

摄食水平对锦鲫幼鱼特殊动力作用的影响*

庞旭,曹振东,付世建

(重庆师范大学 生命科学学院 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 400047)

摘要 特殊动力作用(SDA)是指动物摄食后代谢增加的现象,相关参数和功率曲线在动物生理生态学上具有重要的意义。本研究在25℃水温条件下,测定0%、0.50%、1.00%、2.00%和4.00%体重等不同摄食水平的锦鲫幼鱼在摄食前和摄食后的耗氧率。结果发现锦鲫幼鱼摄食后耗氧率显著增加($p < 0.05$)约在摄食后2 h达到峰值。0.50%、1.00%、2.00%和4.00%体重等4个摄食组的摄食代谢峰值(耗氧率)分别为(96.15 ± 7.74)、(100.72 ± 7.29)、(117.72 ± 7.23)和(173.22 ± 14.20) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,其中4.00%摄食水平组显著高于其他摄食水平组($p < 0.05$);SDA时间分别为(6.29 ± 0.68)、(7.14 ± 0.85)、(7.33 ± 1.23)和(9.20 ± 1.36)h,各摄食水平组之间没有显著差异;SDA总耗能分别为(1.42 ± 0.18)、(1.58 ± 0.20)、(2.63 ± 0.60)和(5.33 ± 0.76) $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中4.00%摄食水平组的SDA总耗能显著高于其他摄食水平组($p < 0.05$);SDA系数分别为(4.60 ± 0.52)%、(2.54 ± 0.34)%、(2.07 ± 0.45)%和(2.17 ± 0.30)%。0.50%摄食水平组的SDA系数显著高于其他摄食水平组($p < 0.05$)。研究结果表明锦鲫幼鱼摄食后的功率曲线呈典型的“三角形”,这与其经常摄食的生活习性和较低的营养等级地位相适应。

关键词 摄食水平;锦鲫幼鱼;耗氧率;特殊动力作用

中图分类号:Q591.4

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2009)01-0022-04

动物在摄食后代谢增加的现象被称为特殊动力作用(Specific dynamic action, SDA),它包括所有与营养有关的食物的消化、吸收、代谢的转换以及生长等耗能过程^[1-3],又称为热增耗^[4]。已有研究发现动物摄食代谢可能受到环境温度^[5]、饥饿时间^[6]、食物组成^[7]、摄食频率^[8]、个体大小^[9]、摄食习惯^[10]、运动水平和生理状况^[11]等多种因素的影响。研究发现草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)^[12]和南方鲇(*Silurus meridionalis*)^[13] SDA耗能占摄食能量的比例(即SDA系数)不受摄食水平的影响,而鲇鱼(*Silurus asotus*)^[14]的SDA系数在低摄食水平下显著增大。有关鱼类摄食后代谢率的反应,研究者将其归纳为“三角形”、“钟型”和“梯型”三种代谢类型^[13]。研究者认为不同摄食代谢类型与鱼类生态习性相关联,并采用一些不经常摄食的鱼类做了大量的研究^[13],然而有关经常摄食鱼类在该方面的研究资料甚少。锦鲫是一种被广泛饲养的经常摄食鱼类,对环境具有较强的适应能力。本研究中以其幼

鱼为对象,考察不同摄食水平对锦鲫幼鱼SDA的影响,掌握锦鲫幼鱼摄食后代谢率的反应及在时间上配置的功率曲线特征,旨在揭示经常摄食鱼类摄食代谢的生理生态适应对策。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼来源及其驯化

实验用鱼购于重庆当地鱼市,实验前选取40尾健康且体重接近的锦鲫幼鱼,单独驯养于本实验室设计的流水式呼吸仪中的呼吸室里,流水充气饲养^[15-16],单位体积水中溶解氧的质量即溶氧值以 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示,本研究中该值大于 $6 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,每3 d换1/10体积的水,全光照,水温为25℃,驯化2周后开始正式实验。驯化及正式实验时均用购买于重庆隆生饲料有限责任公司草鱼配合饲料投喂,其饲料主要营养成分中蛋白质、脂类、可溶性糖和水分含量分别为16.55%、1.80%、9.66%和58.17%,可消化能值为 $6.27 \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ (可消化能根据蛋白质、脂类和

* 收稿日期 2008-05-07 修回日期 2008-08-25

资助项目 国家自然科学基金(No. 30700087)

作者简介 庞旭,男,硕士研究生,研究方向为鱼类比较生理生化,通讯作者:付世建, E-mail: shijianfu9@hotmail.com。

可溶性糖的焓变求得,其焓变分别为 23.6、39.5 和 17.2 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。驯化阶段每两天饱足投喂一次,正式实验前禁食 48 h。

1.2 实验设计及耗氧率测定

根据预备实验结果,本实验中设计了摄食量为幼鱼体重的 0.50%、1.00%、2.00% 和 4.00% (幼鱼达到饱食状态)以及摄食量为 0 (对照组) 5 个摄食水平。实验采用鱼类流水式呼吸仪测定实验用鱼的耗氧率,仪器中呼吸室入水口的上方有一个可开启的投喂孔。实验用鱼单独放置在 1 L 的呼吸室内。每次测定包括一个空白对照和数个测定呼吸室。溶氧值用溶氧仪 (HQ20, USA) 测定。每尾鱼耗氧率 R 的计算单位为 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$,其中 mg 为消耗氧气的质量单位,下同,计算公式为 $R = \Delta\text{O}_2 \times v$,式中 ΔO_2 是装有实验用鱼的呼吸室和空白呼吸室溶氧差值, v 是装有实验用鱼的呼吸室水流速度 ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$),用呼吸室出水口 1 min 水流称重得到。为了消除体重不同对耗氧率产生的影响,以 0.75 为体重系数把耗氧率标准化为 1 kg 体重^[17],则标准体重耗氧率 (V_{O_2}) 计算公式为 $V_{\text{O}_2} = (1/m)^{0.75} \times R$ 。式中 R 同上式, m 为鱼体重 (kg)。以第一次投喂开始记时,测定时间设定为 -4、-2、0、2、4、6、8、10 和 12 h。在整个实验过程中,溶氧差值 ΔO_2 大于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且水体的溶氧值始终维持在 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。

1.3 实验参数及统计方法

本实验主要采取 8 个参数描述 SDA 特征。1) 摄食水平 (% 体重); 2) 饲料湿重占鱼体重的百分比; 3) 能量摄食率 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); 4) 实验用鱼单位体重所摄入的可消化能; 5) 静止代谢率 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); 6) 将实验用鱼

禁食 24 h 测定代谢 (耗氧) 率作为该尾鱼的静止代谢率^[18-19]; 7) 摄食代谢峰值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); 8) 摄食后每 2 h 测定一次,连续测定的代谢 (耗氧) 率中的最大值作为摄食代谢峰值; 9) 峰值到达时间 (h); 10) 摄食代谢峰值出现的时间; 11) SDA 时间 (h): 从摄食开始到代谢率回落至静止代谢率的标准误差范围内的首个数据所对应的时间长度为 SDA 时间; 12) SDA 总耗能量 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); 13) 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重的耗氧量,该耗氧量与氧热当量系数 (该系数为每 mg 氧 13.84 J) 相乘得到 SDA 总能量^[20]; 14) SDA 系数 (%) SDA 耗能量占摄入能量的比例。

实验数据用 EXCELL2003 进行常规计算后,用 SPSS11.5 软件进行多重比较 (LSD)。统计值用平均值 \pm 标准误 (Mean \pm SE) 描述,差异显著性水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果

2.1 摄食水平对摄食代谢峰值的影响

各实验组在摄食前的静止代谢率没有显著差异 (表 1),对照组在整个实验过程中代谢率没有显著变化,而各摄食水平组摄食后代代谢率均迅速上升,随后逐渐下降到摄食前水平 (图 1)。实验结果还显示,摄食代谢峰值随着摄食水平增加在整体上呈上升趋势,然而在 0.50%、1.00% 和 2.00% 摄食水平组的摄食代谢峰值之间没有显著差异,4.00% 摄食水平组的摄食代谢峰值显著高于其他摄食组 (表 1)。摄食代谢峰值比率 (摄食代谢峰值与静止代谢率的比值) 与摄食代谢峰值有相同的变化趋势。

表 1 摄食水平对锦鲤幼鱼 SDA 参数的影响

Tab. 1 Effect of meal size on several variables of SDA in juvenile crucian carp

参数	摄食水平				
	0	0.50%	1.00%	2.00%	4.00%
样本数/个	6	7	7	6	5
体重/g	5.59 \pm 0.28	5.46 \pm 0.20	5.81 \pm 0.24	5.39 \pm 0.25	4.96 \pm 0.18
摄食水平/%	0	0.49 \pm 0.00	0.99 \pm 0.01	2.03 \pm 0.04	4.00 \pm 0.02
静止代谢率/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	68.13 \pm 2.57	58.28 \pm 2.98	59.73 \pm 2.02	64.90 \pm 3.11	59.49 \pm 3.92
能量摄食率/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0	30.86 \pm 0.22	62.17 \pm 0.41	127.11 \pm 2.29	250.70 \pm 1.35
SDA 时间/h	-	6.29 \pm 0.68	7.14 \pm 0.85	7.33 \pm 1.23	9.20 \pm 1.36
峰值达到时间/h	-	2.00 \pm 0.00	2.29 \pm 0.29	2.00 \pm 0.00	2.00 \pm 0.00
摄食代谢峰值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	69.05 \pm 7.86 ^{*c}	96.15 \pm 7.74 ^b	100.72 \pm 7.29 ^b	117.72 \pm 7.23 ^b	173.22 \pm 14.20 ^a
摄食代谢峰值比率	-	1.69 \pm 0.18 ^b	1.69 \pm 0.13 ^b	1.85 \pm 0.19 ^{ab}	2.96 \pm 0.30 ^a
SDA 总能量/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0	5.23 \pm 0.60 ^b	5.68 \pm 0.69 ^b	9.74 \pm 2.26 ^b	20.18 \pm 3.00 ^a
SDA 系数/%	-	16.90 \pm 1.86 ^b	9.16 \pm 1.14 ^a	7.62 \pm 1.74 ^a	8.04 \pm 1.18 ^a

注:上标字母不同的同一行数值差异显著 ($p < 0.05$); 标注 * 的数据为摄食组峰值时对照组的代谢率。

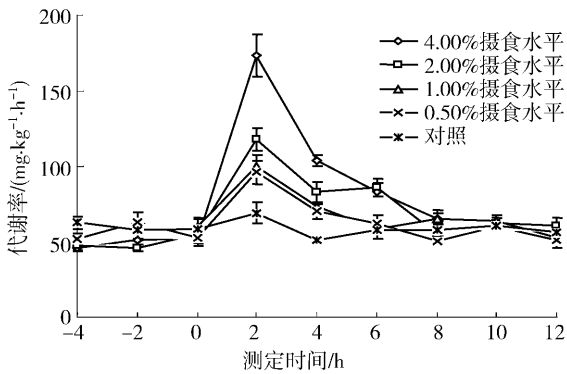


图 1 摄食水平对锦鲤幼鱼摄食后代谢率的影响

Fig. 1 Effect of meal size on profile of postprandial response in juvenile crucian carp

2.2 摄食水平对 SDA 时间及峰值到达时间的影响

实验显示, SDA 时间随着摄食水平增加呈上升趋势, 但各实验组间没有显著差异(表 1)。0.50%、1.00%、2.00% 和 4.00% 摄食水平组的 SDA 时间分别为(6.29 ± 0.68)、(7.14 ± 0.85)、(7.33 ± 1.23) 和(9.20 ± 1.36) h。各实验组峰值到达时间均没有显著差异, 在所有实验用鱼中仅有一尾鱼的峰值达到时间是 4 h, 其他实验用鱼均为 2 h。

2.3 摄食水平对 SDA 总耗能和 SDA 系数的影响

实验结果表明, SDA 总耗能随着摄食水平增加呈上升趋势(表 1), 但 0.50%、1.00% 和 2.00% 摄食水平组 SDA 总耗能之间没有显著差异, 仅 4.00% 摄食水平组的 SDA 总耗能显著高于其他摄食水平组($p < 0.05$); 0.50% 摄食水平组的 SDA 系数为(16.90 ± 1.86)% 显著高于 1.00%、2.00% 和 4.00% 摄食水平组(分别为(9.16 ± 1.14)%、(7.62 ± 1.74)% 和(8.04 ± 1.18)%), 而 1.00%、2.00% 和 4% 摄食水平组 SDA 系数之间没有显著差异(表 1)。

3 讨论

3.1 最大摄食水平 SDA 功率曲线的特征

锦鲤幼鱼摄食后代谢率迅速上升达到峰值, 而后再快速回落。其摄食前静止代谢率大于南方鲇和鲈鱼, 但在摄食率相似的情况下, 其峰值上升比率与南方鲇、鲈鱼相近, 因此其摄食代谢峰值大于南方鲇和鲈鱼^[13-14]。就 SDA 时间而言, 本实验饱食组(4.00% 摄食水平组)锦鲤幼鱼能量摄食率为 $250.70 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其 SDA 时间为 9.2 h, 远小于能量

摄食率分别为 242.6 和 $233.22 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的南方鲇和鲈鱼在相似摄食水平的 SDA 时间 22 和 31 h。就峰值到达时间而言, 本实验饱食组锦鲤幼鱼的峰值到达时间为 2 h, 也远远小于南方鲇和鲈鱼相似摄食水平的 6.3 和 11 h。另外, 锦鲤幼鱼的最大摄食水平为 $250.70 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远远小于南方鲇的 $1204 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和鲈鱼的 $1094.58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 然而其饱食组的摄食代谢峰值为 $173.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 只略小于南方鲇和鲈鱼的饱食组的摄食代谢的峰值即 194.39 和 $203.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由于锦鲤幼鱼摄食后代谢率迅速上升, 达到峰值后快速回落, 且 SDA 时间持续比较短, 没有一个相对稳定的平台期, 所以 SDA 构成的功率曲线为典型的“三角型”(图 1), 与已建立的相关代谢模型相符合。这可能是由于锦鲤是一种经常摄食的鱼, 摄食后迅速消化吸收, 并为再次摄食做准备; 也可能是因为锦鲤的营养等级地位比较低, 必须留下足够的剩余代谢空间用于避敌、索饵等生命活动, 这样有利于提高其适合度^[13]。

3.2 不同摄食水平对 SDA 总耗能和 SDA 系数的影响

锦鲤幼鱼摄食后的 SDA 总耗能在低摄食水平(0.50%、1.00% 和 2.00% 体重)时其 SDA 总耗能没有显著差异, 然而 4.00% 摄食水平的 SDA 总耗能显著高于其他摄食水平的 SDA 总耗能(表 1), 其结果与鲈鱼^[14]相似, 但与草鱼^[12]、南方鲇^[13]摄食水平与 SDA 总耗能成线性相关的结果不同。这可能是由于锦鲤在摄食后, 无论其摄食量的多少, 都要进行有关消化能量的启动、消化功能状态的调节和维持, 而用于对食物的直接消化和同化的那部分能量在低摄食水平时所占 SDA 总耗能的相对比例相对较低, 所以在低摄食水平时 SDA 总耗能没有显著增加。其具体的生理生化机制还需要进一步研究。0.50% 摄食水平的 SDA 系数显著高于 1.00%、2.00% 和 4% 摄食水平的 SDA 系数, 这与摄食水平对 SDA 总耗能的关系具有相同的机制。就 SDA 系数绝对值而言, 锦鲤幼鱼的 SDA 系数($8.04\% \sim 16.90\%$)高于鳕鱼(*Gadus morhua*)^[21]的 SDA 系数(4%), 总体上说低于南方鲇^[13]和鲈鱼^[14]的 SDA 系数(两者分别为 $12.77\% \sim 15.50\%$ 和 $14.09\% \sim 24.74\%$), 然而锦鲤的静止代谢率($58.28 \sim 68.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)高于南方鲇和鲈鱼的静止代谢率(两者分别为 $46.1 \sim$

48.62 mg · kg⁻¹ · h⁻¹和36.10 ~ 43.41 mg · kg⁻¹ · h⁻¹。经常摄食的锦鲤在禁食时维持较高的静止代谢,这可能是要消耗一定能量来维持 SDA 功能的状态,有利于在短时间内进行再次摄食;对于不经常摄食的动物,在禁食条件下采取降低静止代谢的方式可能在节约能量方面更为有利,所以经常摄食的锦鲤呈现出较高的静止代谢和较小的 SDA 系数,这可能与经常摄食的摄食习性相适应^[22]。

参考文献:

- [1] Jobling M. The influences of feeding on the metabolic rate of fishes, a short review[J]. J Fish Biol, 1981, 18: 385-400.
- [2] Brown J R, Cameron J N. The relation between specific dynamic action in and protein synthesis rates in channel catfish[J]. Physiol Zool, 1991, 64: 298-309.
- [3] Lyndon A R, Houlihan D F, Hall S J. The effect of short-term fasting and a single meal on protein synthesis and oxygen consumption in cod *Gadus morhua*[J]. J Comp Physiol, 1992, 71: 862-868.
- [4] Beamish F W H, Trippel E A. Heat increment, a static or dynamic dimension in bioenergetics model?[J] Tran Am Fish Soc, 1990, 119: 379-387.
- [5] Luo Y P, Xie X J. Effects of temperature on specific dynamic action of the southern catfish *Silurus meridionalis* [J]. Comp Biochem Physiol, 2008, 149A: 150-156.
- [6] Toledo L F, Abe A S, Andrade D V. Temperature and feeding level effects on the postprandial metabolism and energetics in a boid snake[J]. Physiol Biochem Zool, 2003, 76: 240-246.
- [7] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of dietary composition on specific dynamic action in southern catfish *Silurus meridionalis* Cher[J]. Aqua Res, 2005, 37: 107-110.
- [8] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of feeding level and feeding frequency on specific dynamic action in southern catfish *Silurus meridionalis* Cher[J]. J Fish Biol, 2005, 37: 171-181.
- [9] Hunt V H I, White L. The effects of body mass and feeding on metabolic rate in small juvenile Atlantic cod[J]. J Fish Biol, 2002, 61: 945-958.
- [10] Secor S M. Regulation of digestive performance: a proposed adaptive response[J]. Comp Biochem Physiol, 2001, A128: 565-577.
- [11] Blaikie H B, Kerr S R. Effect of activity level on apparent heat increment in Atlantic cod *Gadus morhua*[J]. Can J Fish Aquatic Sci, 1996, 53: 2093-2099.
- [12] Carter C G, Brafield A E. The relationship between specific dynamic action and growth in grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*(Val.) [J]. J Fish Biol, 1992, 40: 895-907.
- [13] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of meal size and on specific dynamic action in southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen)[J]. Comp Biochem Physiol, 2005, 104 A: 445-451.
- [14] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of meal size on postprandial metabolic response in Chinese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus)[J]. J Comp Physiol, 2005, 176: 489-495.
- [15] 张怡, 曹振东, 付世建. 延迟首次投喂对南方鲇 (*Silurus meridionalis* Chen) 仔鱼身体含能量、体长及游泳能力的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1161-1167.
- [16] 汤洪芬, 曹振东, 付世建. 饥饿对鲇鱼幼鱼静止代谢率的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2007, 24(1): 72-75.
- [17] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of fasting and repeat feeding on metabolic rate in southern catfish, *Silurus meridionalis* Chen [J]. Marine and Freshwater Behaviour and physiology, 2005, 38: 191-198.
- [18] 陈娟, 谢小军. 大鳍鱮成鱼静止代谢率的初步研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2002, 27(6): 927-931.
- [19] 陈锦云, 曹振东, 谢小军. 温度对瓦氏黄颡鱼幼鱼静止代谢的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2003, 28(4): 618-621.
- [20] Guinea J, Fernandez F. Effect of feeding frequency, relative meal size and temperature on energy metabolism in *Sparus aurata*[J]. Aquaculture, 1997, 148: 125-142.
- [21] Peak M A, Buckley L J, Bengtson D A. Energy losses due to routine and feeding metabolism in young-of-year juvenile Atlantic cod *Gadus morhua*[J]. Can J Fish Aquatic Sci, 2003, 60: 929-937.
- [22] Secor S M, Diamond J. A vertebrate model of extreme physiological regulation[J]. Nature, 1998, 395: 659-622.

PANG Xu , CAO Zhen-dong , FU Shi-jian

(College of Life Science , Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior , Chongqing Key Laboratory of Animal Biology , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China)

Abstract : Specific dynamic action (SDA) refers to the increase in metabolic rate in response to feeding which has significantly ecological relevance in the researches of animal physiological ecology. The pre-feeding and postprandial oxygen consumption rate (V_{O_2}) in juvenile crucian carp are fed with 0 , 0.50% , 1.00% , 2.00% and 4.00% body mass meal size are measured at 25 °C. The V_{O_2} increases immediately after feeding and it rises to peaked at 2 h postfeeding. The peak V_{O_2} of 0.50% , 1.00% , 2.00% and 4.00% meal size groups are (96.15 ± 7.74) , (100.72 ± 7.29) , (117.72 ± 7.23) and (173.22 ± 14.20) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively. The peak V_{O_2} of fish fed with 4.00% meal size is significantly higher than those of others ($p < 0.05$). The SDA duration of fish fed with 0.50% , 1.00% , 2.00% and 4.00% meal size is (6.29 ± 0.68) , (7.14 ± 0.85) , (7.33 ± 1.23) and (9.20 ± 1.36) h , but there are no significant difference among all groups. The energy expended on SDA of fish fed with 0.50% , 1.00% , 2.00% and 4.00% meal size are (1.42 ± 0.18) , (1.58 ± 0.20) , (2.63 ± 0.60) and (5.33 ± 0.76) $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the value of 4.00% meal size group is significantly higher than those of other groups ($p < 0.05$). SDA coefficients of 0.50% , 1.00% , 2.00% and 4.00% meal size groups are (4.60 ± 0.52)% , (2.54 ± 0.34)% , (2.07 ± 0.45)% , (2.17 ± 0.30)% , and the coefficient of fish fed with 0.50% meal size is significantly higher than those of other groups ($p < 0.05$). The results demonstrate that the profile of the postprandial metabolic rate presents a typical ' triangle-shaped curve ' in juvenile crucian carp. It is evolutionarily adaptive to its active foraging mode and lower trophic level in its habitat.

Key words : meal size ; juvenile crucian carp ; oxygen consumption rate ; specific dynamic action

(责任编辑 方 兴)