

南方鲇的最大摄食率及其与 体重和温度的关系*

谢小军

孙儒泳

(西南师范大学生物系, 重庆, 630715)

(北京师范大学生物系)

Q959.483

摘 要

在实验室条件下对南方鲇幼鱼的最大摄食率进行了测定, 并探讨了体重和温度等生态因子的影响; 在同样的温度(25℃)条件下, 最大摄食率(R_{max} ; J/g·d)随体重(W ; g)的增加(8.72—127.4g)而下降, 变幅为345.7—267.2J/g·d; 二者的相关关系为:

$$R_{max} = 496.6W^{-0.1107}$$

当实验鱼的初始体重相近(41.69—53.39g)时, 在温度(T ; °C)分别为15, 20, 25, 27.5, 30, 32.5和35℃的条件下, 最大摄食率分别是109.1, 253.5, 305.8, 406.4, 426.4, 399.0和173.9J/g·d; 二者的相关关系为:

$$R_{max} = 2692 - 392.0T + 18.92T^2 - 0.2788T^3$$

通过求导推算极值的方法, 得到该种鱼的最佳食欲温度为29.15℃, 此时的最大摄食率估计为436.2J/g·d. 本文还推导出预测该种鱼在不同体重及不同温度下的最大摄食率模型为:

$$R_{max} = (4251 - 617.0T + 29.87T^2 - 0.4402T^3)W^{-0.1107}$$

关键词: 鱼类能量学, 最大摄食率, 耗氧量, 体重, 温度, 南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen).

鱼类能量学是鱼类生态学和鱼类生理学相交叉的一个研究方向, 它联系动物在各种环境条件下和各个生活周期中的生理学特点, 探讨鱼类获取食物能量的方式, 以及已获得的能量在个体内及在种群中的分配与利用的规律性, 是研究水体生态系统能流过程的一个必不可少的环节。鱼体的能流过程可以由下述模型来描述^[1]:

$$C = G + M + E$$

其中, C 为食物含能量, G 为生长积累能量, M 为代谢散热所消耗的能量, E 为排出废物(粪便及含氮排泄物)所损失的能量。鱼类能量学的中心问题就是阐明在各种生态条件下这些能量组分(C 、 G 、 M 和 E 等)之间定量关系。因此, 鱼体的食物摄入量(C), 即该能流过程的能量的输入, 直接影响体内能量的分配和利用, 各种生态因素往往通过影响能量的输入对生长及其他代谢过程发生作用。当鱼类在环境中可以自由取食时, 个体每日摄入的食物量称为最大耗饵量, 其单位体重的最大耗饵量称为最大摄食率。鱼体的最大摄食率反映了动物在一定生态条件下从环境中获取能量的能力。鱼类的摄食行为受温度、光周期、盐度、食物类型、鱼的体重以及鱼群的密度、活动和生理状况等因素的影响^[2-5]。大量的文献报道了鱼类在实验室条件下的最大摄食率及其与体重和水温的关系^[6-12]。但在国内有关报道尚少。作者对中国特有的重要经济鱼类南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen)的能量生态学进行了系统

* 曹振东先生协助制作实验设备, 熊良惠女士协助整理研究资料, 谨此表示衷心感谢。

本文于1991年12月12日收到, 修改稿于1992年5月2日收到。

的研究^[13-17]。本文是对有关该种鱼的最大耗饵量及最大摄食率的研究结果的整理和报道。

一、材料和方法

1. 实验鱼的来源与驯养

由嘉陵江澄江镇至磁器口江段收集捞网捕获的当年幼鱼,依体重大小分养于西南师范大学生物系实验鱼场水泥池中。池的容积为 1.44m^3 、每池放养20至100尾。将鲜活泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus* Cantor)切成碎块作饵料。驯养期间每两天喂一次,使鱼达饱足。

2. 实验鱼的驯化

驯化期间实验鱼采用单养,饵料按鱼体重的2%投喂,每天在18:00时投喂一次。驯化分两个阶段进行:

(1) 室外网箱驯化:在实验鱼池中驯养1个月以上的鱼群中选出符合实验设计要求重量的个体,分别放入网箱中单养。网箱为尼龙筛绢制成,容积为 $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 65\text{cm}$,上加网盖。网箱置于室外可自动控温的实验鱼池中(控温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$),以每天 2°C 的速率将水温调至实验设计温度。室外网箱驯化的时间为20d。

(2) 实验室条件下的驯化:由室外网箱驯化鱼中,选出摄食行为正常的个体,转入实验水族箱内的喂养笼中,水温控制在实验条件($\pm 0.2^\circ\text{C}$)。25 m^2 的实验室用2盏40W日光灯照明,光暗周期的时间比为14:10(h),瞬时开断。实验室驯化期为10d。

3. 实验设备

实验在室内可自动控温的水族箱中进行。每个水族箱的容积为847L($110\text{cm} \times 110\text{cm} \times 70\text{cm}$),箱内支架上放置3个圆桶形的喂养笼,水面高出笼的上端约5cm。笼的下端为格栅,可容许粪便通过(进入集粪瓶)而防止饵料块掉下;笼的上端有带孔的盖,可保持水流畅通而防止实验鱼外逃。笼的内空约为70L($\phi 47.5 \times 40\text{cm}$),每笼中喂养1尾鱼。

有关该实验设备的工作原理及详细结构已在该种鱼的生长能量学的研究论文中予以报道^[17]。

4. 实验操作方法

(1) 鱼体重量的测定 实验开始和结束时,均先让鱼饥饿24h,再测其体重。用拧干的湿润泡沫塑料裹住鱼体称重,以吸除鱼体表面水分,并防止鱼体在称重过程中活动。

(2) 饵料的投放和定量 除去鲜活泥鳅的头尾和内脏,将躯体的血污洗净,用泡沫塑料吸除表面水分,用小手术剪切割为同样重量($\pm 0.01\text{g}$)的饵料块。饵料块的具体重量随实验水温及鱼的体重变化而有不同。每次投饵量为实验鱼实际摄入量的2倍左右。每天投喂1次,18:00时投饵,20:00时收集残饵。由每尾实验鱼的投饵和残饵块数之差,乘以每块饵料的重量,得到其当日的耗饵量。

每个实验组在实验开始后第5天和结束前5天各称出20g饵料作为测定饵料含能量值的样品材料。取出的样品保存于 -20°C 的冰箱中,测定前在 60°C 下烘至恒重。采用日本 Shimadzu CA-3型自动氧弹测热仪进行能量值的测定,测定样品量为0.5—1.0g(干重)。由8份饵料样品测得的平均能量值为 $4971 \pm 39.9(\text{SE})\text{J/g}$ 。

(3) 实验分组 实验共分11个组,每个组的实验鱼尾数,平均初始体重和终体重,以及水温条件和实验天数见表1和表2。

5. 水质管理

饲养实验鱼采用处理后的自来水。自来水经沙缸过滤过, 蓄存于实验室内可自动控温的水泥贮水池中(控温精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)。水中投入百万分之十的硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)除去氯气, 并不断用空气泵向水中充气, 以保证溶氧达饱和状态。每日9:00换水, 各水族箱换水量约为1/4。

6. 数据处理

实验鱼的耗饵量($C, \text{J/d}$)和摄食率($R, \text{J/g}\cdot\text{d}$)的计算公式分别为:

$$C = \text{摄入食物的含能量} / \text{实验天数}$$

$$R = \text{摄入食物的含能量} / (W \times \text{实验天数})$$

其中:

$$W = (\text{初始体重} + \text{终体重}) / 2$$

采用计算机对所测数据进行统计处理和回归运算。

表 1 25℃条件下不同体重的南方鲇的最大耗饵量及最大摄食率

Table 1 The maximum food consumption(C_{max})and maximum ration levels(R_{max}) in the southern catfish with different body weights at temperature of 25℃

初始体重 Initial weight(g)		终体重* Final weight(g)		实验鱼 尾数 Number of fishes	最大耗饵量 C_{max} (J/d)		最大摄食率 R_{max} (J/g·d)		实验时间 Test time (d)
平均值 Mean	标准误 S.E.	平均值 Mean	标准误 S.E.		平均值 Mean	标准误 S.E.	平均值 Mean	标准误 S.E.	
8.72	0.09	20.43	0.74	3	5055	346.7	13.3	25	
25.09	0.17	48.35	5.58	3	13967	375.7	39.8	20	
45.48	0.22	88.40	1.56	3	20471	305.8	8.9	20	
76.27	2.23	154.9	9.0	3	35938	310.9	23.0	20	
127.4	3.86	260.1	14.5	6	51769	267.2	6.9	30	

表 2 初始体重相近的南方鲇在不同温度条件下的最大耗饵量及最大摄食率

Table 2 The maximum food consumption(C_{max})and maximum ration levels(R_{max}) in the southern catfish with the similar initial body weights at different temperatures(T)

温度 T (°C)	初始体重 Initial weight(g)		终体重* Final weight(g)		实验鱼 尾数 Number of fishes	最大耗饵量 C_{max} (J/d)		最大摄食率 R_{max} (J/g·d)	
	平均值 Mean	标准误 S.E.	平均值 Mean	标准误 S.E.		Mean	Mean	S.E.	
16	43.21	0.45	48.44	0.21	3	5040	109.1	2.4	
20	45.09	0.37	66.99	5.90	3	14207	253.5	33.2	
25	45.48	0.22	88.40	1.56	3	20471	305.8	8.9	
27.5	53.39	2.38	130.8	15.7	9	37419	406.4	18.1	
30	45.17	2.60	94.50	8.59	10	29778	426.4	13.3	
32.5	41.59	1.10	74.54	3.86	9	23169	369.0	16.5	
35	42.22	0.60	47.44	1.90	10	7798	173.9	21.6	

* 实验时间为20d. The test time is 20 days.

二、结 果

我们共取得了62尾鱼的实验数据, 计算了在25℃条件下不同体重组的平均最大耗饵量和平均最大摄食率(表1), 以及当体重相近时(41.59—53.39g), 不同水温条件下这两个指标各自的平均值(表2)。从结果可以看出, 在水温相同的条件下, 随着体重的上升, 最大耗饵量(C_{max})增加, 但最大摄食率(R_{max})却呈下降的趋势。通过回归运算, 得到二者与体重的

相关关系为:

$$C_{max} = 496.5W^{0.8883} (N = 18, r = 0.9915, R < 0.01), \quad (1)$$

$$R_{max} = 496.5W^{-0.1107} (N = 18, r = 0.6889, P < 0.01). \quad (2)$$

即最大耗饵量与体重间存在显著的双对数直线相关(图1)。

从表2可以看出,当初始体重相近时,水温对最大耗饵量和最大摄食率的影响都十分明显。最大摄食率是一个相对量,它的变化比最大耗饵量更能反映温度的作用。该种鱼的最大摄食率在30°C时达到最高值;当低于30°C时,温度对于最大摄食率有正效应;当高于30°C时,温度呈负效应。二者呈曲线相关(图2)。对最大摄食率与温度(T ; °C)的关系进行了回归运算,结果为:

$$R_{max} = 2692 - 392.0T + 18.92T^2 - 0.2788T^3 (N = 47, R = 0.8823, P < 0.01), \quad (3)$$

通过对曲线求导数计算极值的方法,求得当水温为29.15°C时, R_{max} 有极大值。因此,该温度可作为南方鲇的最佳食欲温度;在此条件下,南方鲇的最大摄食率为436.2J/g·d。

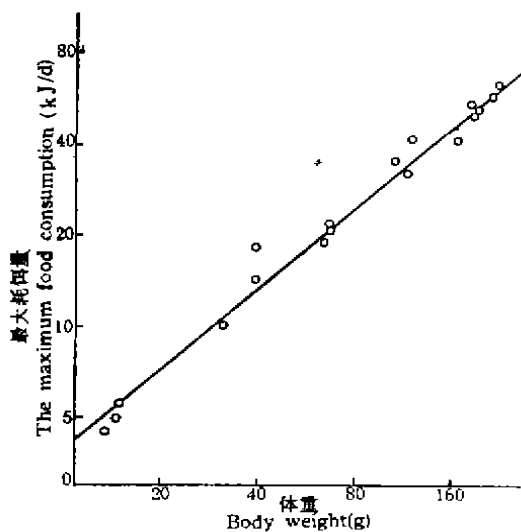


图1 南方鲇的最大耗饵量与体重的关系
Fig.1 The correlation between the maximum food consumption and body weight in the southern catfish

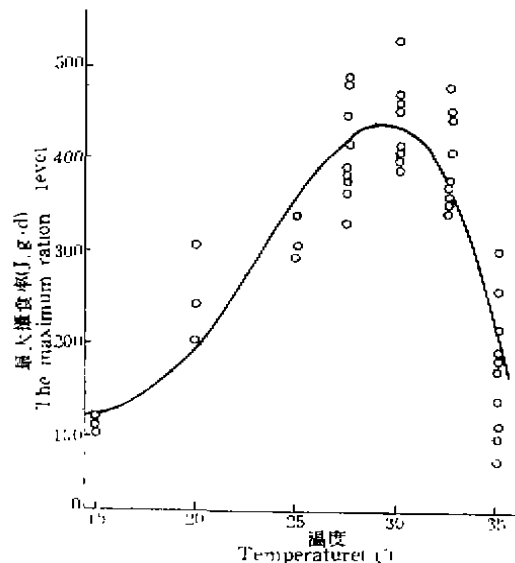


图2 南方鲇的最大摄食率与温度的关系
Fig.2 The correlation between the maximum ration level and temperature in the southern catfish

三、讨 论

1. 最大耗饵量与体重的关系

最大耗饵量及最大摄食率与体重一般为幂函数关系,即: $C_{max} = aW^b$ 或 $R_{max} = aW^{b'}$, 其中 $b = b' + 1$ 。文献报道的 b 值变化的范围为0.40—1.52, 大多数在0.7—0.9之间^[18]。我们得到南方鲇的 b 值为0.889, 在此范围之内。该种鱼的 b 值小于1 (b' 小于0), 表明其最大摄食率随着体重的上升而下降。Ursin运用类似于静止代谢的“体表面积法则”来解释这一现象, 他认为动物的耗饵量由消化道的吸收表面积所决定, 如果身体各器官的生长是等比的,

则耗饵量与体重的 $2/3$ 次方呈比例, 即 b 值为 0.7 左右^[19]。但目前很多学者认为用“体表面积法则”来解释能量代谢现象过于简单化。Cui & Liu提出, 对于最大耗饵量来说, 内源性控制比消化道表面积所起的作用更为重要^[18]。我们曾对南方鲇的静止代谢进行了研究, 发现其体重指数的变幅为 $0.748-0.940$ ^[14]。本文的结果表明, 该种鱼的最大耗饵量的体重指数(0.889)也在此范围之内。文献报道各种鱼静止代谢的体重指数的范围从接近 0.4 到超过 1.0 ^[20-22], 也与最大耗饵量的 b 值范围接近。静止代谢率的高低可从总体上反映鱼体对能量消耗的强度, 而能量消耗的强度应当反馈于动物食欲调控机制, 才可能调节自身能量收支的平衡。较幼小的南方鲇代谢强度较高^[14], 其食欲相对较旺盛, 所以会出现随体重的上升其最大摄食率下降的现象。因此, 由最大耗饵量及最大摄食率所反映的动物的食欲与其静止代谢之间的联系, 是值得进一步深入探讨的问题。

2. 最大摄食率与温度的关系

Elliott提出最大摄食率与温度之间存在指数函数关系($R = ae^{BT}$)^[9,10], 而Cui & Wootton则采用幂函数($R = aT^B$)来表达二者之间的关系^[7]。这两种表达式都是单调函数, 它们所描述的温度作用于最大摄食率的效应只能总是正的(当 $B > 0$)或总是负的(当 $B < 0$), 即随着温度的上升, 最大摄食率不断上升, 或不断下降, 而不能描述具有峰值的曲线。但Elliott同时发现, 当温度为 13.6°C 时, 欧洲鳟(*Salmo trutta*)的最大摄食率出现峰值; 在 13.6°C 以下, 最大摄食率随温度的上升而增长, 在 13.6°C 以上, 随温度的上升而下降。因此在 $3.8-21.6^\circ\text{C}$ 的实验范围内, 需要 $3-4$ 条(具有不同参数的)单调曲线才能较好地拟合最大摄食率与温度的关系^[10]。孙儒泳等在罗非鱼上也观察到与*Salmo trutta*相似的现象^[23]。Brett还提出, 在接近鱼类适应温度范围的上限时, 最大摄食率会急剧下降^[8]。因此, 采用具有峰值的曲线来描述最大摄食率与温度之间的关系更为恰当。我们采用了 3 次多项式函数对南方鲇的有关数据进行拟合, 发现相关极为显著(方程 3)。并通过求导推算极值的方法, 得到了南方鲇的最佳食欲温度为 29.15°C 。值得指出的是, 比较表 2 各温度组的初始体重和终体重, 发现接近最佳食欲温度条件下(30°C)的摄食率虽然最高, 但生长量不及在较低温度(27.5°C)条件下的, 27.5°C 时摄入量较低而生长量却更高。因此最佳食欲温度显然不是最适生长温度, 二者之间的关系, 我们将在进一步的研究中进行探讨。

3. 南方鲇的最大摄食率模型

Elliott发现, 当温度变幅为 $3.8-21.7^\circ\text{C}$ 时, 欧洲鳟的最大耗饵量的体重指数只在 0.753 至 0.767 范围内变化^[24], 这反映了该指数受温度的影响很小。Cui & Wootton提出欧洲鳟(*Phoxinus phoxinus*)的最大耗饵量模型为 $C_{max} = aW^bT^3$, 该模型所预测的结果可以与实验数据较好地吻合^[7], 这表明把体重指数(b)当作一个不随温度变化的常量是可行的。

假定南方鲇的该指数不随温度变化, 由方程(2), 其最大摄食率的体重指数(b')为 -0.1107 。那么, 在某一恒定温度条件下:

$$R_{max} = aW^{-0.1107} \quad (4)$$

其中 a 为单位重鱼的最大摄食率, 当温度改变时, 它随温度变化的方式可以由方程(3)描述, 但方程(3)并非在单位体重条件下, 所以:

$$a = a'(2692 - 392.0T + 18.92T^2 - 0.2788T^3)$$

$$\text{即: } R_{max} = a'(2692 - 392.0T + 18.92T^2 - 0.2788T^3)W^{-0.1107} \quad (5)$$

方程(3)的资料来自47尾初始体重相近的鱼,它们在实验期间的平均体重(W)为 $61.95 \pm 6.17(\text{SE})\text{g}$ 。因此,当方程(5)的 W 值为61.95时,它应与方程(3)等值,那么:

$$a' \cdot 61.95^{-0.1107} = 1$$

得: $a' = 1.579$ (6)

将(6)式代入方程(5),得:

$$R_{\max} = (4251 - 617.0T + 29.87T^2 - 0.4402T^3)W^{-0.1107} \quad (7)$$

在前文的讨论1中曾提到,最大耗饵量的体重指数: $b = b' + 1$, 可得出:

$$C_{\max} = (4251 - 617.0T + 29.87T^2 - 0.4402T^3)W^{0.8893} \quad (8)$$

方程(7)和(8)可分别作为预测南方鲇在不同体重并不同温度条件下的最大摄食率及最大耗饵量的模型。

参 考 文 献

- [1] Warren C.F. & Davis G.E., Laboratory studies on the feeding, bioenergetics, and growth of fish. In: *The biological basis of freshwater fish production* (Gerking, S.D. eds). Oxford, Blackwell Sci., Publ., 1967, 175—214.
- [2] Braaten, B.R., Bioenergetics: a review on methodology. In: *Finfish nutrition and fishfood technology* (Haliver, J.E. & Tiews, K. ed.), 1979, Vol. I, 461—504.
- [3] Brett J.R., Environmental factors and growth. In: *Fish physiology* (Hoar, W.S., Randall, D.J. & Brett, J.R. eds) Academic Press, New York, 1979, Vol. 8, 599—675.
- [4] Fänge R. & Grove, D.J., Digestion. In: *Fish Physiology* (Hoar W.S., Randall D.J. & Brett J.R., eds), New York, Academic Press, 1979, Vol. VIII, 161—260.
- [5] Pandian T.J. & Vivekanandan E., Energetics of feeding and digestion. In: *Fish energetics, new perspectives* (Tytler P. & Calow P. eds), Croom Helm, London, 1985, 99—124.
- [6] Brett J.R., Satiation time, appetite, and maximum food intake of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *J. Fish. Res. Bd Can.*, 1971, 28:409—416.
- [7] Cui Y. & Wootton R.J., Bioenergetics of growth of a cyprinid, *Phoxinus phoxinus*: the effect of ration, temperature and body size on food consumption, faecal production and nitrogenous excretion. *J. Fish. Biol.*, 1988, 33:431—443.
- [8] Dunbrack R.L., Feeding of juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*): maximum appetite (sustained feeding rate) (appetite return) and body size. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1988, 45:1191—1196.
- [9] Elliott J.M., Weight of food and time required to satiate brown trout, *Salmo trutta* L. *Freshwat. Biol.*, 1975, 5:61—64.
- [10] Elliott J.M., Number of meals in a day, maximum weight of food consumed in a day, and maximum rate of feeding for brown trout, *Salmo trutta*. *Freshwat. Biol.*, 1975, 5:287—303.
- [11] Fonds M. & Saksena, V.P., The daily food intake of young soles (*Solea solea* L.) in relation to their size and the water temperature. *Actes de colloques du C.N.E.X.O.*, 1977, 4:61—58.
- [12] Wootton R.J., Allen, J.R.M. & Cole, S.J., Effect of body weight and temperature on the maximum daily food consumption of *Gasterosteus aculeatus* L. and *Phoxinus phoxinus* (L.): selecting an appropriate model. *J. Fish. Biol.*, 1980, 17:696—705.
- [13] 谢小军、孙儒泳, 南方鲇幼鱼鱼体的含能量及化学组成. 北京师范大学学报(自然科学版), 1990, (3):63—68.
- [14] Xie, X.J. & Sun, R., The bioenergetics of the southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen). I. Resting metabolic rate as a function of body weight and temperature. *Physiol. Zool.*, 1990, 63:1181—1195.
- [15] 谢小军、孙儒泳, 南方鲇的能量利用对策. 生态学研究进展, 中国科学技术出版社, 1991, 101—102.
- [16] 谢小军、孙儒泳, 南方鲇的日总代谢率及特殊动力作用的能量消耗. 水生生物学报, 1992, 16(3):
- [17] Xie, X.J. & Sun, R., The bioenergetics of the southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen). Growth rate as a function of body weight and temperature. *J. Fish Biol.*, 1992, 40: 719—730
- [18] Cui, Y. & Liu, J., Comparison of energy budget among six teleosts. I. food consumption, faecal production and nitrogenous excretion. *Comp. Biochem. Physiol.*, 1990, 96A:163—171.
- [19] Ursin, E., A mathematical model of some aspects of fish growth, respiration, and mortality. *J. Fish. Res. Bd Can.*, 1967, 24:2355—2453.

- [20] Beamish, F. W. H., Respiration of fishes with special emphasis on standard oxygen consumption. I. Influence of weight and temperature on respiration of several species, *Can. J. Zool.*, 1964, 42: 177—194.
- [21] Hoss D. E., Energy requirements of a population of pinfish *Lagodon rhomboides* (Linnaeus), *Ecology*, 1974, 55: 848—855.
- [22] Pierce R. J., Wissing T. E. & Megrey B. A., Respiratory metabolism of gizzard shad, *Trans. Am. Fish. Soc.*, 1981, 110: 51—55.
- [23] 孙露泳, 张玉书, 温度对罗非鱼生长的影响. *生态学报*, 1982, 2(2): 181—188.
- [24] Elliott J. M., The energetics of feeding, metabolism and growth of brown trout (*Salmo trutta* L.) in relation to body weight, water temperature and ration size, *J. Anim. Ecol.*, 1976, 45: 923—948.

MAXIMUM RATION LEVEL IN THE SOUTHERN CATFISH (*SILURUS MERIDIONALIS* CHEN) IN RELATION TO BODY WEIGHT AND TEMPERATURE

Xie Xiao-Jun

(Department of Biology, Southwest China Teachers University, Chongqing, 630715)

Sun Ru-Yong

(Department of Biology, Beijing Normal University)

The maximum food consumptions in the juvenile catfish imposed on different conditions were measured in the laboratory, and the maximum ration levels were calculated. At temperature of 25°C, the ration level decreased with weight increasing from 8.72 to 127.4g and ranged from 346.7 to 267.2J/g.d. The correlation between the maximum level (R_{max} ; J/g.d) and body weight (W ; g) can be expressed as follow:

$$R_{max} = 496.5W^{-0.1107}$$

For the fish with the similar initial body weight of 41.59—53.39g, the maximum levels were 109.1, 253.5, 305.8, 406.4, 426.4, 399.0, and 173.9J/g.d at temperature of 15, 20, 25, 27.5, 30, 32.5 and 35°C, respectively. The correlation between the level and temperature (T ; °C) can be expressed as follow:

$$R_{max} = 2692 - 392.0T + 18.92T^2 - 0.2788T^3$$

By calculating the derivative of the expression to obtain the extreme value, the optimal temperature at which the species may have the maximum appetite of 436.2J/g.d can be estimated as 29.15°C

The model for prediction of the maximum ration level in the fish imposed on different body weights and temperatures was developed as follow:

$$R_{max} = (4251 - 617.0T + 29.87T^2 - 0.4402T^3)W^{-0.1107}$$

Key words: fish energetics, maximum ration level, food consumption, body weight, temperature, *Silurus meridionalis* Chen.