

凡纳滨对虾的游泳能力及游泳疲劳后的生理反应

于晓明,张秀梅,张沛东

(中国海洋大学 教育部海水养殖重点实验室,山东 青岛 266003)

摘要: 在水温(24.8±0.3)℃条件下,测定了凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的临界游速(U_{cm})、弹跳速度、不同流速下的可持续游泳时间,以及游泳疲劳后的生理反应。实验凡纳滨对虾体长(6.87±0.42)cm,体质量(3.34±0.59)g;5个水流速度分别设定为(26.7±2.9)cm·s⁻¹、(31.0±3.6)cm·s⁻¹、(34.6±3.7)cm·s⁻¹、(38.6±3.3)cm·s⁻¹、(40.8±3.4)cm·s⁻¹。结果表明,凡纳滨对虾游泳足的摆动频率与流速呈线性函数关系,可持续游泳时间与流速呈对数函数关系。其游泳能力指数SAI(Swimming Ability Index)为16.49cm,平均临界游速为(35.67±0.62)cm·s⁻¹[(5.02±0.09)BL·s⁻¹],平均弹跳速度为(106.51±6.08)cm·s⁻¹[(15.74±0.96)BL·s⁻¹]。不同流速下游泳疲劳后,凡纳滨对虾血糖和血浆乳酸浓度均显著高于对照组($P<0.05$);在26.7cm·s⁻¹、31.0cm·s⁻¹和34.6cm·s⁻¹流速下游泳疲劳后,血浆甘油三酯浓度均极显著高于对照组($P<0.01$);在26.7cm·s⁻¹、34.6cm·s⁻¹和38.6cm·s⁻¹流速下游泳疲劳后,血浆总蛋白浓度均显著高于对照组($P<0.05$)。经临界游速和弹跳速度测试疲劳后,血糖和血浆乳酸浓度也均显著升高($P<0.05$),而血浆甘油三酯和总蛋白浓度则无显著变化($P>0.05$)。本研究旨在深入了解对虾运动生理学特性,并为对虾捕捞和增养殖技术的改良提供参考依据。[中国水产科学,2009,16(4):533-540]

关键词: 凡纳滨对虾;游泳能力;临界游速;弹跳速度;葡萄糖;甘油三酯;总蛋白;乳酸

中图分类号: S9

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2009)04-0533-08

评价水生动物游泳能力的指标主要包括游泳速度和可持续游泳时间。游泳能力的测定方法主要包括游泳耐久性实验、临界游速实验和爆发游速实验^[1-2]。游泳耐久性实验是检测水生动物在一定流速下的可持续游泳时间,临界游速实验是检测最大可持续游泳速度,爆发游速实验则是检测最快游泳速度。

对虾的运动方式主要有游泳、爬行和跳跃。对虾具有延长的腹部,可以通过腹部反复的剧烈弯曲与伸展而产生弹跳运动在水中移动,而游泳则是由腹部5对游泳足的频繁摆动实现的。游泳能力对对虾的生存至关重要,直接影响其摄食、避敌、洄游和分布等。开展对虾游泳能力的研究对更好地了解其行为生态习性尤为重要。

有关虾类运动能力的研究多集中在弹跳运动,如弹跳运动的机制、速度和距离^[3-4],以及弹跳运动和疲劳后恢复过程中,肌肉中ATP和磷酸精氨酸的使用和再合成及乳酸的积累和清除^[5-6]。Cowles^[7-8]研究了*Sergestes similis*的游泳速度, Solis-Ibarra和Rendon-Rodriguez^[9]测定了凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的游泳速度, Zhang等^[10]研究了凡纳滨对虾的游泳耐久性和游泳疲劳后的生理反应及水温和盐度对其游泳耐久性的影响。而从游泳和弹跳行为综合评价对虾运动能力的研究尚不多见^[4]。

本研究在水温(24.8±0.3)℃条件下,利用垂直循环回流水槽测定了凡纳滨对虾的临界游速和5个不同流速下的可持续游泳时间,利用长方形玻璃水

收稿日期: 2008-12-14; 修订日期: 2009-03-24.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD09A15); 国家863计划资助项目(2006AA100303).

作者简介: 于晓明(1981-),男,博士研究生,主要从事对虾游泳能力与游泳生理方面研究. E-mail: yxm1981@yahoo.com.cn

通讯作者: 张秀梅. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn

槽测定其弹跳速度,同时分析了其运动疲劳后的生理反应,以期进一步了解对虾的运动能力和运动生理,进而为对虾的捕捞与增养殖技术的改良提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验用凡纳滨对虾体长 (6.87 ± 0.42) cm,体质量 (3.34 ± 0.59) g,购于青岛市沙子口养殖场。运回后在实验室 2 m^3 循环水槽中暂养5 d。暂养期间,水温保持在 (25.0 ± 0.5) °C,盐度 32 ± 1.0 ,溶解氧 $>6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每日2次过量投喂海马牌人工配合饲料,1 h后吸出残饵和粪便。实验使用处于蜕皮期间的实验虾,实验前实验虾禁食12 h。

1.2 实验设计与程序

凡纳滨对虾的可持续游泳时间和临界流速在小型可控温垂直循环回流水槽(大连汇新科技有限公司)中测定。游泳水槽的规格为 $100 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ (L×W×H)。水流速度使用日本产VR-101型流速计测定。游泳水槽上方悬挂1只22 W日光灯,以保证游泳水槽的光照条件一致。实验期间,水温保持在 24.8 °C,盐度 32 ± 1.0 ,溶解氧 $>6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验期间不投饵。实验过程中使用摄像机($25 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$)对实验虾的游泳行为进行录像,以分析其游泳足的摆动频率。

凡纳滨对虾的弹跳速度在长方形玻璃水槽($155 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, L×W×H)中测定。水槽底部外侧粘贴绘制有边长5 cm方格的座标纸作为比例尺。在水槽上方265 cm处放置一部摄像机($25 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$)以监测实验虾的弹跳行为和弹跳速度。

1.2.1 可持续游泳时间 参考Amornpiyakrit和Arimoto^[4]的报道,以7 200 s作为本实验的最大可持续游泳时间。依据预实验确定5个实验水流速度,分别为: $22.2 \sim 29.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $25.3 \sim 35.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $28.1 \sim 39.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $31.7 \sim 41.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $34.9 \sim 45.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水流速度即为实验虾逆水流游泳时的游泳速度。每一流速下的游泳实验同时测试9~10尾实

验虾,做2个重复,共测试实验虾的数量为18~20尾。实验虾先在 $23.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速下适应10 min,之后在1 min内将流速调至实验设置的流速,记录在该流速下每尾实验虾持续游泳直至疲劳时的累计游泳时间。游泳疲劳的判断指标以实验虾停止游泳并被水流冲到游泳水槽下游的拦网上,用小抄网将实验虾移动到游泳水槽上游3次也不重新游泳为标准。游泳疲劳后立即将实验虾从游泳水槽中取出,用吸水纸擦干体表水分,用电子天平称重(精确到0.01 g),测量体长。根据实验测定的游泳时间和游泳速度,求算游泳能力指数SAI(Swimming Ability Index)。SAI是游泳时间与游泳速度拟合的曲线与坐标轴围成的图形的面积,它从游泳速度和游泳时间两方面综合反映了游泳能力,因此是衡量游泳能力的良好指标,也可以用来比较种间或同种不同生长阶段的游泳能力^[10-11],计算公式为: $\text{SAI} = \int_0^{7200} v dt$ ^[12]。式中: v ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)为游泳速度, t (s)为游泳时间。

1.2.2 临界流速 临界流速的测定方法是将游泳动物放入流水水槽中,每隔一段时间将水流速度按固定变幅调高,直至实验动物疲劳停止游泳。暂养结束后,随机选取经12 h禁食的实验虾放入游泳水槽,在 $23.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速下适应10 min后开始实验,记录实验开始时的时间。实验虾在初始流速下游泳20 min后将水流速度升高 $4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,若实验虾可持续游泳20 min则将流速再升高 $4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,以此反复,直至实验虾疲劳后停止游泳,记录实验虾游泳结束时间(流程图见图1-A)。每次实验同时测试4~5尾实验虾,共测定19尾,逐尾计算临界流速(U_{crit}),计算公式为^[13]:

$$U_{\text{crit}} = U_1 + (T_1/T_2) \times U_2$$

式中: U_1 是实验虾能够持续游泳20 min的最高流速($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); U_2 是速度增量($4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$); T_1 是实验虾在最高流速下的游泳时间(min); T_2 是时间间隔(20 min)。相对临界流速 U_{crit} 以每秒钟游过体长的倍数表示($\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$)。录制的游泳图像使用KMPlayer软件分析,记录3 s内实验虾游泳足摆动次数。每一流速下观测5尾实验虾,每尾计数3次。

1.2.3 弹跳速度 随机选取经12 h禁食的实验虾1尾,放入实验水槽中适应5 min。之后,使用小棒轻触实验虾头胸甲,使其产生弹跳运动,当实验虾停止弹跳并停在水槽底部后再次轻触,直至实验虾疲劳不再产生弹跳运动为止(流程图见图1-B)。共测定19尾实验虾。实验录像使用KMPlayer软件分析。使用Photoshop

软件将一次连续弹跳运动的第一帧与最后一帧截图进行合成,使用ImageTool软件测量实验虾额剑通过的距离作为弹跳距离(d , cm)。弹跳时间(t , s) $=N/25$, N 为弹跳运动的帧数(每帧为1/25 s)。弹跳速度(v , $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) $=d/t$ 。相对弹跳速度 v 以每秒钟跳过体长的倍数表示($\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$)。每尾实验虾分析3~4次连续弹跳运动。

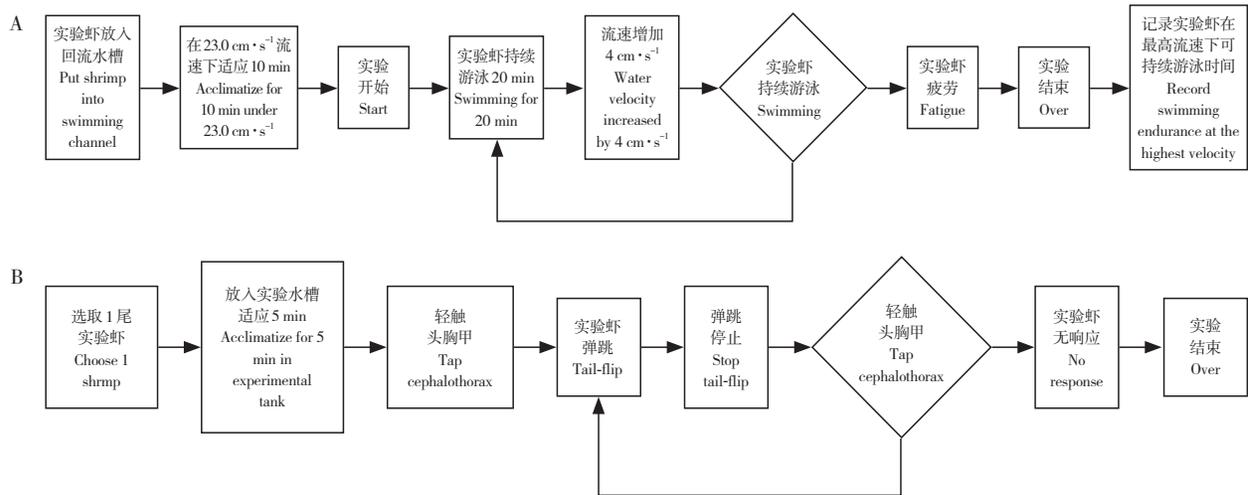


图1 临界流速实验(A)和弹跳速度实验(B)流程图

Fig. 1 Process of critical swimming speed (A) and tail-flip speed (B) tests

1.3 样品采集与生理指标的测定

使用装有200 μL 预冷抗凝剂的1 mL预冷注射器从实验虾第一对游泳足基部凹陷处抽取血淋巴200 μL 。将采集到的样品注入1 mL离心管,混匀,于4 $^{\circ}\text{C}$ 800 /min离心10 min。取上清液移入离心管,-34 $^{\circ}\text{C}$ 下冷冻保存。同时取10尾与实验虾同规格而未进行实验的凡纳滨对虾作为对照组。生理指标的测定包括葡萄糖($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、甘油三酯($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、总蛋白($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)和乳酸($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),利用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定。

1.4 数据分析

使用独立样本 t 检验分析实验虾运动疲劳前后各生理指标的差异;不同流速下游泳疲劳后各生理指标的分析使用单因素方差分析和DUNCAN多重比较;游泳速度与可持续游泳时间和游泳足摆动频率之间的关系使用曲线回归求算,以 $P<0.05$ 为显著性

水平。所有数据处理使用SPSS 13.0统计软件进行。结果以平均值 \pm 标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 运动行为

水流刺激下,凡纳滨对虾表现出正趋流性,其通过游泳足的快速摆动逆水流游动。实验虾大部分时间在实验水槽底部游动,偶尔进入中上层。随流速(v , $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)增加,实验虾游泳足的摆动频率(f , Hz)也随之加快,二者之间的关系可用线性函数表示为 $f=0.049 6v+4.299 5$, $R^2=0.96$ ($P<0.01$)。实验虾有时还将腹部抬起,尾扇下压,头胸甲前端贴在水槽底部,与水槽底部呈一定角度。当实验虾被水流冲至游泳水槽下游拦网时会产生弹跳运动以脱离拦网恢复游泳姿态。

静水条件下,当受到外物刺激时,实验虾腹部迅

速向头胸甲腹面弯曲,尾扇展开,借助尾扇击水产生的反作用力快速向后方移动,在移动过程中腹部逐渐伸直,最后停止移动。外物刺激的初始,实验虾一般会产生连续的弹跳运动,随刺激次数的增加,其连续弹跳的次数逐渐减少,弹跳速度和距离亦逐渐降低,最后不再产生弹跳运动,停在水槽底部。

2.2 可持续游泳时间

凡纳滨对虾的可持续游泳时间(t , s)随流速(v , $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)的增加逐渐减少,二者呈对数函数关系,关系式为 $t = -141.12 \ln(v) + 52460$, $R^2=0.99$ ($P<0.01$),如图2所示。经计算得出,水温(24.8 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ 时凡纳滨对虾的游泳能力指数(SAI)为:

$$\text{SAI} = \int_0^{7200} v dt = \int_0^{7200} e^{(52460-t)/14112} dt = 16.49 \text{ cm}.$$

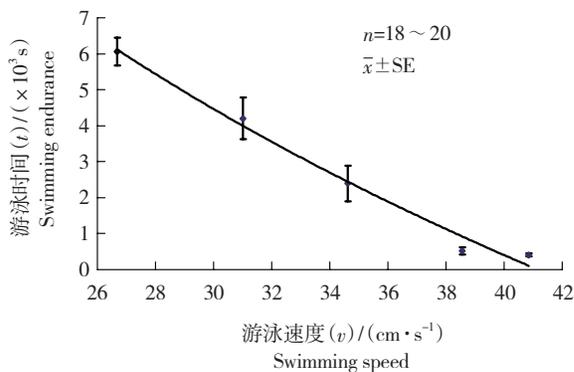


图2 凡纳滨对虾的可持续游泳时间与游泳速度之间的关系 ($n=18 \sim 20$, $\bar{x} \pm \text{SE}$)

Fig. 2 Relationship between swimming endurance and swimming speed of *L. vannamei* ($n=18 \sim 20$, $\bar{x} \pm \text{SE}$)

2.3 临界流速和弹跳速度

根据临界流速的公式,经计算得出,水温(24.8 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ 时,凡纳滨对虾的临界流速为(35.67 ± 0.62) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,即(5.02 ± 0.09) $\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$ ($n=19$);经录像分析和测算发现,凡纳滨对虾的弹跳速度为(106.51 ± 6.08) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,即(15.74 ± 0.96) $\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$ ($n=19$)。

2.4 运动疲劳后的生理反应

不同流速下游泳疲劳后,凡纳滨对虾血浆生理指标的变化如表1所示。游泳疲劳后,各实验组对虾血糖和血浆乳酸浓度均显著高于对照组 ($P<0.05$);在 $26.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $31.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $34.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速下,游泳疲劳后实验虾血浆甘油三酯浓度显著高于对照组 ($P<0.01$),而在流速 $38.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $40.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时与对照组无显著差异 ($P>0.05$);在 $26.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $34.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $38.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速下,游泳疲劳后实验虾血浆总蛋白浓度显著高于对照组 ($P<0.05$),而在流速 $31.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $40.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。方差分析表明,不同流速下游泳疲劳后,各实验组之间的血浆甘油三酯和总蛋白浓度均存在显著差异 ($P<0.01$),而葡萄糖和乳酸浓度均无显著差异 ($P>0.05$)。

临界流速和弹跳速度实验中,凡纳滨对虾运动疲劳后血浆生理指标的变化如表2所示。运动疲劳后,实验虾的血浆甘油三酯和总蛋白浓度均与对照组无显著差异 ($P>0.05$),而血糖和血浆乳酸浓度显著高于对照组 ($P<0.05$)。

表1 不同流速下游泳疲劳后凡纳滨对虾血浆生理指标的变化

Tab. 1 Changes in plasma physiological parameters of *L. vannamei* after swimming fatigue at different swimming speeds $n=7 \sim 10$; $\bar{x} \pm \text{SE}$

血浆 Plasma	对照组 Control	游泳速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) Swimming speed				
		26.7 ± 2.9	31.0 ± 3.6	34.6 ± 3.7	38.6 ± 3.3	40.8 ± 3.4
葡萄糖/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) Glucose	0.95 ± 0.17	$2.11 \pm 0.26^{**}$	$2.03 \pm 0.26^{**}$	$2.26 \pm 0.18^{**}$	$2.91 \pm 0.31^{**}$	$2.42 \pm 0.32^{**}$
甘油三酯/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) Triglyceride	0.15 ± 0.01	$0.27 \pm 0.02^{***b}$	$0.26 \pm 0.02^{***b}$	$0.32 \pm 0.03^{***b}$	0.16 ± 0.02^a	0.18 ± 0.03^a
总蛋白/($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) Total protein	75.40 ± 6.44	$102.91 \pm 7.44^{*b}$	84.72 ± 3.29^a	$108.21 \pm 3.74^{**b}$	$116.27 \pm 5.98^{**b}$	77.41 ± 7.93^a
乳酸/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) Lactate	1.18 ± 0.16	$4.60 \pm 0.99^*$	$4.40 \pm 1.13^*$	$4.10 \pm 0.74^{**}$	$6.93 \pm 1.11^{**}$	$7.72 \pm 1.32^{**}$

注: *表示与对照组差异显著 ($P<0.05$); **表示与对照组差异极显著 ($P<0.01$); 同一行中标有不同字母的数值表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: * Indicates a significant difference from control group ($P<0.05$); ** indicates a very significant difference from control group ($P<0.01$); values with different letters in the same row indicate significant difference from each other ($P<0.05$).

表2 临界游速和弹跳速度实验运动疲劳后凡纳滨对虾血浆生理指标的变化
 Tab. 2 Changes in plasma physiological parameters of *L. vannamei* after exercise fatigue in critical swimming speed and tail-flip speed tests n=6~10; $\bar{x} \pm SE$

血浆 Plasma	对照组 Control	游泳疲劳后 After swimming fatigue	弹跳疲劳后 After tail-flip fatigue
葡萄糖/(mmol·L ⁻¹) Glucose	0.95±0.17	2.33±0.37**	3.20±0.29**
甘油三酯/(mmol·L ⁻¹) Triglyceride	0.15±0.01	0.17±0.04	0.23±0.04
总蛋白/(mg·mL ⁻¹) Total protein	75.40±6.44	86.75±3.64	87.32±5.04
乳酸/(mmol·L ⁻¹) Lactate	1.18±0.16	5.24±1.07*	7.56±0.57**

注:“*”表示与对照组差异显著($P<0.05$);“**”表示与对照组差异极显著($P<0.01$)。

Note: “*” indicates a significant difference from control group ($P<0.05$); “**” indicates a very significant difference from control group ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 可持续游泳时间

随游泳速度的增加,凡纳滨对虾的可持续游泳时间逐渐减少,从流速 $26.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的平均 $6\ 057 \text{ s}$ 下降到 $40.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的平均 411 s 。在 $26.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速下,65%的实验虾可持续游泳时间超过 $7\ 200 \text{ s}$,因此可以认为,在本实验条件下低于 $26.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的游速可作为凡纳滨对虾的可持续游泳速度。Amornpiyakrit和Arimoto^[4]报道,日本囊对虾(全长 $12.7 \sim 14.2 \text{ cm}$,水温 $20.2 \text{ }^\circ\text{C}$)在 $28 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 流速下的可持续游泳时间达到 $7\ 200 \text{ s}$,这与本实验中凡纳滨对虾的可持续游泳能力相近。

本实验结果表明,水温(24.8 ± 0.3) $^\circ\text{C}$ 时体质量(3.34 ± 0.59)g凡纳滨对虾的SAI为 16.49 cm (实验水流速度为 $26.7 \sim 40.8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。Zhang等^[10]报道,水温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时体质量 4.09 g 凡纳滨对虾的SAI为 7.28 cm (实验水流速度为 $5.41 \sim 11.47 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。可见水温对水生动物的游泳能力影响显著,在适温范围内,游泳能力一般随水温的升高而增加^[1]。分析认为,2个实验所得SAI的差异是由于实验水流速度和水温不同所致。

3.2 临界游速和弹跳速度

临界游速可以作为一个相对指标用来量化和比较水生动物的生理状况、评估最大有氧游泳速度及反映总的有氧代谢能力^[2]。有关鱼类的临界游速已有大量报道,然而关于虾类游泳能力的报道还很少。本研究参照鱼类临界游速的测定方法,计算了凡

纳滨对虾的临界游速。结果表明,水温(24.8 ± 0.3) $^\circ\text{C}$ 时体长(6.87 ± 0.42)cm凡纳滨对虾的临界游速为 $28.87 \sim 39.58 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($4.37 \sim 5.66 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$)。水生动物的临界游速,即最大可持续游泳速度可作为拖网设计时的重要参数。当捕捞对象与拖曳方向作同向游泳逃逸时,拖速大于捕捞对象的最大可持续游泳速度才能达到渔获效果。

研究发现,*Pandalus danae*(体长 7 cm , $12 \text{ }^\circ\text{C}$)的弹跳速度为 $300 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[14];褐虾(*Crangon crangon*)(体长 $1.1 \sim 6.9 \text{ cm}$, $13 \text{ }^\circ\text{C}$)的弹跳速度为 $40 \sim 110 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[3];日本囊对虾(全长 $14 \sim 15.8 \text{ cm}$, $17.8 \sim 21.3 \text{ }^\circ\text{C}$)的弹跳速度为 $7 \sim 217 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4]。本实验中,水温(24.8 ± 0.3) $^\circ\text{C}$ 时体长(6.87 ± 0.42)cm的凡纳滨对虾弹跳速度为 $70.32 \sim 193.13 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($10.34 \sim 28.40 \text{ BL} \cdot \text{s}^{-1}$)。由于水温、实验虾规格等实验条件不同,本研究结果与所报道的各实验结果之间尚难以进行比较分析。弹跳运动是虾类躲避捕食者和危险环境的一个最重要的防御行为,弹跳速度反映了其躲避敌害捕食的能力。本实验发现,凡纳滨对虾不同个体间的弹跳速度存在较大差异,最大达2.75倍。分析认为这是由于个体间生理状况的差异所致。弹跳能力差的个体更容易被敌害捕食,因此,在选择增殖放流对象时应挑选弹跳速度快、活力强的个体,以提高放流后的成活率。

3.3 对虾运动疲劳后的生理响应

目前国内外关于对虾游泳生理的研究还很少,Zhang等^[10]研究了游泳疲劳对凡纳滨对虾血清葡萄糖、总蛋白和体质量的影响。葡萄糖是甲壳动物血

淋巴中糖的主要成分及细胞水平有氧代谢的能量物质。Zhang等^[10]研究发现,凡纳滨对虾游泳疲劳后其血糖含量降低,葡萄糖可能被作为能量物质使用。而在胁迫条件下,虾的血糖含量一般会增加,为机体提供更多的能量应对胁迫^[15]。本实验结果表明,不同流速下及临界流速实验游泳疲劳后,凡纳滨对虾血糖浓度均显著升高。分析是由于实验虾个体较小,而实验水流速度较快,运动强度较高,强制游泳对其产生了胁迫作用所致。在 $26.7\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $31.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $34.6\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速下游泳疲劳后,凡纳滨对虾血浆甘油三酯浓度显著升高,推测也是一种应对能量物质需求增加的响应。捕捞过程中剧烈的弹跳运动会导致甲壳动物血糖含量显著升高^[16-17]。本实验中,弹跳疲劳后凡纳滨对虾的血糖浓度也呈相同变化趋势。

总蛋白是甲壳动物重要的代谢能量来源。Zhang等^[10]报道,凡纳滨对虾游泳疲劳后其血清总蛋白含量降低,这可能是由于血淋巴体积增加或总蛋白被作为能量物质使用。血蓝蛋白占甲壳动物血淋巴中总蛋白含量的80%~95%^[18],在缺氧条件下甲壳动物的血蓝蛋白含量增加^[19-20]。本实验结果表明,运动疲劳后,凡纳滨对虾血浆总蛋白浓度呈升高趋势,分析是由于高强度的运动引起凡纳滨对虾组织缺氧,血蓝蛋白含量增加以提高氧运输能力,从而导致血浆总蛋白含量升高。在 $26.7\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $34.6\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $38.6\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速下,游泳疲劳后实验虾血浆总蛋白浓度显著高于对照组($P<0.05$),在流速 $31.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有所升高,但无显著差异($P>0.05$),分析这是由于不同个体对游泳疲劳的反应存在差异所致。

在较低流速下游泳疲劳后,凡纳滨对虾血浆甘油三酯和总蛋白浓度均显著升高,而在临界流速和弹跳速度实验中,运动疲劳后的凡纳滨对虾血浆甘油三酯和总蛋白浓度也略有升高,但差异不显著。分析认为,可持续游泳时间测定中,实验虾在恒定流速下游泳至疲劳,低流速下运动时间较长;临界流速实验中,实验虾在递增流速下游泳至疲劳;弹跳速度实验中,实验虾进行剧烈的弹跳运动,运动时间短,很快进入疲劳状态而不再弹跳。因此,运动方式和

运动耗能存在差异,从而导致不同运动方式疲劳后的生理指标也出现差异。

乳酸是糖厌氧代谢的产物。肌肉中乳酸的清除途径包括在肌肉内氧化,通过血液从肌肉中清除并在其他组织中氧化和排泄^[5,21]。本实验结果表明,运动疲劳后,凡纳滨对虾血浆乳酸浓度显著升高。拖网捕捞后挪威龙虾(*Nephrops norvegicus*)和*Munida rugosa*血淋巴中的乳酸含量也显著升高^[16-17],可见,强制运动后肌肉中产生的乳酸会在血淋巴中蓄积。血淋巴中乳酸的积累会导致甲壳动物运动能力降低^[22-23],这是由于乳酸积累导致血液pH降低,抑制了血蓝蛋白的携氧能力及糖分解酶的活力所致^[24-25]。因此,血浆乳酸含量显著升高的反馈机制导致实验虾运动疲劳。

综上,水温(24.8 ± 0.3)℃时,体长(6.87 ± 0.42)cm、体质量(3.34 ± 0.59)g的凡纳滨对虾的游泳能力指数SAI为16.49 cm,平均临界流速为(35.67 ± 0.62) $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,即(5.02 ± 0.09)BL $\cdot\text{s}^{-1}$,平均弹跳速度为(106.51 ± 6.08) $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,即(15.74 ± 0.96)BL $\cdot\text{s}^{-1}$,运动疲劳后凡纳滨对虾的血糖和血浆乳酸含量均显著升高。

参考文献:

- [1] Hammer C. Review fatigue and exercise tests with fish [J]. *Comp Biochem Physiol A: Physiol*, 1995, 112: 1-20.
- [2] Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance [J]. *Comp Biochem Physiol*, 2001, 31A: 41-50.
- [3] Amott S A, Neil D M, Ansell A D. Tail-flip mechanism and size-dependent kinematics of escape swimming in the brown shrimp *Crangon crangon* [J]. *J Exp Biol*, 1998, 201: 1 771-1 784.
- [4] Amornpiyakrit T, Arimoto T. Muscle physiology in escape response of kuruma shrimp [J]. *Am Fish Soc Symp*, 2008, 2: 1 321-1 334.
- [5] Head G, Baldwin J. Energy metabolism and the fate of lactate during recovery from exercise in the Australian freshwater crayfish *Cherax destructor* [J]. *Aust J Mar Freshwater Res*, 1986, 37: 641-646.
- [6] Gruszczyk B, Kamp G. The shift from glycogenolysis to glycogen resynthesis after escape swimming: studies on the abdominal muscle of the shrimp, *Crangon crangon* [J]. *J Comp Physiol*, 1990, 159B: 753-760.
- [7] Cowles D L. Swimming dynamics of the mesopelagic vertically migrating penaeid shrimp *Sergestes similis*: modes and speeds of swimming [J]. *J*

- Crustac Biol, 1994, 14: 247–257.
- [8] Cowles D L. Swimming speed and metabolic rate during routine swimming and simulated vertical migration of *Sergestes similis* in the laboratory [J]. Pac Sci, 2001, 55 (3): 215–226.
- [9] Solis-Ibarra R, Rendon-Rodriguez S. Laboratory observations on displacement speed of the white shrimp *Penaeus vannamei* (Crustacea: Decapoda) [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1994, 103: 309–310.
- [10] Zhang P D, Zhang X M, Li J, et al. Swimming ability and physiological response to swimming fatigue in whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. Comp Biochem Physiol, 2006, 145A: 26–32.
- [11] Tsukamoto K, Kajihara T, Nishiwaki M. Swimming ability of fish [J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1975, 41: 167–174.
- [12] 周仕杰, 何大仁, 吴清天. 几种幼鱼曲线游泳能力的比较研究 [J]. 海洋与湖沼, 1993, 24 (6): 621–626.
- [13] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon [J]. J Fish Res Bd Can, 1964, 21: 1 183–1 226.
- [14] Daniel T L, Meyhöfer E. Size limits in escape locomotion of caridean shrimp [J]. J Exp Biol, 1989, 143: 245–265.
- [15] Racotta I S, Palacios E. Hemolymph metabolic variables in response to experimental manipulation stress and serotonin injection in *Penaeus vannamei* [J]. J World Aquacult Soc, 1998, 29: 351–356.
- [16] Harris R R, Andrews M B. Physiological changes in the Norway lobster *Nephrops norvegicus* (L.) escaping and discarded from commercial trawls on the West Coast of Scotland II. Disturbances in haemolymph respiratory gases, tissue metabolites and swimming performance after capture and during recovery [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2005, 320: 195–210.
- [17] Bergmann M, Taylor A C, Geoffrey Moore P. Physiological stress in decapod crustaceans (*Munida rugosa* and *Liocarcinus depurator*) discarded in the Clyde Nephrops fishery [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2001, 259: 215–229.
- [18] Jeuniaux C. Hemolymph-Arthropoda [A]. In: Florkin M, Scheer B J. (Eds.), Chemical Zoology [M]. New York: Academic Press, 1971: 63–118.
- [19] Hagerman L. Haemocyanin concentration in the shrimp, *Crangon crangon* (L.) after exposure to moderate hypoxia [J]. Comp Biochem Physiol, 1986, 85A: 721–724.
- [20] DeFur P L, Mangum C P, Reese J E. Respiratory responses of the blue crab *Callinectes sapidus* to long-term hypoxia [J]. Biol Bull, 1990, 178: 46–54.
- [21] Morris S, Adamczewska A M. Utilisation of glycogen, ATP and arginine phosphate in exercise and recovery in terrestrial red crabs, *Gecarcoidea natalis* [J]. Comp Biochem Physiol, 2002, 133A: 813–825.
- [22] Vermeer G K. Effects of air exposure on desiccation rate, haemolymph chemistry, and escape behaviour of the spiny lobster, *Palinurus argus* [J]. Fish Bull US, 1987, 85: 45–51.
- [23] Field R H, Taylor A C, Neil D M. Factors affecting swimming ability and its recovery in the Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) [J]. J Marine Biol Assn UK, 1991, 71: 707–742.
- [24] Baldwin J, Gupta A, Iglesias X. Scaling of anaerobic energy metabolism during tail flipping behaviour in the freshwater crayfish, *Cherax destructor* [J]. Mar Freshwater Res, 1999, 50: 183–187.
- [25] 潘鲁青, 金彩霞. 甲壳动物血蓝蛋白研究进展 [J]. 水产学报, 2008, 32 (3): 484–491.

Swimming ability and physiological response to swimming fatigue in *Litopenaeus vannamei*

YU Xiao-ming, ZHANG Xiu-mei, ZHANG Pei-dong

(Key Laboratory of Marine Aquaculture, Ministry of Education; Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: The swimming endurance at five swimming speeds (26.7 ± 2.9 , 31.0 ± 3.6 , 34.6 ± 3.7 , 38.6 ± 3.3 , 40.8 ± 3.4) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (means \pm SD), critical swimming speed (U_{crit}) and tail-flip speed of *Litopenaeus vannamei* [body length (6.87 ± 0.42) cm, body weight (3.34 ± 0.59) g, wet mass] were determined at (24.8 ± 0.3) °C. The metabolite concentrations in hemolymph were determined before exercise and immediately after exercise fatigue to evaluate physiological effect of exercise in *L. vannamei*. The relationship between pleopods beat frequency and swimming speed could be described by linear model. The relationship between swimming endurance and swimming speed could be described by logarithmic model. The swimming ability index (SAI) of *L. vannamei* was found to be 16.49 cm. The average critical swimming speed was found to be (35.67 ± 0.62) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [(5.02 ± 0.09) BL $\cdot \text{s}^{-1}$] and the average tail-flip speed was found to be (106.51 ± 6.08) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [(15.74 ± 0.96) BL $\cdot \text{s}^{-1}$]. The plasma glucose and lactate concentrations of *L. vannamei* increased significantly ($P < 0.05$) after swimming fatigue under different swimming speed; plasma triglyceride concentration increased significantly ($P < 0.01$) after swimming fatigue under 26.7, 31.0 and 34.6 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; plasma total protein concentration increased significantly ($P < 0.05$) after swimming fatigue under 26.7, 34.6 and 38.6 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. The plasma glucose and lactate concentrations increased significantly ($P < 0.05$) after fatigue in critical swimming speed and tail-flip speed tests, however, no significant differences were found for plasma triglyceride and total protein concentrations ($P > 0.05$). Results could be helpful in evaluating the swimming ability, swimming physiology and improving capture efficiency and stock enhancement of *L. vannamei*. [Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16 (4): 533–540]

Key words: *Litopenaeus vannamei*; swimming ability; critical swimming speed; tail-flip speed; glucose; triglyceride; total protein; lactate

Corresponding author: ZHANG Xiu-mei. E-mail: gaozhang@ouc.edu.cn