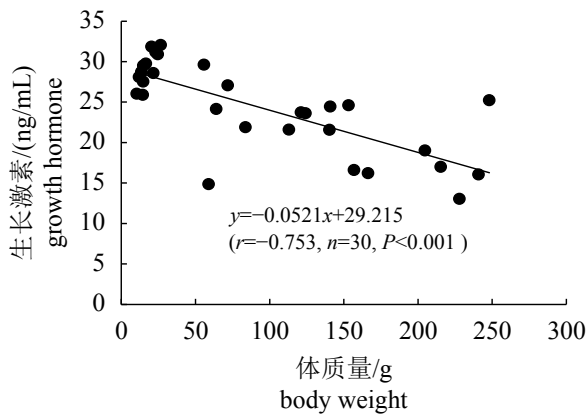


图 2 中华倒刺鲃生长激素与体质量间的关系

Fig. 2 Relationships between growth hormone and body weight in *S. sinensis*

间均呈显著正相关(图 3-a, b), 与 FE 间的关系不显著($r = 0.100$, $n = 51$, $P = 0.485$)(图 3-c)。SGR 与 FR($r = 0.956$, $n = 51$, $P < 0.001$)和 FE($r = 0.447$, $n = 51$, $P = 0.001$)间均呈显著正相关(图 3-d, e)。FR 与 FE 间的关系不显著($r = 0.245$, $n = 51$, $P = 0.083$)(图 3-f)。

3 讨论

体质量是影响动物静止代谢率的重要因素之一, 二者之间存在一定的定量关系, 即动物个体静止代谢率与其体质量之间呈异速增长的幂函数关系^[4], 其核心问题是代谢尺度因子问题(幂指数值)。通常情况下, 幂指数大于 0 而小于 1, 因此动物静止代谢率对体质量有一定依赖性, 而这种依赖性呈非正比的^[4, 7-10]。研究发现, 中华倒刺鲃静止代谢率的尺度因子为 0.799, 与其

他鱼类相似, 也呈异速增长; 例如, 圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)、鲫(*Carassius auratus*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*)静止代谢的尺度因子为 0.728~0.868^[7-10]。这些鱼类静止代谢尺度因子均大于 2/3, 表明简单的 2/3 比表面积法并不能有效解释鱼类静止代谢异速增长^[12]。这可能是因为鱼类隶属变温动物, 在一定温度范围内, 无需(或很少)从环境中直接交换热量以维持身体能量平衡。1/4 幂分形理论是基于大量实验数据所提出的; 机体的能量物质和氧通过体内分形、分级网络结构(如血管)运输到全身各处, 在进化过程中效率最大化, 并认为代谢尺度因子为 3/4 普遍适于动物代谢率的种内和种间异速增长, 据此提出“生态代谢理论”^[17]。对于鱼类而言, 不同物种其静止代谢尺度指数存在一定的变化范围, 又不完全支持 1/4 幂分形理论。

鱼类在生长过程中, 需要消耗一定能量用于“特殊动力作用(SDA)”, 包括物质的消化、吸收和同化等过程, 其中同化过程所占的比例相对较大^[15]。对于鱼类而言, 某些物种摄食后, 会在数天甚至数周后仍然维持较高水平的核糖体 RNA (rRNA)^[18], 进而增强蛋白质的合成等同化能力^[19]。研究发现, 小体质量鱼具有相对更高的单位体质量静止代谢率和特定增长率; 二者之间也呈正相关(图 3-a)。这些结果表明, 中华倒刺鲃静止代谢率异速增长的部分原因在于小体质量具有更强的同化能力, 直接体现在特定增长率方面^[13, 20]。激素水平与鱼类的能量代谢密切

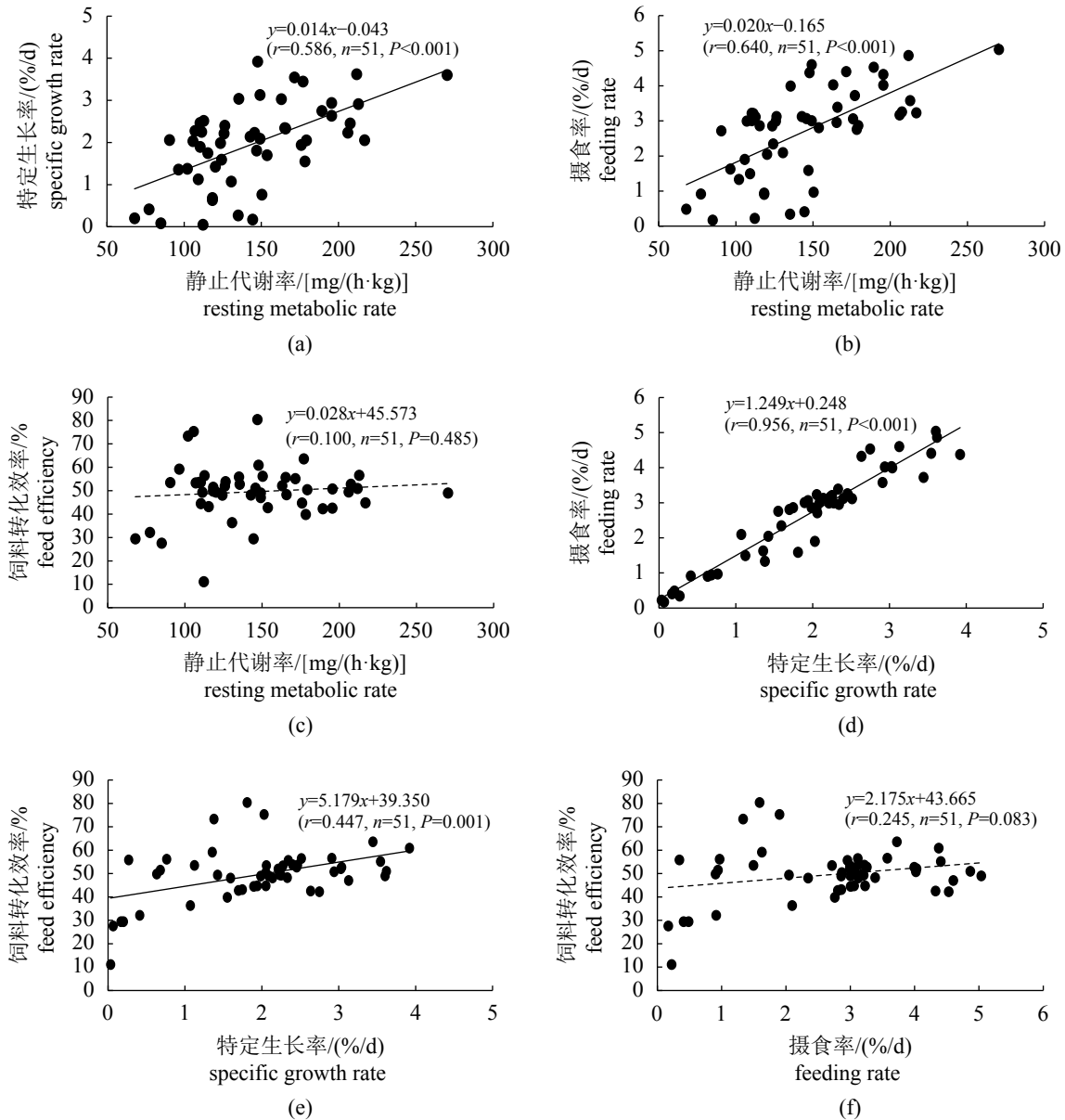


图3 中华倒刺鲃静止代谢率与生长能力间的关系

Fig. 3 Relationships between resting metabolic rate and growth performance

相关, 高的生长激素水平将提高鱼类的静止代谢率和生长潜能^[21]。研究发现, 大体质量中华倒刺鲃具有相对较低的生长激素水平, 使其生长能力相对降低(图2)。中华倒刺鲃静止代谢率与摄食率显著相关(图3-b), 与鲤^[22]、鲫^[5]的研究结果相似。目前有关鱼类静止代谢率与摄食率间的关系尚存争论, 一方面高的静止代谢率个体可能具有更高的能量支出, 需要摄食更多的能量补偿^[22]; 另一方面高摄食率的个体需要更多的能量用于同化作用。本研究各实验组均采用饱食投喂, 表明消化和同化潜能决定其相对摄

食量大小, 因此单位体质量静止代谢率与摄食率间的关系可能不是单一的, 而是互为因果的。

鱼类特定生长率是其能量收支综合结果的体现, 生长快可能是由于摄食多, 或支出少的结果; 此外, 消化吸收率高低也将影响其生长。本研究发现, 中华倒刺鲃特定生长率与摄食率将呈高度正相关(图3-d), 表明小体质量鱼生长快的主要原因在于相对摄食量(即摄食率)大。饲料转化效率也将影响鱼类的特定生长率, 即转化效率越高, 其生长越快, 与已有研究结果一致^[13, 22]。已有研究发现, 鱼类摄食率与饲料转

化效率间在相似体质量个体的鲤中呈正相关^[21]。其原因在于,当静止代谢率一定时,相对摄食量更大的个体,生长更为迅速,其维持代谢所需的时间缩短;进而降低维持能量消耗,增强生长能量积累。然而,本研究发现,中华倒刺鲃摄食率与饲料转化效率间关系不显著(图 3-f);同时不同体质量大小对饲料转化效率也没有显著影响(表 2)。一方面,与大体质量中华倒刺鲃比较,小体质量鱼相对摄食量更大,生长更为迅速,但其单位体质量静止代谢率也相对更高;另一方面,若生长加快,增加相同体质量其所需时间缩短,所消耗维持能量时间也相应缩短,两方面之间相互抵消。事实上,中华倒刺鲃单位体质量静止代谢率与饲料转化效率间也不存在显著相关,与已有研究结果一致^[13]。综上所述,小个体中华倒刺鲃单位体质量代谢旺盛决定其具有更强的消化和同化能力;而小体质量鱼具有更高的摄食率是其生长更快(SGR增大)的直接原因。

在有限的环境空间内,对生物的承载量有所限制,更多的生物量所产生的代谢废物将会作用于环境。随中华倒刺鲃的体质量增加,其特定生长率相对下降,而饲料转化效率不变;因此在核算育苗成本等因素后,合理布局养殖-捕捞模式,比如在投放鱼苗后有计划地进行分批次捕捞销售;可以节约时间成本,同时可以释放池塘承载力,进而提高资源利用效率。

参考文献 (References):

- [1] 庞旭,付世建,曹振东,等. 饥饿和温度驯化对中华倒刺鲃静止代谢和游泳能力的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1854-1860.
Pang X, Fu S J, Cao Z D, *et al.* The effects of fasting and acclimation temperature on the resting metabolism and swimming performance in Qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1854-1860(in Chinese).
- [2] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, *et al.* Effect 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.
- [3] 曾令清,彭韩柳依,王健伟,等. 南方鲇幼鱼运动代谢的个体变异和重复性及其饥饿响应[J]. 水产学报, 2015, 39(1): 52-64.
Zeng L Q, Peng H L Y, Wang J W, *et al.* Repeatability and variation in locomotion metabolism of the juvenile southern catfish during starvation[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(1): 52-64(in Chinese).
- [4] Killen S S, Atkinson D, Glazier D S. The intraspecific scaling of metabolic rate with body mass in fishes depends on lifestyle and temperature[J]. *Ecology Letters*, 2010, 13(2): 184-193.
- [5] Ling H, Fu S J, Zeng L Q. Predator stress decreases standard metabolic rate and growth in juvenile crucian carp under changing food availability[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2019, 231: 149-157.
- [6] Peters R H. The ecological implications of body size[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983: 1-325.
- [7] Luo Y P, He D C, Li G, *et al.* Intraspecific metabolic scaling exponent depends on red blood cell size in fishes[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2015, 218(10): 1496-1503.
- [8] Huang Q D, Zhang Y R, Liu S T, *et al.* Intraspecific scaling of the resting and maximum metabolic rates of the crucian carp (*Carassius auratus*)[J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82837.
- [9] Lü X, Xie H, Xia D Y, *et al.* Mass scaling of the resting and maximum metabolic rates of the black carp[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2018, 188(6): 591-598.
- [10] Shi C C, Yao M, Lv X, *et al.* Body and organ metabolic rates of a cave fish, *Triplophysa rosa*: influence of light and ontogenetic variation[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2018, 188(6): 947-955.
- [11] Farrell-Gray C C, Gotelli N J. Allometric exponents support a 3/4-power scaling law[J]. *Ecology*, 2005, 86(8): 2083-2087.
- [12] White C R, Seymour R S. Mammalian basal metabolic rate is proportional to body mass^{2/3}[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(7): 4046-4049.
- [13] Maino J L, Kearney M R, Nisbet R M, *et al.* Reconciling theories for metabolic scaling[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2014, 83(1): 20-29.
- [14] Wang N, Hayward R S, Noltie D B. Effects of social interaction on growth of juvenile hybrid sunfish held at two densities[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2000, 62(3): 161-167.
- [15] Pang X, Cao Z D, Fu S J. The effects of temperature on metabolic interaction between digestion and locomotion in juveniles of three cyprinid fish (*Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Spinibarbus sinensis*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2019, 231: 149-157.

- ive Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2011, 159(3): 253-260.
- [16] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of meal size on post-prandial metabolic response in southern catfish (*Silurus meridionalis*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2005, 140(4): 445-451.
- [17] Brown J H, Gillooly J F, Allen A P, *et al.* Toward a metabolic theory of ecology[J]. *Ecology*, 2004, 85(7): 1771-1789.
- [18] Wootton R J. Fish bioenergetics[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1995, 5(3): 389-390.
- [19] Arnott S A, Chiba S, Conover D O. Evolution of intrinsic growth rate: metabolic costs drive trade-offs between growth and swimming performance in *Menidia menidia*[J]. *Evolution*, 2006, 60(6): 1269-1278.
- [20] O'Connor K I, Taylor A C, Metcalfe N B. The stability of standard metabolic rate during a period of food deprivation in juvenile Atlantic salmon[J]. *Journal of Fish Biology*, 2000, 57(1): 41-51.
- [21] McKenzie D J, Martínez R M, Morales A, *et al.* Effects of growth hormone transgenesis on metabolic rate, exercise performance and hypoxia tolerance in tilapia hybrids[J]. *Journal of Fish Biology*, 2003, 63(2): 398-409.
- [22] Pang X, Fu S J, Zhang Y G. Acclimation temperature alters the relationship between growth and swimming performance among juvenile common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2016, 199: 111-119.

Resting metabolic rate and growth performance in Qingbo (*Spinibarbus sinensis*) with different body weight

PU Deyong, PANG Xu, LIU Xiaohong, XIA Danyang,
DING Yanhong, CHEN Juan, ZHANG Yaoguang*

(Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Education of Ministry,
Key Laboratory of Aquatic Science of Chongqing, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to investigate the differences of the energy metabolism and growth capacity of Qingbo (*Spinibarbus sinensis*) with different body mass, the resting metabolic rate (RMR) of this kind of fish with different body mass (10, 20, 40, 100 and 180 g groups) was firstly detected. After a 28-day feeding trial, the specific growth rate (SGR), feeding rate (FR) and the feed efficiency (FE) were tested in these groups as well. On the one hand, the RMR of *S. sinensis* was significantly increased with the increase of body mass, however, the RMR of unit weight was significantly decreased. Meanwhile, both SGR and FR were significantly increased, while the FE was indistinctly affected, and plasma GH hormone content was significantly negatively correlated with body mass ($r = -0.753$, $n = 30$). On the other hand, the RMR of unit mass was significantly positively correlated with SGR ($r = 0.586$, $n = 51$) and FR ($r = 0.640$, $n = 51$), however insignificantly correlated with FE ($r = 0.100$, $n = 51$). The SGR was positively correlated with both FR ($r = 0.956$, $n = 51$) and FE ($r = 0.447$, $n = 30$), and the relation between FR and FE was not significantly correlated ($r = 0.245$, $n = 30$). All the information above suggested that, smaller *S. sinensis* can keep higher maintenance energy consumption and growth capacity, and this may be due to their higher digestive and assimilating ability.

Key words: *Spinibarbus sinensis*; Cyprinidae; maintain energy; allometric increase; energy accumulation; resting metabolism

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

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31702020); Doctoral Initiation Fund of Southwest University (SWU119006)