

代谢范围对中华倒刺鲃空间位置和群体行为的影响*

王春花¹, 毕瑾秋¹, 凌 鸿¹, 蒲德永², 曾令清¹

(1. 重庆师范大学 进化生理与行为学实验室 动物生物学重庆市重点实验室, 重庆 401331;

2. 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)

摘要:为考察代谢范围(aerobic scope, AS)对中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)空间位置和群体行为的影响,在(25.4±0.2)℃条件下,测定该鱼种的代谢率,并计算AS。结果显示:随着摄食量的增加,中华倒刺鲃耗氧率明显增加,预测剩余AS与摄食量呈统计学意义上的负相关关系($p<0.001$);摄食时间段对鱼群中个体的平均空间位置和1号位占比无统计学意义上的影响,但AS对鱼群中个体的这2个参数有统计学意义上的影响($p<0.001$);与摄食前相比,摄食一段时间后群体的个体间距离有统计学意义上的增加($p<0.05$)而群体极性有统计学意义上的降低($p<0.05$)。上述结果提示AS对中华倒刺鲃个体的空间位置有明显影响,低AS个体占据群体领先地位的时间更长,摄食后群体中个体成员的凝聚力 and 群体协调性均有所降低。

关键词:代谢范围;空间位置;群体行为;中华倒刺鲃

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)05-0035-08

在自然界中,不少鱼类以集群生活为主,群体内个体之间的互动让它们具有高度同步的速度和极性^[1]。通常情况下,位于鱼群前部的鱼更易获得食物,它们在摄食以后会移动到群体后半部,这是因为食物的消化会降低鱼类个体的有氧运动能力进而影响它在群体前部的领先位置。摄食能力和运动能力之间的权衡通常被认为可能会消除动物的个体特征,能够在较短时间内决定动物个体对空间位置偏好,而这也决定了个体在群体中的空间位置。这种空间位置的变化被认为与动物机体扣除消化能量成本后所剩余的代谢范围(aerobic scope, AS)密切相关^[1-2]。随着群体规模的增加,整个群体行为的功能性可能会得到改善,这是因为群体运动使鱼类个体能够利用群体成员产生的涡流来降低运动的能量消耗成本^[3-4]。群体中能量需求和有氧运动能力的个体差异被证明会影响动物个体在群体中的空间位置,例如:鱼群中有氧运动能力强的个体因为自身承受运动阻力的能力更强,通常会占据鱼群前部的空间位置^[5-7]。鱼类在群体中的空间位置会影响它获取食物的难度和对食物的摄入量,占据群体的前部位置通常意味着会有更丰富的摄食选择,这对于提高鱼类生存适合度具有重要意义。

不同的鱼种类之间的标准代谢率(standard metabolic rate, SMR)通常存在较大的种间差异。SMR是指鱼类处于静止且非消化状态下维持自身生命活动的最低能量消耗率^[8-9]。最大代谢率(maximum metabolic rate, MMR)是指鱼类能量代谢达到的最高水平。AS是MMR与SMR的差值,它代表鱼类除维持基本生理功能外,可用于其他有氧生理活动的最大代谢潜能^[10]。当鱼类个体摄食后,它的能量代谢率会明显增加,这被称为特殊动力作用(specific dynamic action, SDA)。SDA进一步压缩了鱼类用于其他生理活动的代谢范围,通常用餐后的耗氧率来表征SDA^[11-12]。有证据表明,摄食量的高低对鱼类SDA有明显的影响^[13]。摄食后,由于食物代谢和运动的共同作用,鱼类的AS通常都会降低,进而导致个体的生理功能和各类行为发生改变^[14]。有研究表明,摄食能力与个体的AS存在相关关系,AS的大小被认为可能会限制SDA的反应,如食物消化所需时间^[15]等。此外,被机体的其他生理活动如摄食、消化、运动等所占据后的AS被称为剩余AS。

* 收稿日期:2023-10-15 修回日期:2024-03-28 网络出版时间:2024-11-11T10:14

资助项目:重庆市自然科学基金项目(No. csct2021jcyj-msxmX0124);国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 31300341);淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室开放课题项目(No. FFRD-2022-01);重庆市教育委员会科学技术研究计划项目(No. KJQN201900540, No. KJQN202000539)

第一作者简介:王春花,女,研究方向为鱼类生理生态与行为学,E-mail:2118403109@qq.com;通信作者:曾令清,男,副教授,博士,E-mail:lingqingzeng@cqu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20241108.1737.005

中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)是一种底栖性的鲤科(Cyprinidae)鱼类,性情活泼,喜集群且具有较强的适应能力。本研究测定了中华倒刺鲃幼鱼在不同摄食水平下的 SDA、在摄食前后不同 AS 个体的空间位置及群体行为,由此进一步探究 AS 对鱼类群体中个体成员空间位置和群体行为的影响,以便为进一步理解 AS 在鱼类群体行为中的生态功能以及探究能量代谢与行为之间的关联提供理论依据和支持。

1 材料与方 法

1.1 实验鱼的来源及驯化

用于实验的中华倒刺鲃幼鱼购自重庆市永川区鱼类水产养殖基地。在实验开始前,首先将实验鱼放入实验室内 3 个长×宽×高均为 1.2 m×0.55 m×0.55 m、盛有 250 L 充分曝气的自来水的循环控温水槽中驯化 60 d 以上。每日 9:00 和 21:00 分别用红线虫(*Limnodrilus hoffmeisteri*)对实验鱼饱足投喂 1 次。每次投喂前 5 min 关闭循环水泵和氧气泵,避免实验鱼在摄食过程中受到循环水流和氧气泵噪音的影响。待鱼摄食 30 min 后,及时清除剩余的饵料和粪便。循环系统中的水体供氧由氧气泵完成,水体日常溶氧质量浓度维持在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,使用加热棒将水温控制在 $(25.4 \pm 0.2) ^\circ\text{C}$,光周期设定为光照和黑暗各 12 h。为维持循环控温水槽中的正常水位和 水体环境,每 2 d 更换 1 次驯养水体,单次换水量不超过驯养水体总体积的 10%。

1.2 实验设计

驯化结束后,挑选 90 尾健康状况良好、体质量为 $(8.12 \pm 0.05) \text{ g}$ 、体长为 $(7.70 \pm 0.02) \text{ cm}$ 的实验鱼进行实验。对实验鱼禁食 24 h 后,分别测定它们的 SDA、SMR 和 MMR,最后拍摄群体行为。根据 SMR 和 MMR 的测定值分别计算出单尾鱼的 AS,并根据 AS 的数值进行排序,进而在排序的两端即最高 AS 和最低 AS 选取实验鱼组成高 AS 组和低 AS 组,样本量均为 6 尾。随后,对各组中的 6 尾实验鱼分别植入不同颜色的可视荧光标记(visible implant fluorescence, VIF)。为了避免实验鱼产生应激反应,在标记时用含 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MS-222 和 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠的麻醉剂将鱼麻醉 3~5 min^[16-17]。然后将 VIF 注射到每尾鱼的头部至背鳍之间的鳞片下,最后在鱼注射处体表涂抹阿莫西林,以降低伤口处的感染风险。

1.3 实验方法

1.3.1 能量代谢测定

采用 4 台实验室自制的流水式呼吸代谢仪测定实验鱼的 SMR。每台代谢仪共有 11 个呼吸室,其中 1 个作为空白室而另外 10 个作为实验呼吸室^[18-19]。在实验开始第 1 日的 20:00 将禁食 1 d 的 40 尾实验鱼转移到呼吸室中隔夜适应 12 h,随后在第 2 日的 8:00 至第 3 日的 8:00 用美国哈希公司生产的 HQ_{30d} 溶氧仪每隔 1 h 测定 1 次每个呼吸室中的水体流速和耗氧量。SMR 测定完成后,将单尾鱼从呼吸室中移至游泳管中测定 MMR,给游泳管均匀加速使鱼逆水流游泳,待实验鱼力竭即无法稳定游泳且停留在游泳管后方筛板 10 s 以上后,将实验鱼从游泳管中取出置于空气中暴露 30 s,然后将鱼置于间歇式呼吸代谢室中进行恢复代谢的测定。SDA 与 SMR 的测定原理相同:将禁食 1 d 的 40 尾实验鱼在测定前 1 日的 20:00 置于呼吸室中适应 12 h,第 2 日在呼吸室中投喂红线虫,且保证投喂操作在 15~20 min 完成;每隔 1 h 测定 1 次每个呼吸室的水体流速和耗氧量,累计测定 20 h。根据实验鱼体质量的增加量及剩余红线虫的质量,计算获得实验鱼的实际摄食水平(即被摄食的红线虫质量(单位:g)占实验鱼体质量(单位:g)的百分比)。本研究中,实验鱼的摄食水平分别为 2.54%、3.76%、5.07%、5.91%、7.68% 和 10.25%。实验期间,为了减少环境噪声对实验鱼生理代谢的影响,实验室环境应尽可能地保持安静。

1.3.2 群体行为的测定

采用行为观测装置来观察实验鱼的群体行为,为了提供稳定的拍摄背景和消除外部潜在的可视线索对实验鱼的影响,装置的四周安装有 1.5 m 高的纯绿色布帘^[17,20]。实验鱼的群体行为拍摄由 1 个放置在观测装置正上方且与电脑连接的罗技 C920 型高清摄像头完成。拍摄开始时,先将每组 6 尾实验鱼从代谢测定呼吸室中转移至行为观测装置的游泳区中适应 1 h。适应结束后,先拍摄鱼群的摄食前群体行为 20 min,随后,通过注射器连接的细管持续向观测装置中注入 60 条红线虫,整个过程在 15~20 min 完成,同时拍摄记录 20 min 以获得摄食期间的实验鱼行为视频。最后,在摄食后 1、2、3 h 分别对鱼群的群体行为进行拍摄,以获得摄食后的实验鱼行为

视频。每组实验鱼的行为拍摄均严格按照上述操作进行,每次群体行为拍摄完成后,使用充分曝气的自来水对实验装置进行清洗,并更换实验水体,以消除信息素累积对实验结果的影响。

1.3.3 参数提取及视频分析

本研究中评价群体特征和个体行为的实验参数为最近邻距离(nearest neighbor distance)、个体间距离(inter-individual distance)、群体极性(group polarization)^[20-21]以及 1 号位占比。

1) 最近邻距离。该参数指的是鱼群中某一个体与其他所有个体距离中的最小距离,用来衡量群体凝聚力^[20-21],它的具体计算公式为:

$$D_{NN}(t) = \min_{i \neq j} \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2},$$

其中: $D_{NN}(t)$ 表示 t 时刻最近邻距离, $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ 以及 $y_i(t)$ 、 $y_j(t)$ 分别表示第 i 、 j 尾鱼在 t 时刻的横、纵坐标,上述参数的单位均为 cm。

2) 个体间距离。该参数指的是鱼群内所有个体之间的平均距离,用来衡量群体凝聚力^[20-21],它的具体计算公式为:

$$D_{II}(t) = \sum_{i \neq j}^n \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} / n,$$

其中: $D_{II}(t)$ 表示 t 时刻个体间距离(单位:cm), n 表示群体内个体总数量(单位:尾),本研究中 n 值为 6。

3) 群体极性。该参数是指鱼群中个体排列的整齐度,取值范围为 0~1。在鱼群中当所有个体都向绝对统一的方向排列时,群体极性值为 1;如果鱼群中的所有个体都沿着相反的方向且完全抵消的方式而排列时,群体极性值为 0。群体极性值越高,鱼群的协调性则越强^[20-21]。群体极性的计算公式为:

$$P(t) = \left| \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_i(t) \right| / n,$$

其中: $P(t)$ 表示 t 时刻的群体极性, $\mathbf{v}_i(t)$ 为第 i 尾鱼在单位时间内的移动矢量,而移动方向则是从 $t-1$ 时刻的坐标到 t 时刻的坐标。

4) 1 号位占比。该参数指单尾实验鱼在 1 号位的时间占群体总时间的比例。在本研究中,实验鱼在群体中的空间位置从群体首端至末端依次被定义为 1~6 号位。

将拍摄的视频通过“格式工厂”转码软件转码成帧率为 15 帧·s⁻¹的“.avi”格式,视频编码格式选择 MJPEG。将转码后的视频通过 ImageJ 软件分析,以获取每尾鱼的坐标值^[17,20]。

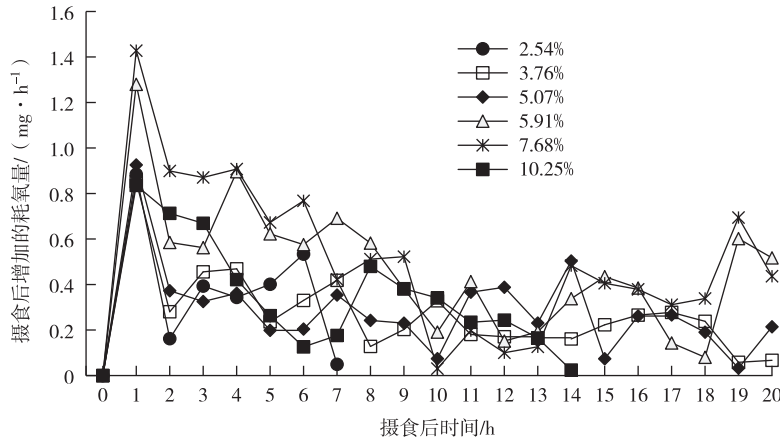
1.4 数据处理与统计分析

所有原始实验数据均使用 Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件进行计算与统计分析,各参数数据均以“平均值±标准误”形式来表示。采用双因素方差分析考察不同摄食时间段和 AS 对鱼群平均空间位置和 1 号位占比的影响,若结果存在统计学上的差异,再采用独立样本 t 检验比较组间和组内不同摄食时间的个体间距离、最近邻距离和极性的差异。采用 Pearson 相关分析考察预测剩余 AS 和摄食量(实验鱼摄食红线虫的条数)之间以及平均空间位置和摄食量之间的相关性。所有统计分析结果具有统计学意义的判定标准均为 $p < 0.05$ 。

2 结果

2.1 AS 对中华倒刺鲃个体空间位置的影响

根据摄食代谢的结果,可以得到中华倒刺鲃幼鱼个体在摄食后增加的耗氧率和 SDA 曲线的变化,从而得知实验鱼个体摄食后增加的耗氧率达到峰值的平均时间(图 1)。根据 SDA 的估算,可以预测实验过程中剩余的 AS。图 2、图 3 显示:预测剩余 AS 与摄食量之间、摄食量和平均空间位置之间均呈统计学意义上的负相关关系($p < 0.001$)。由表 1 可知:摄食时间段对鱼群中个体的平均空间位置和 1 号位占比没有统计学意义上的影响而 AS 对这 2 个参数有统计学意义上的影响($p < 0.001$)。在适应阶段、餐后 1 h、餐后 3 h 等 3 个时间段内,高 AS 个体的平均空间位置高于低 AS 个体的平均空间位置,两者差异具有统计学意义($p < 0.05$)。在适应阶段、投喂阶段、餐后 2 h、餐后 3 h 等不同时间段内,低 AS 个体的 1 号位占比明显低于高 AS 个体的 1 号位占比,两者差异具有统计学意义($p < 0.05$)。



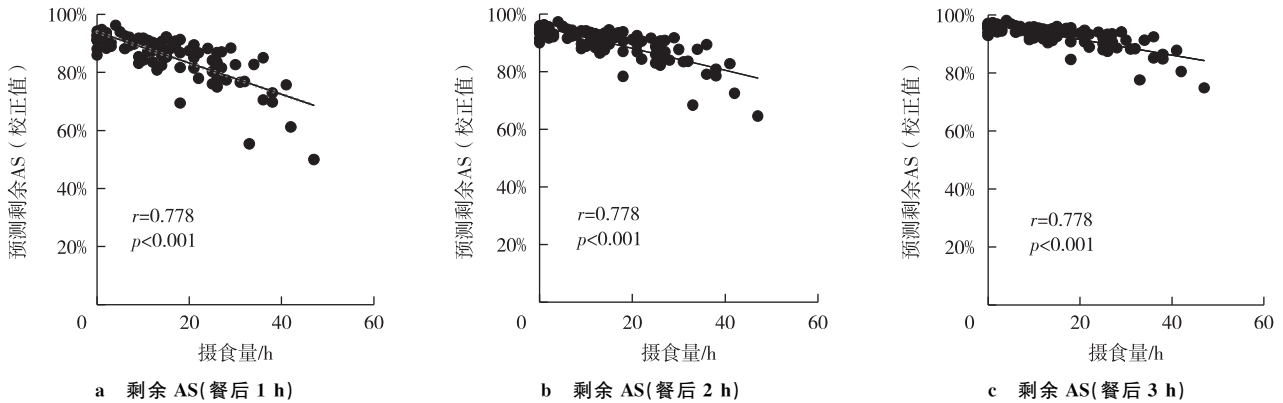
注:图例中的数值表示实验鱼的摄食水平,即被摄食的红线虫质量(单位:g)占实验鱼体质量(单位:g)的百分比。

图 1 摄食水平对中华倒刺鲃摄食后耗氧量的影响

Fig. 1 Effect of feeding level on the post-feeding oxygen consumption rate of *S. sinensis*

2.2 不同摄食时间段对中华倒刺鲃群体特征的影响

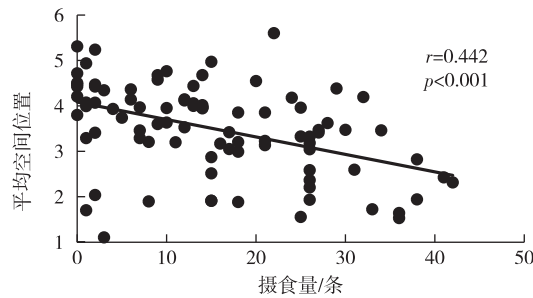
图 5a 显示,鱼群的个体间距离在餐后 2、3 h 明显高于在投喂阶段,差异具有统计学意义($p < 0.05$)。然而,鱼群的最近邻距离在实验的各摄食时间段均无统计学意义上的差异(图 5b)。此外,适应阶段的鱼群群体极性高于投喂阶段和餐后 1、2、3 h 的鱼群群体极性;而鱼群群体极性在投喂阶段明显低于在餐后 1 h(图 5c),两者差异具有统计学意义($p < 0.05$)。



注:摄食量指实验鱼摄食红线虫的条数。

图 2 中华倒刺鲃的预测剩余 AS 与摄食量的关系

Fig. 2 Relationship between predicted residual aerobic scope and food intake in *S. sinensis*



注:纵坐标数值表示实验鱼个体在鱼群中空间位置(1(首端)~6(末端)号位)的平均值,下同。

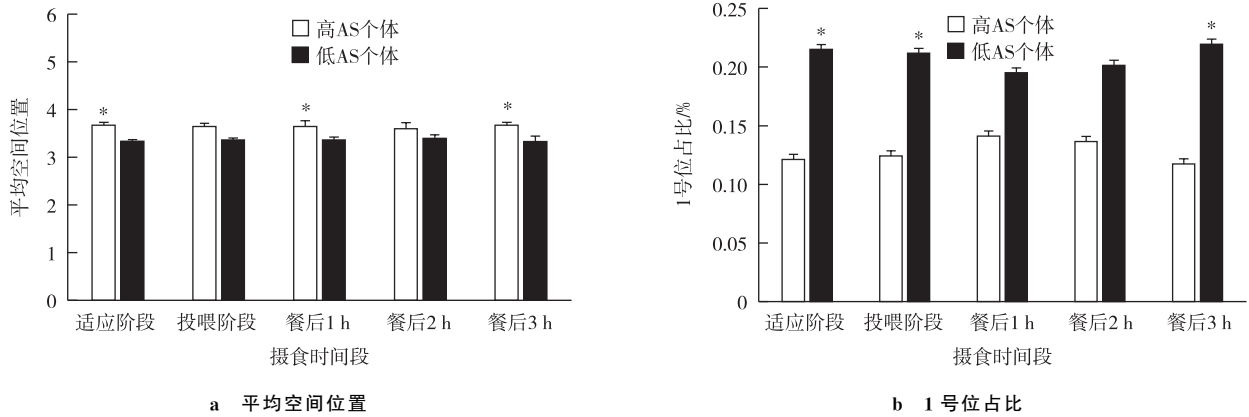
图 3 中华倒刺鲃摄食量与平均空间位置的关系

Fig. 3 Relationship between food intake and mean spatial location of *S. sinensis*

表 1 摄食时间段和 AS 对鱼群中个体空间位置影响

Tab. 1 Effect of feeding time and aerobic scope on the spatial location of individuals in the fish population

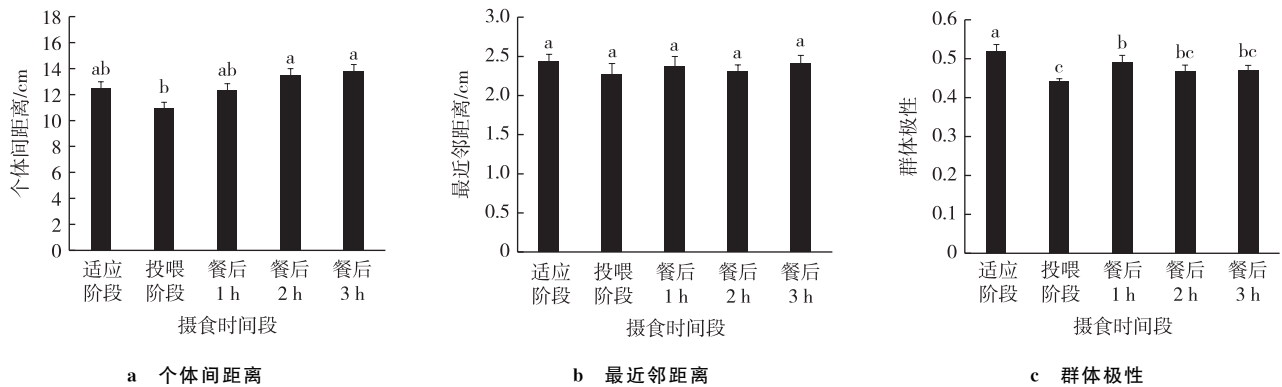
指标	摄食时间段	AS	摄食时间段×AS
平均空间位置	$F_{4,149} = 0.004, p = 1.000$	$F_{1,149} = 22.978, p < 0.001$	$F_{4,149} = 0.166, p = 0.955$
1号位占比	$F_{4,149} = 0.001, p = 1.000$	$F_{1,149} = 39.534, p < 0.001$	$F_{4,149} = 0.490, p = 0.743$



注: * 表示高 AS 个体和低 AS 个体的数据差异有统计学意义 ($p < 0.05$)。

图 4 不同摄食时间段内 AS 对中华倒刺鲃个体空间位置的影响

Fig. 4 Effects of aerobic scope on the spatial location of *S. sinensis* in different feeding time after feeding



注: 不同字母表示不同摄食时间段的实验鱼群体特征参数差异具有统计学意义 ($p < 0.05$)。

图 5 不同摄食时间段对中华倒刺鲃的群体特征的影响

Fig. 5 Effects of different feeding time periods on the population behavior of *S. sinensis*

3 讨论

摄食和运动是鱼类主要的生理活动,二者在竞争上存在不同的模式^[22]。有研究表明,鱼类的摄食活动会改变机体的 AS,通常机体耗氧率的升高与自身摄食量密切相关^[23];并且在 SDA 过程中的摄食代谢峰值也随着摄食水平增加而上升^[23-24]。鱼类摄食后,机体大部分的功率用来消化食物,这将占据大部分的 AS^[25-26],从而导致它的预测剩余 AS 降低。本研究发现,中华倒刺鲃摄食后,剩余 AS 逐渐减少,这是由于机体对食物的消化吸收以及摄食过程相联系的机械运动如吞咽、消化道蠕动等对能量的消耗所导致。已有研究表明,摄食量越大的个体在消化吸收的过程中代谢成本越高^[27],更多的能量用来消化食物,用于运动的能量减少。但本研究发现,摄食后的鱼群中摄食量越高的个体成员的分布位置越靠近群体的前部。在自然界中,由于鱼类个体的生理特征和

食物获取能力存在差异,这可能导致鱼类 SDA 可能存在着个体间差异。有研究发现,高 AS 的鱼类个体拥有较高的摄食需求,进而,在高食物丰度环境下,高 AS 个体更喜欢停留在鱼群的前部以获取更多食物^[15]。

本研究结果显示:不同摄食时间段对中华倒刺鲃个体平均空间位置和 1 号位占比并无统计学意义上的影响,但 AS 对这 2 个参数则有统计学意义上的影响($p < 0.001$)。鱼群中高 AS 个体的平均空间位置高于低 AS 个体的平均空间位置。理论上认为,AS 较高的个体可以利用在群体中的空间位置获得更多的食物资源^[28]。实验鱼在摄食消化期间,消化吸收所带来的能量也可用于实验鱼的运动,食物消化虽然理论上限制了实验鱼的运动但是有能量物质如三磷酸腺苷等的补充,因此群体中高 AS 的个体成员的平均空间位置更高。本研究还发现,低 AS 个体的 1 号位占比明显高于高 AS 个体的 1 号位占比。有研究表明,AS 越高的个体,它的摄食量越大^[15]。虽然高 AS 个体获取了更多的食物,但食物的消化使得 AS 更加有限;因此与获得较少食物的低 AS 个体相比,高 AS 个体的剩余 AS 明显低于低 AS 个体的剩余 AS。

在本研究中,中华倒刺鲃幼鱼群体中的个体间距离有明显差异。由于鱼类在摄食后,随着摄食量的增加,耗氧率也会增加。摄食量最大得个体因食物消化占据了大部分的 AS,只有少部分的 AS 用于其他的生理功能,最终可能限制了个体的运动能力^[25-26],理论上讲鱼群的个体间距离会因此更大。因此,本研究结果也与以前的相关研究结果一致。研究显示,鱼群能量的消耗会随着个体成员之间距离的增加而增加^[4]。本研究结果显示,在投喂后中华倒刺鲃幼鱼的群体极性明显降低。而有研究表明,食物消化导致鱼群的协调性下降,并认为这是由于个体获取食物的能力并不相同,从而使得消化策略也有差异,加上鱼群内个体游泳能力也不尽相同,因此出现了上述情况^[17]。

综上所述,摄食时间段对中华倒刺鲃群体中个体的平均空间位置没有明显影响,AS 对该参数则有明显的影响;群体中高 AS 个体的平均空间位置高于低 AS 个体的平均空间位置,而低 AS 个体的 1 号位占比明显高于高 AS 个体的 1 号位占比。在消化期间,中华倒刺鲃幼鱼会离群体越来越远,个体间距离增加,群体凝聚力降低。消化会导致群体极性下降,摄食后由于消化策略不同,游泳同步性降低,最终导致群体协调性降低。上述结果从中华倒刺鲃的 AS 角度阐述了该鱼种群体中个体的空间位置和群体行为,为后续 AS 对鱼类群体的相关研究提供了重要的基础资料。

参考文献:

- [1] IOANNOU C C. Warm intelligence in fish?the difficulty in demonstrating distributed and self-organised collective intelligence in (some) animal groups[J]. Behavior Processes,2017,141(2):141-151.
- [2] ELCOURT J,PONCIN P. Shoals and schools:back to the heuristic definitions and quantitative references[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries,2012,22:595-619.
- [3] ARMSTRONG T,KHURSIGARA A J,KILLEN S S,et al. Oil exposure alters social group cohesion in fish[J]. Scientific Reports,2019,9(1):13520.
- [4] MARRAS S,KILLEN S S,LINDSTRÖM J,et al. Fish swimming in schools save energy regardless of their spatial position[J]. Behavioral Ecology and Sociobiology,2015,69:219-226.
- [5] COUZIN I D. Collective cognition in animal groups[J]. Trends in Cognitive Sciences,2009,13(1):36-43.
- [6] KILLEN S S,MARRAS S,NADLER L,et al. The role of physiological traits in assortment among and within fish shoals[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B,Biological Sciences,2017,372(1727):20160233.
- [7] KILLEN S S,MARRAS S,STEFFENSEN J F,et al. Aerobic capacity influences the spatial position of individuals within fish schools[J]. Proceedings Biological Sciences,2012,279(1727):357-364.
- [8] HULLBERT A J,ELSE P L. Mechanisms underlying the cost of living in animals[J]. Annual Review of Physiology,2000,62:207-235.
- [9] CHABOT D,STEFFENSEN J F,FARRELL A P. The determination of standard metabolic rate in fishes[J]. Journal of Fish Biology,2016,88(1):81-121.
- [10] NORIN T,CLARK T D. Measurement and relevance of maximum metabolic rate in fishes[J]. Journal of Fish Biology,2016,88

- (1):122-151.
- [11] ZENG L Q, FU S J, LI X M, et al. Physiological and morphological responses to the first bout of refeeding in southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. *Journal of Comparative Physiology B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 2014, 184(3):329-346.
- [12] CHABOT D, KOENKER R, FARRELL A P. The measurement of specific dynamic action in fishes [J]. *Journal of Fish Biology*, 2016, 88(1):152-172.
- [13] 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, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 2006, 176(5):489-495.
- [14] 付世建, 曹振东, 曾令清, 等. 鱼类游泳运动: 策略与适应性进化 [J]. 北京: 科学出版社, 2014.
FU S J, CAO Z D, ZENG L Q, et al. Fish locomotion: strategy and adaptive evolution [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [15] AURE S K, SALIN K, ANDERSON G J, et al. Aerobic scope explains individual variation in feeding capacity [J]. *Biology Letters*, 2015, 11(11):20150793.
- [16] 陈李雪, 冷霞, 曾令清. 颜色标记对鲫幼鱼个性的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(5):28-34.
CHEN L X, LENG X, ZENG L Q. Effect of color tagging on personality of the juvenile *Carassius auratus* [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2020, 37(5):28-34.
- [17] 凌鸿, 王春花, 付世建, 等. 营养状态和代谢范围对锦鲤幼鱼群体行为的影响 [J]. *水生生物学报*, 2023, 47(6):958-972.
LING H, WANG C H, FU S J, et al. Nutritional status and aerobic scope on group behaviour of juvenile goldfish (*Carassius auratus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(6):958-972.
- [18] ZENG L Q, ZHANG A J, KILLEN S S, et al. Standard metabolic rate predicts growth trajectory of juvenile Chinese crucian carp (*Carassius auratus*) under changing food availability [J]. *Biology Open*, 2017, 6(9):1305-1309.
- [19] ZENG L Q, WANG L, WANG G N, et al. The relationship between growth performance and metabolic rate flexibility varies with food availability in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular and Integrative Physiology*, 2017, 212:56-63.
- [20] 杨亚, 凌鸿, 付世建, 等. 环境类型和代谢表型对中华倒刺鲃群体行为的影响 [J]. *生态学报*, 2021, 41(11):4447-4459.
YANG Y, LING H, FU S J. Effects of ecological context and metabolic phenotype on collective behaviour of qingbo *Spinibarbus sinensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11):4447-4459.
- [21] 曾令清, 刘小玲, 何衍, 等. 垂钓胁迫对中华倒刺鲃幼鱼群体行为的影响 [J]. *中国水产科学*, 2021, 28(10):1281-1290.
ZENG L Q, LIU X L, HE Y, et al. Effect of angling stress on the collective behavior of juvenile Qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(10):1281-1290.
- [22] 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.
FU S J, CAO Z D, XIE J. Feeding metabolism and locomotion metabolism in fishes [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, 43(2):150-159.
- [23] 罗欢, 陈荣, 李武新, 等. 摄食水平对叉尾斗鱼特殊动力作用的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(4):45-50.
LUO H, CHEN R, LI W X, et al. Effect of feeding level on specific dynamic action in paradise fish (*Macropodus opercularis*) [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2022, 39(4):45-50.
- [24] 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):22-25.
PANG X, CAO Z D, FU S J. Effect of meal size on specific dynamic action in juvenile crucian carp [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2009, 26(1):22-25.
- [25] 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.
- [26] SECOR S M. Specific dynamic action: a review of the postprandial metabolic response [J]. *Journal of Comparative Physiology B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 2009, 179(1):1-56.
- [27] DUPONT-PRINET A, CLAIREAUX G, MCKENZIE D J. Effects of feeding and hypoxia on cardiac performance and gastrointestinal blood flow during critical speed swimming in the sea bass *Dicentrarchus labrax* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular and Integrative Physiology* [J], 2009, 154(2):233-240.
- [28] ROBINSON C, PITCHER T. Hunger motivation as a promoter of different behaviours within a shoal of herring: selection for homogeneity in fish shoal? [J]. *Journal of Fish Biology*, 1989, 35(3):459-460.

Animal Sciences

Effects of Aerobic Scope on Spatial Location and Group Behavior of the *Spinibarbus sinensis*

WANG Chunhua¹, BI Jinqiu¹, LING Hong¹, PU Deyong², ZENG Lingqing¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Freshwater Fish Resources and Reproductive Development, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To investigate the effect of aerobic scope (AS) on the spatial location and group behavior of Qingbo (*Spinibarbus sinensis*), the metabolic rate was measured at $(25.4 \pm 0.2) ^\circ\text{C}$ and the AS was calculated. The results showed that: oxygen consumption rate increased significantly with increasing food intake, and its residual AS was predicted to be significantly negatively correlated with food intake ($p < 0.001$); there was no significant effect of feeding time period on the mean spatial position of individuals in the shoal and the percentage of No. 1 position, but AS had a significant effect on these 2 parameters for individuals in the fish population ($p < 0.001$), the inter-individual distance of the shoal had a significant increase ($p < 0.05$) and the group polarity had a significant decrease ($p < 0.05$). The results above indicated that: the spatial position of Chinese barb individuals is significantly influenced by AS; individuals with low AS occupy the group lead for a longer period of time; furthermore, the cohesion of individual members of the group and group coordination both decrease after feeding.

Keywords: metabolic range; spatial location; group behavior; *Spinibarbus sinensis*

(责任编辑 方 兴)