动物科学

DOI:10.11721/cqnuj20250407

不同摄食水平鱼类消化活动对游泳能力和最大代谢的影响*

唐 燕,张永飞,付世建
(重庆师范大学 进化生理与行为学实验室 淡水鱼类资源保护与利用重庆市重点实验室
动物生物学重庆市高校重点实验室,重庆 401331)

摘要:为考察不同摄食水平鱼类的消化活动对游泳能力和最大代谢的影响,在水温为 25 ℃条件下,测定了鲇形目(Siluriformes)斑点叉尾鮰(*Ictalurus punctatus*)、埃及胡子鲇(*Clarias gariepinus*),鲤形目(Cypriniformes)大鳞鲃(*Barbus capito*)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)和鲈形目(Perciformes)蓝阿里(*Sciaenochromis fryeri*)、雪鲷(*Chindongo socolofi* '*albino*')共 6 种鱼类幼鱼在空腹(对照组)和摄食后消化(摄食组)这 2 种状态下的匀加速最大游泳速度(U_{cat})和最大代谢率(MMR)。结果显示:1) 在种间水平上,消化活动期间埃及胡子鲇和青鱼的 U_{cat} 低于其他 4 种实验鱼,数据差异具有统计学意义($p<0.05$);在种内水平上,斑点叉尾鮰和埃及胡子鲇摄食组与对照组相比 U_{cat} 均有统计学意义上的下降($p<0.05$)。2) 在种间水平上,消化活动期间埃及胡子鲇的 MMR 低于其余 5 种实验鱼,差异具有统计学意义($p<0.05$);在种内水平上,6 种鱼类的摄食组与对照组相比 MMR 均无统计学意义上的差异。3) 摄食水平与 U_{cat} 变化率和 MMR 变化率的相关性没有统计学意义。研究结果提示不同摄食水平鱼类消化活动对游泳能力和 MMR 的影响差异可能与这些鱼类在栖息地生境、消化能力、摄食代谢率、代谢策略等方面有所不同有关。

关键词:摄食水平;匀加速最大游泳速度;最大代谢率;鲇形目;鲤形目;鲈形目
中图分类号:Q175 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-6693(2025)04-0042-09

能量代谢对鱼类的一切生命活动至关重要[1]。摄食是鱼类获取能量的重要途径,鱼类将这些能量用于维持游泳、捕食、逃避天敌等一系列生理和行为活动。游泳分为疲劳游泳、持续游泳和爆发游泳[2]。其中,匀加速最大游泳速度(constant acceleration test speed,U_{cat})可以有效衡量鱼类爆发游泳能力[3],并与鱼类能否成功躲避捕食者或在急流中游泳密切相关[4]。通常用代谢率高低来评价鱼类在游泳过程对能量消耗的大小[5]。最大代谢率(maximum metabolic rate,MMR)是鱼类最大的代谢能量功率输出,反映了鱼类的有氧代谢能力[6],也是衡量鱼类代谢能力的重要指标。研究发现,鱼类的 U_{cat} 与临界游泳速度(critical swimming speed,U_{crit})这一持续游泳能力指标高度关联,且受 MMR 的限制[7]。

在自然界中,鱼类摄食水平(一般以单次摄食量占体质量的百分比计)的种间差异通常与食物资源的波动、不均匀分布以及物种生存策略有关。高摄食水平(20%)南方鲇(*Silurus meridionalis*)在摄食后 U_{crit} 下降了 33%,而一般摄食水平(4%)的金鱼(*Carassius auratus*)在摄食后 U_{crit} 下降了 12%[8];低摄食水平(1.70%)的丁鳜(*Tinca tinca*)在摄食后 MMR 上升幅度较小,而摄食水平为 2.57%的锦鲫(*Carassius auratus*)在摄食后 MMR 明显上升。因此,鱼类摄食水平可能与它的游泳能力和最大代谢之间存在一定关联。同时,研究表明在摄食后的运动中,鱼类的能量分配将面临消化和运动的权衡[9-11]。目前,有关摄食对鱼类最大代谢和运动能力影响的研究较为丰富[12-14],但关于不同鱼类的摄食水平与它们的 U_{cat} 和 MMR 对消化活动的响应情况之间的关联性研究较为有限。因此,为了考察不同摄食水平鱼类消化活动对游泳能力和最大代谢的影响,进而探究摄食水平与鱼类游泳能力和最大代谢变化率(即对消化活动的响应)的关联,本研究选取了 6 种鱼类幼鱼(表 1),分别测定它们在空腹和摄食后消化这 2 种状态下的 U_{cat} 和 MMR,以此了解鱼类在摄食后游泳和代谢能力的变化及内在关联,期望为鱼类生理生态学研究提供更多参考资料,也为渔业资源的可持续性利用和管理提供理论依据。

* **收稿日期**:2025-01-14 **修回日期**:2025-02-20 **网络出版时间**:2025-05-19T09:01
资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 32370509)
第一作者简介:唐燕,女,研究方向为鱼类生理生态,E-mail:1037040551@qq.com;**通信作者简介**:付世建,男,教授,博士生导师,E-mail:shijianfu9@hotmail.com
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250507.1635.021

表 1　实验鱼名称、食性及栖息行为

Tab. 1　Names, feeding habits, and habitat behavior of experimental fishes

目名	物种名	食性	栖息行为
鲇形目（Siluriformes）	斑点叉尾鮰（*Ictalurus punctatus*）	肉食性	生活于池塘、湖泊等静水水体底层，夜间摄食[15-17]
	埃及胡子鲇（*Clarias gariepinus*）	杂食性	喜聚集于池底、洞穴或阴暗处[17-18]
鲤形目（Cypriniformes）	大鳞鲃（*Barbus capito*）	杂食性	生活于水体中、下层[19-21]
	青鱼（*Mylopharyngodon piceus*）	肉食性	生活于静水生境中，觅食频繁[22-23]
鲈形目（Perciformes）	蓝阿里（*Sciaenochromis fryeri*）	杂食性偏肉食性	生活于中、下层水域[24-26]
	雪鲷（*Chindongo socolofi* ‘*albino*’）	杂食性偏植食性	生活于水体中、上层[25-27]

1　材料与方法

1.1　实验鱼的来源与驯养

在 6 种实验鱼中，斑点叉尾鮰、埃及胡子鲇、大鳞鲃和青鱼幼鱼购自重庆永川区养殖场，蓝阿里和雪鲷幼鱼购自重庆市马氏水族馆。所有实验鱼运回实验室后，先用质量分数为 1%～2%的氯化钠溶液消毒 10 min，随后放入实验室自净化循环温控系统中驯养 14 d。驯养水体为曝气充分的自来水，水温控制在(25±1) ℃，每日换水量为驯养水体体积的 30%～50%以保持水体清洁与水质稳定。光周期为 12 h 光照∶12 h 黑暗。驯养期间用氧气泵向系统中持续充入氧气，使溶解氧质量浓度保持在 7 mg·L^{-1} 以上。每日 9∶00 用商业饲料（通威漂浮性饵料）饱食投喂；投喂 30 min 后用虹吸管清理水体中的食物残渣和鱼类粪便，以防止其中过高浓度的氨氮对实验鱼造成不良影响。

1.2　实验方案

驯养阶段结束后，随机挑选出大小合适且外观健康的实验鱼（表 2）；随后将这些实验鱼随机平均分为对照组和摄食组，其中对照组实验鱼禁食 48 h，而摄食组实验鱼在 U_{cat} 和 MMR 测定前进行 30 min 充分摄食[14]并计算摄食水平；然后对实验鱼的上述指标进行测定。U_{cat} 和 MMR 测定期间的水温、溶解氧质量浓度等环境条件与驯养期间保持一致。

在计算摄食组实验鱼的摄食水平时，首先在投喂前用分析天平称量饲料质量，且因饲料含有一定水分，故在投喂前按照干质量进行校正，即将饲料在烘箱中烘干至质量恒定，再测定质量，记为 m_1（单位：g）；然后在实验鱼摄食 30 min 后用手抄网捞出水体中的剩余饲料并在烘箱中烘干至质量恒定，再测定质量，记为 m_2（单位：g）。由 m_1 减去 m_2 即可得摄食组实验鱼的单次总摄食量，再除以实验鱼总体质量（单位：g）后所得数值以百分数形式表示即为摄食组实验鱼的摄食水平。

1.3　游泳能力和 MMR 的测定

采用 Blazka 式鱼类游泳测定仪进行鱼类游泳测定[28]。将该装置连接电脑，由电脑控制程序控制水流速度。具体操作如下：将实验鱼转移至鱼类游泳测定装置中以鱼类 1 倍体长（单位：cm）计算得到的流速（单位：cm·s^{-1}）适应 1 h，然后以 0.167 cm·s^{-2} 的加速度持续均匀增加流速，直至实验鱼力竭，此时记下脉冲值，换算为水流速度即 U_{cat} 测定值[2]。力竭状态的判定标准为：实验鱼因不能抵抗水流而停留在游泳管末端筛板处且身体呈弯曲状，且此种状态持续 20 s[29]。

MMR 为力竭运动恢复过程中耗氧量的最大值。实验鱼在经过上述游泳测定实验后处于力竭状态，此时立即将它转移至密闭式呼吸代谢测定仪中，用美国哈希公司生产的哈希 HQ30d 型溶解氧测定仪测定呼吸室中的溶解氧质量浓度，每尾实验鱼连续测定 5 min，每 10 s 记录 1 次测定值。在进行转移的过程中大约有 10 s 的空气暴露，如此可以更好地激发实验鱼的 MMR。然后用溶解氧质量浓度和测量时间进行线性方程拟合，求出拟合曲线的斜率。MMR 的计算公式如下[30]：

$$R_M = 3\,600 \times S \times \frac{V}{m},$$

其中：R_M 为实验鱼的 MMR（单位：mg·kg^{-1}·h^{-1}）；S 为溶解氧质量浓度和测量时间线性拟合曲线的斜率（单

位:mg·L^{-1}·s^{-1});V 为密闭呼吸室的体积,本研究中为 0.25 L,m 为实验鱼的体质量(单位:kg);3 600 为时间单位换算系数,即 1 h=3 600 s。

表 2 实验鱼的体型及摄食水平

Tab. 2 The body size and meal size of experimental fishes

物种名	处理组别	样本量/尾	体长/cm	体质量/g	摄食水平
斑点叉尾鮰(*I. punctatus*)	对照组	12	6.90±0.19	4.75±0.27	0
	摄食组	12	6.98±0.17	4.92±0.36	9.84%
埃及胡子鲇(*C. gariepinus*)	对照组	12	8.23±0.17	4.89±0.31	0
	摄食组	12	8.04±0.17	5.57±0.38	3.07%
大鳞鲃(*Barbus capito*)	对照组	12	5.84±0.05	2.49±0.08	0
	摄食组	12	6.24±0.11	3.14±0.19	4.61%
青鱼(*M. piceus*)	对照组	12	5.28±0.06	2.44±0.08	0
	摄食组	12	5.18±0.05	2.49±0.07	4.57%
蓝阿里(*S. fryeri*)	对照组	8	5.44±0.07	4.16±0.15	0
	摄食组	9	5.23±0.10	3.78±0.21	3.37%
雪鲷(*C. socolofi 'albino'*)	对照组	10	4.93±0.10	3.75±0.29	0
	摄食组	10	5.07±0.04	4.34±0.14	2.26%

注:体长和体质量均以"平均值±标准误"形式表示;2 组蓝阿里的样本量出现差异的原因在于原对照组中 1 尾实验鱼在后续实验过程中因尾鳍受伤并产生应激反应,故被舍弃。

1.4 数据处理与统计分析

所有实验数据均用 Excel 2019 进行常规分析和处理,所得结果以"平均值±标准误"形式表示。用 SPSS 17.0 软件对实验数据进行统计分析。首先对所有实验数据采用 Shapiro-Wilk 法和 Levene's test 分别进行正态分布检验和方差齐性检验。若实验数据不符合正态分布且方差不具齐性则使用非参数检验对它们的种间或组间数据进行分析,摄食水平与 U_{cat} 变化率及 MMR 变化率的相关性则采用 Spearman 相关分析;若实验数据符合正态分布且方差具有齐性则就物种种类和消化活动对 U_{cat} 及 MMR 的影响进行双因素协方差分析,摄食水平与 U_{cat} 变化率及及 MMR 变化率的相关性则采用 Pearson 相关分析。当 $p<0.05$ 时,统计结果具有统计学意义。

2 结果

2.1 消化活动对 U_{cat} 的影响

表 3 显示:协变量体长、消化活动和物种种类的交互作用对 U_{cat} 没有统计学意义上的影响;消化活动和物种种类对 U_{cat} 的影响均具有统计学意义($p<0.05$)。

从种间水平上看,在摄食后的消化活动期间埃及胡子鲇、青鱼的 U_{cat} 与其他 4 种鱼类相比均更低,且数据差异均有统计学意义($p<0.05$);斑点叉尾鮰的 U_{cat} 与大鳞鲃、蓝阿里和雪鲷相比也均更低,且数据差异均有统计学意义($p<0.05$)。从种内水平上看,与对照组相比,在摄食后的消化活动期间斑点叉尾鮰和埃及胡子鲇的 U_{cat} 均有统计学意义上的下降($p<0.05$),降幅分别为 11.68%和 13.38%;大鳞鲃摄食组与对照组相比 U_{cat} 上升了 5.06%,青鱼、蓝阿里和雪鲷摄食组与对照组相比 U_{cat} 分别下降了 9.74%、2.82%和 2.60%,但上述组间数据差异均无统计学意义(图 1a)。

2.2 消化活动对 MMR 的影响

由表 3 可知:协变量体质量、消化活动和物种种类对 MMR 的影响均具有统计学意义($p<0.05$);消化活动和物种种类的交互作用对 MMR 的影响没有统计学意义。

从种间水平上看,埃及胡子鲇 MMR 在摄食后的消化活动期间均低于其他 5 种鱼类,数据差异均有统计学意义($p<0.05$)。从种内水平上看,与对照组相比,斑点叉尾鮰、大鳞鲃、青鱼、蓝阿里和雪鲷摄食组的 MMR 分

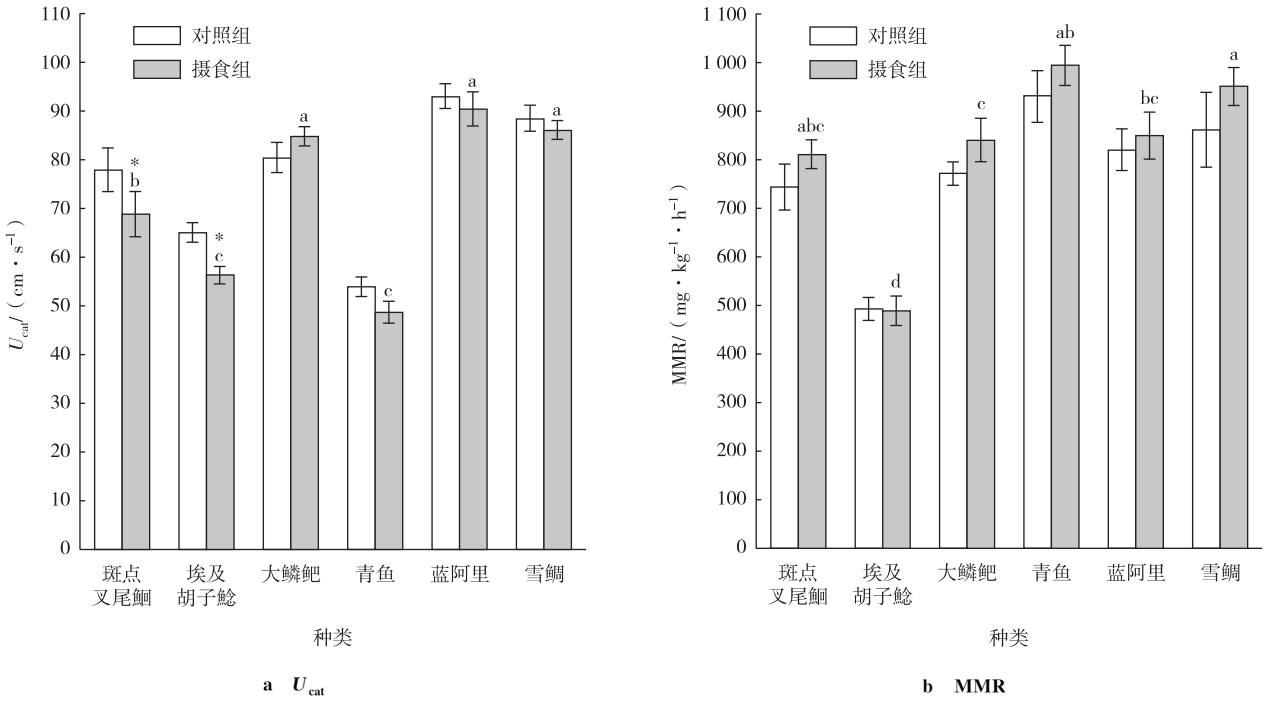
别上升了 9.10%、8.91%、6.88%、3.57%和 10.31%，埃及胡子鲇摄食组 MMR 下降了 0.71%，但上述组间数据差异均没有统计学意义(图 1b)。

表 3　消化活动和物种种类对 U_{cat} 和 MMR 影响的双因素协方差分析

Tab. 3　The two-way analysis of covariance of the effect of digestion and species on U_{cat} and MMR

影响因素	df	U_{cat}		MMR	
		F	p	F	p
协变量	1	0.918	0.340	9.923	0.002*
消化活动	1	5.365	0.022*	7.366	0.008*
物种种类	5	51.585	<0.001*	16.905	<0.001*
物种种类×消化活动	5	1.308	0.265	0.432	0.826

注：对于 U_{cat}，体长为协变量；对于 MMR，体质量为协变量；“*”表示统计结果在 $p<0.05$ 水平具有统计学意义。



a　U_{cat}　　b　MMR

注：不同字母表示不同鱼种摄食组的数据差异具有统计学意义($p<0.05$)，“*”表示同一鱼种对照组和摄食组的数据差异具有统计学意义($p<0.05$)。

图 1　消化活动对 6 种鱼类 U_{cat} 和 MMR 的影响

Fig. 1　The effect of digestion on U_{cat} and MMR of six different fish species

2.3　摄食水平与 U_{cat} 变化率和 MMR 变化率的相关性分析结果

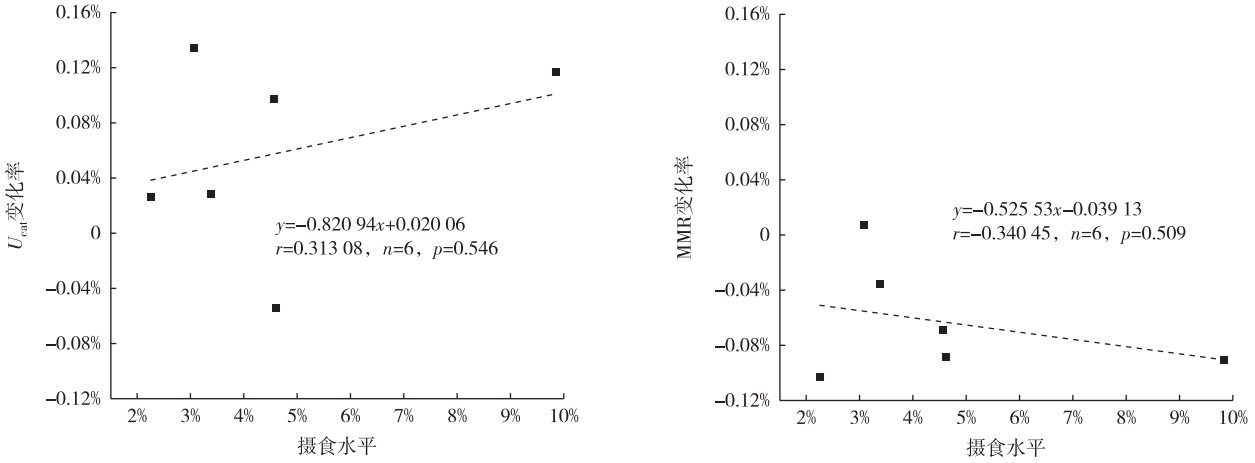
由图 2 可知，摄食水平与 U_{cat} 变化率和 MMR 变化率的相关性均没有统计学意义。

3　讨论

3.1　消化活动期间 U_{cat} 和 MMR 的种间差异

本研究结果显示，在摄食后的消化活动期间，肉食性鱼类斑点叉尾鮰、青鱼以及杂食性偏肉食性鱼类埃及胡子鲇的 U_{cat} 明显比其余 3 种杂食性鱼类的 U_{cat} 更低。斑点叉尾鮰、青鱼和埃及胡子鲇长期生活于静水环境中[17,22]；它们作为处于食物链上层的捕食者，在自然水域的生存活动中几乎不会遭遇天敌，从而未在自然进化过程中获得极强的游泳能力。另外，斑点叉尾鮰和埃及胡子鲇都属于昼伏夜出型鱼类，白天一般潜伏于水体底层阴暗处[17]，活跃度较低；而且它们的体型也不适于游泳运动：斑点叉尾鮰身体前部较为宽肥，腹部平直；埃及胡子鲇头大尾小，前半部扁平，后半部侧扁[17]。对于青鱼而言，虽然它的体形适宜于游泳运动，但是它通常生活于水

体底层且食物也多是游动缓慢的水生动物[31],所以它的游泳能力也不甚突出。而其余3种杂食性鱼类则并未处于食物链的上层,常生活于流水环境中[20,26],活跃度较高,体形也是适宜游泳的纺锤形或梭形,因此它们的游泳能力均较强;其中大鳞鲃为洄游性鱼类[20],在繁殖期间更需要强且持久的游泳运动能力才能保证自身逆流洄游至淡水河流中进行产卵。



a U_{cat} 变化率　　b MMR 变化率

图2 6种鱼类摄食水平与 U_{cat} 或 MMR 变化率的相关性

Fig. 2 The correlation between meal size of six different fish species and the rate of change of U_{cat} or MMR

研究者常常将MMR估计为鱼类的最大摄氧量,并且MMR受到氧气和有氧底物的同化、运输、动员和利用的限制[32],因此它可以有效反映鱼类的心鳃系统能力。在本研究中,埃及胡子鲇在摄食后的消化活动期间MMR明显低于其余5种鱼类。这是因为埃及胡子鲇常在摄食后于水底阴暗处潜伏不动、活跃度低,从而可以保证自身在摄食后将更多的能量用于生长和繁殖,故而这种生活史策略使得它的摄氧量低于其他鱼类[17]。然而,青鱼的 U_{cat} 虽低,但MMR却相对较高。这可能是因为青鱼和鲤(*Cyprinus carpio*)等静水、底栖生活的鲤科鱼类属于极度耐低氧物种[31],鳃的摄氧能力较强,较高的MMR可能是它们低氧耐受能力进化的副产物。

3.2 消化活动对 U_{cat} 和 MMR 的影响

在本研究中,斑点叉尾鮰和埃及胡子鲇摄食组相较于对照组而言 U_{cat} 明显下降,但MMR则没有明显变化。这与以往研究结果一致,例如奇努克鲑鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)等部分肉食性鱼类在摄食后进行运动时,运动能力会出现不同程度的下降而MMR并无明显变化[8,10,33]。这些鱼类在摄食后的能量分配策略一般是将有限的能量优先分配给消化活动,以游泳能力下降为代价维持消化活动,属于鱼类代谢模式类型中的消化优先模式(digestion-priority mode)[8]。另外,斑点叉尾鮰生活于池塘、湖泊等静水底部,埃及胡子鲇原产于非洲尼罗河流域,适应于相对静止或流速较慢的水体。一般而言,静水环境的鱼类在自然生存时更倾向于具有高消化性能、强缺氧耐受性和低有氧代谢能力,在代谢模式上更多为消化优先模式[11,34],这与本研究结果相符。

然而,对于同为生活在静水环境中的青鱼而言,本研究发现它的摄食组和对照组的 U_{cat} 和MMR均无明显差异,并未采取与斑点叉尾鮰和埃及胡子鲇相似的能量分配策略。这一方面可能与青鱼的觅食策略有关,而另一方面则可能是在本研究设置的摄食时间内青鱼并未达到饱食状态。有研究表明,青鱼在25 ℃常氧条件(溶解氧水平为饱和水平的75%以上)下的测定结果显示它的代谢模式为添加模式(additivity model),即可同时维持消化和运动的功率竞争模式[8,35];这一结果与本研究结果不同,可能与2个研究中青鱼的实际摄食水平存在差异有关。另有研究发现,当摄食水平从1/3饱食增加至饱食时,青鱼的游泳速度相对于空腹处理的对照组而言先上升后下降[36]。由此可见,青鱼活动水平随食物丰度的上升呈钟型曲线变化:当环境中食物丰度较低时,鱼类会减少游泳活动保存能量;当食物丰度中等时,鱼类会增加游泳活动以增加摄食;当食物丰度较高时,鱼类降低活动节约能量的同时也不会影响摄食[36-37]。因此,在实验处理过程中,青鱼的实际摄食水平可能会影响该鱼种的

觅食策略，进而影响它的游泳能力和 MMR。

此外本研究还发现，大鳞鲃、蓝阿里和雪鲷的摄食组 U_{cat} 和 MMR 相较于对照组均没有明显变化，它们在代谢模式上采取了运动优先模式（locomotion-priority mode）[8]，即摄食后以牺牲消化能力为代价确保游泳能力。大鳞鲃的这一能量分配策略可能与它逆流洄游繁殖的习性有关，因为该鱼种在洄游途中需要长时间维持游泳运动。而蓝阿里和雪鲷采取了运动优先模式则可能是因为两者摄食水平较低、需要频繁地进行觅食活动，因而用于维持消化的能量较少；并且这 2 种鱼类原产地为非洲马拉维湖，该湖泊的水位会不定时消长，且湖泊周围有河流注入，这种流水生境使得它们更倾向于运动优先模式。

3.3　摄食水平与 U_{cat} 变化率和 MMR 变化率的相关性

本研究结果显示，摄食水平和 U_{cat} 变化率及 MMR 变化率没有统计学意义上的关联。这可能与鱼类摄食代谢峰值（peak metabolic rate，PMR）有关[8]：通常 PMR 相对于 MMR 越小，摄食对鱼类运动能力的影响也会越弱。瓦氏黄颡鱼（*Pelteobagrus vachelli*）和岩原鲤（*Procypris rabaudi*）的 PMR 相对于它们的 MMR 都较小[38-39]，在最大摄食水平下瓦氏黄颡鱼游泳速度和代谢水平并无明显下降[8,40]，摄食组和禁食组岩原鲤幼鱼的代谢水平也未表现出明显差异[39]，这可能表明摄食并没有影响瓦氏黄颡鱼和岩原鲤幼鱼的运动代谢能力。而南方鲇在最大摄食水平下的 PMR 和 MMR 相近[41]，摄食导致该鱼种游泳速度和代谢水平明显下降，运动能力降低[8,40]。因此在后续的研究中，可以测定本研究各实验鱼有关摄食代谢指标以进一步分析其中原因。

此外，鱼类自身的消化能力也可能会影响实验结果。对于消化代谢能力较低的鱼类而言，摄食水平对运动能力的影响会更小[8,36]。草鱼（*Ctenopharyngodon idella*）的消化能力较弱，最大摄食水平下，摄食代谢峰值相对于静止代谢上升 50%左右，仅占代谢总范围的 10%以下，也因此对该鱼种游泳的影响较小[8]。在本研究中，实验鱼摄食后 2 h 内即完成测试，其中高摄食水平鱼类的摄食代谢率尚未达到峰值，这也可能是摄食水平对 U_{cat} 削弱和对 MMR 提升有限的重要原因。除此之外，上述结果的出现也可能与实验动物在实验室条件下无法达到理想的饱食状态或摄食水平偏低有关，例如有研究发现大鲵（*Andrias davidianus*）幼体暴发游泳速度并没有受到摄食水平（1%～10%）的明显影响[9]；而南方鲇的 U_{crit} 在低摄食水平（2%～8%）下没有明显变化，在较高摄食水平（12%～20%）下却明显下降[8]。

总之，摄食后的消化活动对不同摄食水平鱼类的游泳能力和 MMR 有一定影响，但鱼类摄食水平和 U_{cat} 及 MMR 变化率的相关性并未被本研究验证。这可能由于鱼类在摄食方面形成了相应的适应性特征[32,42]，不同鱼类的生活习性以及运动偏好和能力各异，采取的代谢策略不同，它们的物质转化和能量代谢表现出差异[43]；低消化能力和 PMR 相对于 MMR 越小时，摄食对运动的影响较小。

参考文献：

[1] 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.

[2] REIDY S P, KERR S R, NELSON J A. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod[J]. The Journal of Experimental Biology, 2000, 203(2): 347-357.

[3] 于洋，谢明原. 鱼类游泳能力评价指标及其测定方法研究现状[J]. 农业与技术，2021，41(19)：116-118.
YU Y, XIE M Y. Research status of evaluation index and determination method of fish swimming ability[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(19): 116-118.

[4] HOU Q M, FU S J, HUANG T J, et al. Effects of aerobic exercise training on the growth, swimming performance, antipredation ability and immune parameters of juvenile rock carp (*Procypris rabaudi*)[J]. Animals, 2022, 12(3): 257.

[5] BRETT J R, GLASS N R. Metabolic rates and critical swimming speeds of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to size and temperature[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1973, 30(3): 379-387.

[6] NORIN T, CLARK T D. Measurement and relevance of maximum metabolic rate in fishes[J]. Journal of Fish Biology, 2016, 88(1): 122-151.

[7] WANG J W, CAO Z D, FU S J. A comparison of constant acceleration swimming speeds when acceleration rates are different with critical swimming speeds in Chinese bream under two oxygen tensions[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2016, 42(5): 1453-1461.

[8] 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.

[9] 侯起淼,付世建,黄悌基,等.摄食水平对大鲵幼体游泳能力和力竭运动后代谢的影响[J].水生生物学报,2023,47(12):2028-2036.
HOU Q M, FU S J, HUANG T J, et al. Meal size on swimming performance and excess post-exercise oxygen consumption in juvenile *Andrias davidianus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(12): 2028-2036.

[10] THORARENSEN H, FARRELL A P. Postprandial intestinal blood flow, metabolic rates, and exercise in Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*)[J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2006, 79(4): 688-694.

[11] FU S J, DONG Y W, KILLEN S S. Aerobic scope in fishes with different lifestyles and across habitats: trade-offs among hypoxia tolerance, swimming performance and digestion[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2022, 272: 111277.

[12] NIE L J, CAO Z D, FU S J. Digesting or swimming? Integration of the postprandial metabolism, behavior and locomotion in a frequently foraging fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2017, 204: 205-210.

[13] NIE L J, FU S J. Metabolic, behavioral, and locomotive effects of feeding in five cyprinids with different habitat preferences[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2017, 43(6): 1531-1542.

[14] 黄可人,张永飞,刘蒨莹,等.消化活动与短期饥饿对不同摄食习性鱼类最大代谢的影响[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2023,40(5):49-54.
HUANG K R, ZHANG Y F, LIU Q Y, et al. Effects of digestion and short-term starvation on the maximum metabolism rate of fish with different feeding habits[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2023, 40(5): 49-54.

[15] 付勇浩,孙毓,陈畔畔.河南省斑点叉尾鮰苗种培育技术[J].河南水产,2024(4):5-6.
FU Y H, SUN Y, CHEN P P. Cultivation techniques for spotted catfish seedlings in Henan Province[J]. Henan Fisheries, 2024(4): 5-6.

[16] 丁德明.斑点叉尾(鮰)[J].湖南农业,2013(11):25.
DING D M. *Ictalurus punctatus*[J]. Hunan Agriculture, 2013(11): 25.

[17] 王茂林,樊祥国,丁仁祥,等.鳜 鲇 罗非鱼 鳗鲡 牛蛙养殖技术[M].北京:中国农业出版社,1998:40-81.
WANG M L, FAN X G, DING R X, et al. Aquaculture techniques for mandarin fish, catfish, tilapia, eel, and bullfrog[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 40-81.

[18] 蒋卫亮,王卓铎,张海涛,等.胡子鲶和革胡子鲶的生物学特性、养殖病害及饲料研究进展[J].江西水产科技,2024(4):65-68.
JIANG W L, WANG Z D, ZHANG H T, et al. Research progress on biological characteristics, breeding diseases and feed of *Silurus meridionalis* and *Clarias lazera*[J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2024(4): 65-68.

[19] 蔺玉华,耿龙武,王信海,等.池塘驯养大鳞鲃某些生物学特性研究[J].天津师范大学学报(自然科学版),2009,29(4):72-75.
LIN Y H, GENG L W, WANG X H, et al. Some biological characteristics of *Barbus capito* bred in ponds[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2009, 29(4): 72-75.

[20] 蔡灵,杨志江,孙彩娟,等.大鳞鲃亲鱼培育及人工繁殖技术[J].河北渔业,2015(12):52-53.
CAI L, YANG Z J, SUN C J, et al. Cultivation and artificial propagation techniques of parent fish of *Silurus japonicus*[J]. Hebei Fisheries, 2015(12): 52-53.

[21] 朱瑞,吴莉芳,李良,等.大鳞鲃鱼的研究现状及养殖发展前景[J].河南农业科学,2019,48(10):1-5.
ZHU R, WU L F, LI L, et al. Research status and farming development prospects of *Barbus capito*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(10): 1-5.

[22] 李思忠.黄河鱼类志[M].青岛:中国海洋大学出版社,2017:193-194.
LI S Z. Fishes of the yellow river[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2017: 193-194.

[23] 徐桂珍.怎样高产养殖鲢、鳙、草、青鱼[M].合肥:安徽科学技术出版社,2000:3.
XU G Z. How to breed silver carp, bighead carp, grass carp, and black carp with high yield[M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2000: 3.

[24] GERLAI R. Mate choice and hybridization in Lake Malawi cichlids, *Sciaenochromis fryeri* and *Cynotilapia afra*[J]. Ethology, 2007, 113(7): 673-685.

[25] 王婷.养热带鱼 & 水草 你学得会[M].福州:福建科学技术出版社,2017:35.
WANG T. You can learn how to raise tropical fish & aquatic plants[M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing

House，2017：35.

[26] 赵浩翔，龚文奥，黄悌基，等. 群体规模对慈鲷背景颜色偏好和集群行为的影响[J]. 水生生物学报，2025，49(3)：136-144.
ZHAO H X，GONG W A，HUANG T J，et al. Influence of group size on background color preference and shoaling behavior of cichlids[J]. Acta Hydrobiologica Sinica，2025，49(3)：136-144.

[27] 李明，曹宇，董辉，等. 新编淡水鱼饲养百科[M]. 长春：吉林科学技术出版社，2010：57-59.
LI M，CAO Y，DONG H，et al. Newly compiled freshwater fish breeding encyclopedia[M]. Changchun：Jilin Science & Technology Publishing House，2010：57-59.

[28] 周龙艳，李秀明，付世建. 中华倒刺鲃和胭脂鱼游泳行为、应激和免疫能力对短期禁食的响应[J]. 生态学报，2022，42(17)：7288-7295.
ZHOU L Y，LI X M，FU S J. The swimming behavior，stress and immune responses of juvenile qingbo and Chinese sucker subjected to short-term fasting[J]. Acta Ecologica Sinica，2022，42(17)：7288-7295.

[29] 曾令清，彭韩柳依，王健伟，等. 饥饿对南方鲇幼鱼游泳能力个体变异和重复性的影响[J]. 水生生物学报，2014，38(5)：883-890.
ZENG L Q，PENG H L Y，WANG J W，et al. The effects of food deprivation on individual variation and repeatability in swimming performance of juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica，2014，38(5)：883-890.

[30] ZENG L Q，FU C，FU S J. The effects of temperature and food availability on growth，flexibility in metabolic rates and their relationships in juvenile common carp[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A：Molecular & Integrative Physiology，2018，217：26-34.

[31] 郭全刚，刘生. 第一篇：青鱼篇[J]. 中国钓鱼，2024(3)：6-7.
GUO Q G，LIU S. The first article：black carp[J]. China Angling，2024(3)：6-7.

[32] FU S J，XIE X J，CAO Z D. Effect of fasting on resting metabolic rate and postprandial metabolic response in *Silurus meridionalis*[J]. Journal of Fish Biology，2005，67(1)：279-285.

[33] ALSOP D，WOOD C. The interactive effects of feeding and exercise on oxygen consumption，swimming performance and protein usage in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. The Journal of Experimental Biology，1997，200(17)：2337-2346.

[34] ZHANG Y F，LUO Y L，HUANG K R，et al. Constraints of digestion on swimming performance and stress tolerance vary with habitat in freshwater fish species[J]. Integrative Zoology，2025，20(1)：88-107.

[35] 聂利娟. 五种鲤科鱼类代谢模式的种间比较[D]. 重庆：重庆师范大学，2016.
NIE L J. An interspecific comparison on metabolic models in five cyprinid fish species[D]. Chongqing：Chongqing Normal University，2016.

[36] 杨严鸥. 饲料质量和摄食水平对不同食性鱼类生长和活动的影响[D]. 武汉：华中农业大学，2003.
YANG Y O. Effect of diet quality and ration level on growth and activity of fishes with different feeding habits[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2003.

[37] WARE D M. Power and evolutionary fitness of teleosts[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences，1982，39(1)：3-13.

[38] 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.
LI X M，CAO Z D，FU S J. Effect of meal size on postprandial metabolic response in *Pelteobagrus* vachelli[J]. Chinese Journal of Zoology，2009，44(6)：10-16.

[39] 李秀明，陈昌瑞，吴川，等. 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[J]. 水产学报，2012，36(11)：1731-1738.
LI X M，CHEN C R，WU C，et al. Effect of meal size on postprandial metabolic response and excess post-exercise oxygen consumption in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi*)[J]. Journal of Fisheries of China，2012，36(11)：1731-1738.

[40] 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.

[41] FU S J，CAO Z D，PENG J L. Effect of meal size on postprandial metabolic response in Chinese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus)[J]. Journal of Comparative Physiology B，2006，176(5)：489-495.

[42] FU S J，XIE X J，CAO Z D. Effect of feeding level and feeding frequency on specific dynamic action in *Silurus meridionalis*[J]. Journal of Fish Biology，2005，67(1)：171-181.

[43] KATZ S L，SYME D A，SHADWICK R E. Enhanced power in yellowfin tuna[J]. Nature，2001，410(6830)：770-771.

Animal Sciences

Effects of Digestion on the Swimming Performance and Maximum Metabolic Rate of Fish with Different Meal Sizes

TANG Yan, ZHANG Yongfei, FU Shijian

(Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Key Laboratory of Freshwater Fish Resources Conservation and Utilization, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To investigate the effects of digestion on swimming performance and maximum metabolism of fish with different meal sizes, the constant acceleration test speed (U_{cat}) and maximum metabolic rate (MMR) were measured in juvenile fish of six species at a water temperature of 25 ℃. The six species studied were: *Ictalurus punctatus* and *Clarias gariepinus* (the order Siluriformes); *Barbus capito* and *Mylopharyngodon piceus* (the order Cypriniformes); and *Sciaenochromis fryeri* and *Chindongo socolofi* '*albino*' (the order Perciformes). Measurements were taken under two states: the fasting state (control group) and post-prandial state (fed group). The results showed that: 1) At the interspecific level, the U_{cat} of *C. gariepinus* and *M. piceus* was lower than that of the other four species during digestion, and the difference was statistically significant ($p < 0.05$); at the intraspecies level, the U_{cat} of *I. punctatus* and *C. gariepinus* in the fed group decreased significantly compared with the control group ($p < 0.05$). 2) At the interspecific level, the MMR of *C. gariepinus* was lower than that of the remaining five species during digestion, and the difference was statistically significant ($p < 0.05$); at the intraspecies level, there was no significant difference in MMR between the fed and the control groups of the six fish species. 3) There was no statistically significant correlation between meal size and the rate of change in U_{cat} and MMR. The results suggest that the differences in the effects of digestion on the swimming performance and maximum metabolic rate of fish with different meal sizes may stem from differences in habitat conditions, digestive capabilities, feeding metabolic rates and metabolic strategies among different fish species.

Keywords: meal size; constant acceleration test speed; maximum metabolic rate; Siluriformes; Cypriniformes; Perciformes

(责任编辑 方 兴)