

# 追赶和空气曝露时间对瓦氏黄颡鱼耗氧率的影响

付世建 曹振东 彭姜岚

(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 400047)

**摘要:**在 20℃ 水温条件下,对不同时间追赶(0、0.5、2.5 和 5 min)和空气曝露(0、2.5、5、10 和 20 min)前和恢复过程中瓦氏黄颡鱼(*Pelteobag vachelli*)的耗氧率进行了测定。发现经过追赶和空气曝露处理后,瓦氏黄颡鱼耗氧率立即显著上升( $P < 0.05$ ),然后逐渐恢复到处理前水平。瓦氏黄颡鱼对追赶的反应远大于空气曝露。仅仅 0.5 min 的追赶就能够诱导出瓦氏黄颡鱼的最大耗氧率(146.66 mg O<sub>2</sub>/h),2.5 min 追赶能诱导最大过量耗氧(39.01 mg O<sub>2</sub>)。5 min 空气曝露处理能诱导最大耗氧率(113.52 mg O<sub>2</sub>/h),10 min 处理能诱导最大过量耗氧(23.01 mg O<sub>2</sub>)。

**关键词:**过量耗氧 耗氧率 空气曝露 追赶 瓦氏黄颡鱼 胁迫因素

中图分类号:Q493.8 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2007)02-111-05

## The Effects of Chasing and Air Exposing on Oxygen Consumption in *Pelteobag vachelli*

FU Shi-Jian CAO Zhen-Dong PENG Jiang-Lan

(Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** The oxygen consumption rate (VO<sub>2</sub>) in Darkbarbel Catfish (*Pelteobag vachelli*) before and during the resume process of chasing (0, 0.5, 2.5 and 5 min) and air exposing (0, 2.5, 5, 10 and 20 min) treatment were examined at 20°C. The VO<sub>2</sub> significantly increased after chasing or air exposing treatment ( $P < 0.05$ ) and slowly returned to pre-treatment levels. The results show that: ① the response to chasing is larger than that of air exposing. ② The maximal peak VO<sub>2</sub> (146.66 mg O<sub>2</sub>/h) is elicited by 0.5 min chasing and maximal excess oxygen consumption (39.01 mg O<sub>2</sub>) is elicited by 2.5 min chasing. ③ The maximal peak VO<sub>2</sub> (113.52 mg O<sub>2</sub>/h) is elicited by 5 min air exposing and maximal excess oxygen consumption (23.01 mg O<sub>2</sub>) is elicited by 2.5 min air exposing.

**Key words:** Excess oxygen consumption; Oxygen consumption rate; Air exposing; Chasing; *Pelteobag vachelli*; Stress

运动后过量耗氧(excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)是指动物运动后恢复期超过静止状态耗氧量水平的额外耗氧量<sup>[1]</sup>,是研究人类和脊椎动物无氧代谢能力的重要生理学指标<sup>[2]</sup>。在鱼类的相关研究中,人工追赶(chasing)被作为诱导过量耗氧的常用方法<sup>[3,4]</sup>。同时人工追赶也作为诱导鱼类最大耗氧率(maximal VO<sub>2</sub>)的方法被广泛使用<sup>[5]</sup>。但实验采

用的追赶时间标准不一,且主要由研究者主观决定<sup>[2,3,5]</sup>。鱼类种类繁多,生态习性和生理特

基金项目 国家自然科学基金(No. 30371121),重庆市自然科学基金和重庆市教委科研项目资助;

第一作者介绍 付世建,男,博士,副教授,主要研究方向:鱼类生理生态学 E-mail: shijianfu9@hotmail.com

收稿日期 2006-09-01,修回日期 2006-12-30

征复杂多变,因此有必要研究不同追赶时间对鱼类耗氧相关参数的影响。缺氧和空气曝露是鱼类在养殖生产、商品运输、甚至自然生活过程中经常遭遇到的胁迫因素。已有研究发现缺氧会造成机体生化指标的剧烈变化<sup>[6]</sup>,而有关空气曝露对鱼类耗氧的影响却鲜有报道,因此这方面的研究可能提供新的有价值的资料。

瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)为我国常见的经济养殖鱼类,广泛分布于长江、珠江流域。该鱼为无鳞底层小型鱼,具有一定的空气呼吸能力,对低氧环境也具有较强的适应能力。因此,本文以瓦氏黄颡鱼为研究对象,研究人工追赶、空气曝露对其耗氧率的影响,以期对相关理论研究和生产实践提供基础数据。

## 1 材料与方法

**1.1 实验鱼来源和驯化** 实验鱼(体重 15.40 ~ 26.59 g,  $n = 45$ )购于当地渔市,实验前在室内循环水养殖系统驯化 1 个月。驯化期间以剪碎的泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)肉块做饵料,每 3 d 投喂 1 次,饱足摄食。驯化水温为  $(20.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ ,溶氧大于  $6 \text{ mg O}_2/\text{L}$ ,自然光照。

### 1.2 实验设计

**1.2.1 追赶时间对耗氧率的影响** 根据其他鱼类的相关研究经验,发现一般鱼类在 1 min 之内运动活跃,对追赶刺激敏感,表现为典型的 C 形启动运动(C-start,为大多数鱼类快速启动,如逃避敌害等活动的运动表现形式);在 1 ~ 2 min 部分个体出现对刺激反应迟钝、躯体翻转等疲劳现象,超过 3 ~ 4 min 后几乎所有鱼身体无法维持平衡,对刺激不再有反应。因此设计了 0.5 min(全部鱼未疲劳,对刺激反应活跃)、2.5 min(全部鱼出现疲劳症状,但偶尔出现游泳活动)和 5 min(全部鱼不再出现游泳活动)追赶时间,并以不追赶仅完成操作过程为对照组。测定瓦氏黄颡鱼在追赶(或对照处理)前和处理后恢复过程中的耗氧率变化。

**1.2.2 空气曝露时间对耗氧率的影响** 设计了(对照组) 2.5、5.0、10.0 和 20.0 min 等 5 个不同空气曝露时间组,测定瓦氏黄颡鱼在空气

曝露前和处理后恢复过程中的耗氧率变化。

**1.3 实验设备及耗氧率的测定** 耗氧率测定设备为实验室自行设计的流水式呼吸仪,该呼吸仪有 11 个呼吸室,呼吸仪结构见图 1。

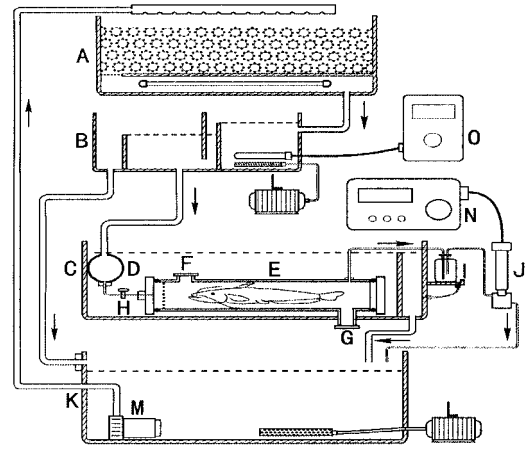


图 1 实验呼吸仪结构图

Fig.1 The structure of the flow through respirometer

A. 水处理系统; B. 上位水槽; C. 恒温水浴; D. 分流管; E. 呼吸室; F. 投饵孔; G. 排粪孔; H. 调速阀; I. 取样瓶; J. 溶氧探头; K. 下位水槽; L. 充气泵; M. 水泵; N. 溶氧仪; O. 恒温装置。

A. Water treatment system; B. Constant level tank; C. Thermostatic water bath; D. Water-flow distributing tube; E. Respiratory chamber; F. Feeding tube; G. Fecal tube; H. Flow-rate-regulating valve; I. Sampling bottle; J. Oxygen probes; K. Bottom reservoir; L. Air pump; M. Water pump; N. Oxygen meter; O. Thermostatic device.

实验鱼饥饿 2 d 后移入呼吸室,再经 1 d 驯化后测定耗氧率作为静止耗氧率(resting  $\text{VO}_2$ )。溶氧值用溶氧仪(HQ20, Hach Company, Loveland, Colorado, USA)测定。下面是计算每尾鱼耗氧率( $R$ ,  $\text{mg O}_2/\text{h fish}$ )的公式:

$$R = \Delta\text{O}_2 \times v \quad (1)$$

式中  $\Delta\text{O}_2$  是实验呼吸室和空白溶氧( $\text{mg O}_2/\text{L}$ )差值,  $v$  是实验呼吸室水流速度(水流速度用呼吸室出水口 1 min 水流称重得到)。为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<sup>[7]</sup>:

$$\text{VO}_2 = (1/m)^{0.75} \times R \quad (2)$$

式中  $VO_2$  为标准体重耗氧率,  $R$  同(1)式,  $m$  为鱼体体重(kg)。

对于不同追赶时间处理的瓦氏黄颡鱼,待测定静止耗氧率后,将单尾实验鱼放入环形环道内,用手不断追逐使鱼持续做力竭性运动<sup>[3]</sup>;经过不同时间追赶后立即将实验鱼单独置于呼吸室内进行恢复耗氧测定。由于实验操作可能对实验鱼造成胁迫,因此实验中把1组鱼仅仅取出呼吸室放入环道后迅速放回呼吸室作为对照组(整个过程不超过0.5 min)。对于不同时间空气曝露处理的瓦氏黄颡鱼,待测定静止耗氧率后,将呼吸仪(内装实验鱼)与呼吸仪前后接口脱离,轻轻将其提出水浴,呼吸室水需约5 s 排出,随即开始记时。经过规定曝露时间[空气温度维持在(20.0 ± 1.0)°C]后,立即将实验鱼单独置于呼吸室内测定恢复耗氧。

在鱼转入呼吸室的1 min 开始测定耗氧率,测定时间设定为1、2、3、4、5、10、15、20、25、30、40 min。呼吸仪体积约100 ml,水流速度约500 ml/min,水体置换99%的时间小于1 min<sup>[8]</sup>。

**1.4 实验参数和统计方法** 采用5个参数描述不同实验处理条件下耗氧率曲线特征,分别为(1)静止耗氧率(resting  $VO_2$ , mg  $O_2$ /h):实验鱼在实验处理前的耗氧率(2)耗氧率峰值(peak  $VO_2$ , mg  $O_2$ /h):实验鱼在恢复过程中的最大耗氧率(3)恢复时间(resume time, min):恢复过程中耗氧率下降到与静止耗氧率无显著差异的时间(4)过量耗氧(excess  $VO_2$ , mg  $O_2$ ):实验鱼在测定过程中各个时间高于静止耗氧率的耗氧差值在时间上的积分。

实验数据用 EXCELL 进行常规计算后,用 STATISTICA 4.5 进行方差分析(ANOVA),如差异显著进行多重比较(LSD法)。描述统计值均用 Mean ± SE 表示,显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

**2.1 运动时间对耗氧率的影响** 对照组和不同追赶时间组的体重和静止耗氧率没有显著差异(表1,图2)。瓦氏黄颡鱼爆发游泳速度低,对人工追赶未表现明显的 C-start 运动。虽然追

赶的应激反应明显小于大多数鱼类,经过追赶或对照处理后,瓦氏黄颡鱼耗氧率在1 min 立即显著上升( $P < 0.05$ ),然后逐渐恢复到运动前水平。对照组、0.5、2.5 和 5 min 追赶组耗氧率恢复到与处理前无显著差异的历时分别为6、20、35 和 30 min。0.5、2.5 和 5 min 追赶组的耗氧率峰值和峰值上升倍率无显著差异,但显著大于对照组( $P < 0.05$ )。2.5 和 5 min 追赶组过量耗氧显著大于 0.5 min 追赶组,而后者显著大于对照组( $P < 0.05$ )。

**2.2 空气曝露时间对耗氧率的影响** 对照组和不同空气曝露时间组体重和静止耗氧率没有显著差异(表2,图3)。对照组和经过短期空气曝露(2.5 min)的瓦氏黄颡鱼在曝露过程中一般静止不动(鳃部有活动),没有明显的应激反应,而更长时间的曝露导致瓦氏黄颡鱼出现板动,其剧烈程度和出现时间有很大的个体差异。经过空气曝露后,各组的耗氧率在1 min 立即显著上升( $P < 0.05$ ),然后逐渐恢复到处理前水平。对照组、2.5、5、10 和 20 min 空气曝露组耗氧率恢复到与处理前无显著差异的历时分别为6、6、10、30 和 35 min。5、10 和 20 min 空气曝露组的耗氧率峰值显著大于对照组和 2.5 min

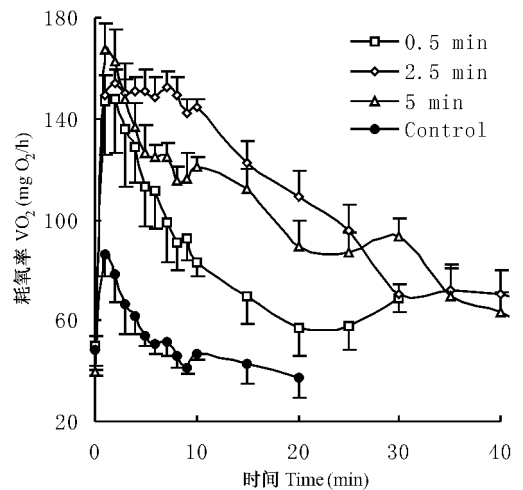


图2 追赶时间对瓦氏黄颡鱼耗氧率的影响

Fig.2 The effect of chasing on  $VO_2$  in Darkbarbel Catfish (Mean ± SE,  $n = 5$ )

表 1 运动时间对瓦氏黄颡鱼耗氧率的影响 (Mean  $\pm$  SE,  $n = 5$ )Table 1 The effect of chasing on  $VO_2$  in Darkbarbel Catfish

	对照组 Control	处理时间 Treatment duration (min)		
	0	0.5	2.5	5
体重 Body mass (g)	22.81 $\pm$ 2.17	20.82 $\pm$ 3.83	21.07 $\pm$ 3.83	22.35 $\pm$ 3.91
静止耗氧率 Resting $VO_2$ (mg $O_2$ /h)	48.27 $\pm$ 9.96	50.12 $\pm$ 9.59	48.32 $\pm$ 5.87	40.05 $\pm$ 9.59
耗氧率峰值 Peak $VO_2$ (mg $O_2$ /h)	86.33 $\pm$ 8.55 <sup>b</sup>	146.66 $\pm$ 20.78 <sup>a</sup>	149.37 $\pm$ 7.48 <sup>a</sup>	167.29 $\pm$ 10.00 <sup>a</sup>
峰值上升倍率 Peak $VO_2$ /Resting $VO_2$	1.95 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>	3.25 $\pm$ 0.41 <sup>a</sup>	3.26 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	4.24 $\pm$ 0.44 <sup>a</sup>
恢复时间 Resume time (min)	6	20	35	30
过量耗氧 Excess $VO_2$ (mg $O_2$ )	2.26 $\pm$ 0.78 <sup>c</sup>	15.22 $\pm$ 1.62 <sup>b</sup>	39.01 $\pm$ 4.05 <sup>a</sup>	39.88 $\pm$ 2.08 <sup>a</sup>

同一行数据不同上标字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Values the same row with different superscript were significantly different ( $P < 0.05$ ).

表 2 空气曝露时间对黄颡鱼耗氧率的影响 (Mean  $\pm$  SE,  $n = 5$ )Table 2 Effect of air exposing on  $VO_2$  in Darkbarbel Catfish

	对照组 Control	处理时间 Treatment duration (min)			
	0	2.5	5	10	20
体重 Body mass (g)	22.44 $\pm$ 1.87	21.43 $\pm$ 2.96	20.49 $\pm$ 2.53	21.94 $\pm$ 2.36	20.49 $\pm$ 2.53
静止耗氧率 Resting $VO_2$ (mg $O_2$ /h)	38.57 $\pm$ 7.13	30.41 $\pm$ 3.60	32.94 $\pm$ 1.90	36.53 $\pm$ 4.03	33.13 $\pm$ 3.03
耗氧率峰值 Peak $VO_2$ (mg $O_2$ /h)	70.43 $\pm$ 3.63 <sup>b</sup>	65.67 $\pm$ 10.49 <sup>b</sup>	113.52 $\pm$ 7.00 <sup>a</sup>	111.82 $\pm$ 10.73 <sup>a</sup>	119.29 $\pm$ 9.36 <sup>a</sup>
峰值上升倍率 Peak $VO_2$ /Resting $VO_2$	1.74 $\pm$ 0.39 <sup>b</sup>	2.85 $\pm$ 0.44 <sup>a</sup>	3.51 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup>	3.07 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	3.64 $\pm$ 0.22 <sup>a</sup>
恢复时间 Resume time (min)	6	6	10	30	35
过量耗氧 Excess $VO_2$ (mg $O_2$ )	1.60 $\pm$ 2.06 <sup>b</sup>	3.03 $\pm$ 0.75 <sup>b</sup>	7.35 $\pm$ 3.17 <sup>b</sup>	23.01 $\pm$ 1.55 <sup>a</sup>	18.14 $\pm$ 3.26 <sup>a</sup>

同一行数据不同上标字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Values the same row with different superscript were significantly different ( $P < 0.05$ ).

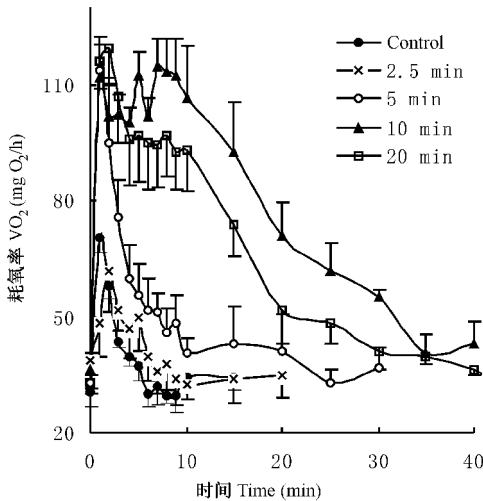


图 3 空气曝露时间对瓦氏黄颡鱼耗氧率的影响

Fig.3 The effect of air exposing on  $VO_2$  in Darkbarbel Catfish (Mean  $\pm$  SE,  $n = 5$ )

率显著小于其他处理组 ( $P < 0.05$ )。各实验组过量耗氧随空气曝露时间的延长而增大,其中 10 和 20 min 空气曝露组过量耗氧显著大于其他实验组 ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

瓦氏黄颡鱼在 20℃ 静止耗氧率(体重校正为 1 kg)为 30.41 ~ 48.32 mg  $O_2$ /h,测定值同已往研究近似<sup>[9]</sup>。经过追赶和空气曝露处理后耗氧率迅速上升,然后缓慢回落。其中,经过力竭运动后耗氧率峰值可达到 167.29 mg  $O_2$ /h,上升倍率为 4.24,处于已报道的鱼类最大耗氧上升倍率 3 ~ 7 范围内<sup>[15]</sup>。通过追赶诱导鱼类的最大耗氧率已有一些研究,但通常以 5 min 追赶后的耗氧率峰值作为最大耗氧率,恢复过程中超过静止耗氧额外的耗氧作为过量耗氧。但多数鱼类在追赶 1 min 后反应就显著下降,2 min 后对刺激只有偶尔的反应,因而用 5 min 的追

空气曝露组 ( $P < 0.05$ )。而对照组峰值上升倍

赶处理来诱导最大耗氧率和过量耗氧,是否适于所有鱼类是一个值得探讨的问题。由本实验可以看出,仅仅 0.5 min 的追赶就能够诱导出最大耗氧率,而最大过量耗氧需要 2.5 min 的追赶才能诱导出来(表 1 图 2)。通过比较空气曝露和追赶对黄颡鱼的影响发现,空气曝露对耗氧率的影响远小于人工追赶。一方面其最大耗氧率需 5 min 处理才能诱导出来,最大过量耗氧需 10 min 处理才能诱导出来(表 2,图 3);另一方面,空气曝露所能诱导出来的最大耗氧率和过量耗氧均小于追赶处理。

尽管追赶处理诱导的耗氧峰值和 EPOC 大于空气曝露,观察发现空气曝露处理对黄颡鱼生理影响可能更大(处理后肚皮向上,体表出现大量黏液等)。其原因可能为这两种不同的胁迫因素引起的应激反应有一定差异。一般认为由于追赶导致机体组织能量物质的消耗,其恢复过程耗氧增加的组分主要有:ATP 和 PCr(磷酸肌酸)更新<sup>[4]</sup>、血红蛋白氧化<sup>[10]</sup>、乳酸清除<sup>[4]</sup>、糖原合成<sup>[4]</sup>、底物循环增加<sup>[11]</sup>、儿茶酚胺类激素的释放和体温升高造成耗氧率增加<sup>[12]</sup>等等。而空气曝露对鱼体影响研究主要集中在对血液生化指标<sup>[6]</sup>和体内氮代谢途径的影响上<sup>[13]</sup>,内在机制和可能的组成成分还有待进一步研究。另外,值得一提的是空气曝露对呼吸系统造成损伤可能影响恢复过程的耗氧峰值,因此推测黄颡鱼的皮肤呼吸可能也会对过量耗氧产生一定的影响。实验发现瓦氏黄颡鱼在对照实验处理中没有显示明显的应激反应。测定发现追赶对照处理仅诱导出 1.95 倍耗氧率增加和 2.26 mg O<sub>2</sub> 的过量耗氧。而我们对于南方鲇(*Silurus meridionalis*)的相关研究发现,相同条件下南方鲇能诱导出约 15 mg O<sub>2</sub> 的过量耗氧。这可能因为瓦氏黄颡鱼为毒性较强的淡水鱼,自然条件下天敌少,反应较迟钝。这和实验发现瓦氏黄颡鱼在追赶过程中表现的运动速度和加速度、运动距离均远远小于南方鲇的结果一致(实验室资料)。然而尽管其反应远远小于南方鲇,但黄颡鱼的最大 EPOC 值(5 min 追赶诱导 39.88 mg O<sub>2</sub>)相当于甚至大于相同实验条件

下南方鲇数值(27.24 ~ 41.91 mg O<sub>2</sub>),其内在机制还有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, et al. Excess post-exercise oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon following critical speed swimming. *Journal of Experimental Biology*, 2003, **206**: 3 253 ~ 3 260.
- [ 2 ] Hancock T V, Gleeson T T. Metabolic recovery in the desert iguana (*Dipsosaurus dorsalis*) following activities of varied intensity and duration. *Functional Ecology* 2002, **16**: 40 ~ 48.
- [ 3 ] Milligan C L. Metabolic recovery from exhaustive exercise in rainbow trout. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 1996, **113**: 51 ~ 60.
- [ 4 ] Wakefield A M, Cunjak R A, Kieffer J D. Metabolic recovery in Atlantic salmon fry and parr following forced activity. *Journal of Fish Biology* 2004, **65**: 920 ~ 932.
- [ 5 ] Fu S J, Cao Z D, Peng J L. Effect of meal size on postprandial metabolic response in Chinese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus). *Journal of Comparative Physiology B*, 2006, **176**: 489 ~ 495.
- [ 6 ] 洪磊, 张秀梅. 环境胁迫对许氏平鲈和花鲈血糖、血沉降的影响. *中国水产科学* 2005, **12**: 414 ~ 418.
- [ 7 ] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of fasting and repeat feeding on metabolic rate in southern catfish, *Silurus meridionalis* Chen. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 2005, **38**: 191 ~ 198.
- [ 8 ] Steffensen J F. Some errors in respirometry of aquatic breathers how to avoid and correct for them. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1989, **6**: 49 ~ 59.
- [ 9 ] Chen J Y, Cao Z D, Xie X J. Effect of temperature on resting metabolic rate of *Pelteobag vachelli*. *Journal of Southwest China Normal University* 2003, **28**: 618 ~ 628.
- [ 10 ] McFarlane W J, McDonald D G. Relating intramuscular fuel use to endurance in juvenile rainbow trout. *Physiological and Biochemical Zoology* 2002, **75**: 250 ~ 259.
- [ 11 ] Bahr R, Hansson T T, Sejersted O M. Triglyceride/fatty acid cycling is increased after exercise. *Metabolism*, 1990, **39**: 993 ~ 999.
- [ 12 ] Bahr R. Excess post-exercise oxygen consumption- magnitude, mechanisms, and practical implications. *Acta Physiologica Scandia Suppl*, 1992, **605**: 1 ~ 70.
- [ 13 ] Polez V L P, Moraes G, Santos Neto C. Different biochemical strategies of two Neotropical fish to cope with the impairment of nitrogen excretion during air exposure. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* 2003, **36**: 279 ~ 285.