

# 不同水流速度对虹鳟生长性能、呼吸代谢及免疫相关酶活性的影响\*

代忠义<sup>1</sup>, 高勤峰<sup>1,2\*\*</sup>, 高永刚<sup>3</sup>, 董双林<sup>1,2</sup>

(1. 海水养殖教育部重点实验室(中国海洋大学), 山东 青岛 266003; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 山东省荣成市渔业技术推广站, 山东 威海 264300)

**摘要:** 为研究不同水流速度对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)生长性能、呼吸代谢及其免疫指标的影响,设置静水和每秒0.3、0.6、0.9、1.2倍体长(bl)共5个流速梯度组(0、0.3、0.6、0.9和1.2 bl/s),每个流速组18尾,对体质量为(370.00±5.00)g、体长为(30.0±0.5)cm的虹鳟进行了40d的养殖实验。研究表明:流水组虹鳟的终末体质量、体质量增加率和特定生长率均高于静水组,且0.9 bl/s实验组显著高于0、0.3和0.6 bl/s实验组( $P<0.05$ ),但和1.2 bl/s实验组差异不显著( $P>0.05$ )。流水组虹鳟的总摄食量高于静水组,且在0.9 bl/s实验组的摄食量最高,但其饲料系数最低。各组间肝体指数、脾体指数、心体指数和肥满度均无显著性差异( $P>0.05$ )。流水组的标准代谢和餐后代谢均显著低于静水组( $P<0.05$ )。流水组的谷草转氨酶、谷丙转氨酶、碱性磷酸酶和超氧化物歧化酶活力均高于静水组,0.9 bl/s实验组的谷草转氨酶、谷丙转氨酶和超氧化物歧化酶活力最高,0.6 bl/s实验组的碱性磷酸酶活力最高。过氧化氢酶随着流速的增加呈先升高后降低趋势,0.9 bl/s实验组的活力最高。丙二醛含量随流速的增加呈逐渐降低的趋势,0.6、0.9和1.2 bl/s实验组显著低于0和0.3 bl/s实验组( $P<0.05$ )。研究结果表明:在0.9 bl/s的流速条件下,虹鳟的生长性能和免疫能力均显著提高。长期适度的水流训练(流速0.9 bl/s)能有效降低虹鳟的标准代谢,增强其呼吸代谢能力,提高其免疫能力。

**关键词:** 虹鳟; 流速; 生长性能; 呼吸代谢; 免疫能力

**中图分类号:** S965.23

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-5174(2023)03-133-08

**DOI:** 10.16441/j.cnki.hdxh.20220035

**引用格式:** 代忠义, 高勤峰, 高永刚, 等. 不同水流速度对虹鳟生长性能、呼吸代谢及免疫相关酶活性的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(3): 133-140.

Dai Zhongyi, Gao Qinfeng, Gao Yonggang, et al. Effect of water flow rate on growth performance, respiratory metabolism and immune-related enzyme activities of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(3): 133-140.

水流速度是重要的水环境因子,直接影响着鱼类的生存、生长和发育等一系列生理过程。适当的流速不仅可以促进鱼类的生长,提高能量利用率,还为养殖鱼类带来了充足的溶解氧和清新的水质,为鱼类生长提供了良好的水质环境。在自然界中,大部分鱼类具有趋流性特征,鱼类会根据自身情况选择适合其生存的水流条件。根据鱼的种类不同,其所擅长的运动方式和运动能力也有差异,一些比较活泼的鱼类,例如虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、大西洋鲑鱼(*Salmo salar*)、黄尾鲷(*Seriola lalandi*)等,喜欢生活在具有一定流速的水环境中,部分底栖鱼类例如大菱鲆(*Scoph-*

*thalmus maximus*)、牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)、半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)等更喜欢生活在静水或缓慢的水流中,这些差异直接或间接影响着鱼类的物质转化和能量代谢<sup>[1]</sup>。

虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)隶属硬骨鱼纲(Osteichthyes)鲑科(Salmonidae)大马哈鱼属(*Oncorhynchus*),是一种典型的冷水性硬骨鱼类。因其肉质鲜美、蛋白含量高、肌间刺少而深受国内外广大消费者的喜爱,现已成为世界范围内重要的养殖经济鱼类之一。中国冷水性鲑鳟鱼养殖起步较晚,由于受地理环境的限制,主要在具有冷水资源的地区进行淡水养殖,主要养殖方式有流水或微

\* 基金项目:国家重点研究发展计划项目(2019YFD0901000);国家自然科学基金项目(31872575);山东省重点研究发展计划项目(2021SFGC0701)资助

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2019YFD0901000); the National Natural Science Foundation of China(31872575); the Key Research and Development Program of Shandong Province(2021SFGC0701)

收稿日期:2022-01-13; 修订日期:2022-03-24

作者简介:代忠义(1996—),男,硕士生。E-mail:dzy1996jiayou@163.com

\*\* 通讯作者:E-mail:qfgao@ouc.edu.cn

流水池塘养殖、水库网箱养殖、放牧式养殖和工厂化养殖<sup>[2]</sup>,养殖规模较小,产量较低。海水养殖是实现鲢鳙鱼规模化生产的重要手段,限制我国鲢鳙鱼海水网箱养殖的主要因素是夏季海水温度过高,不适合鲢鳙鱼生存,但在我国黄海中部洼地夏季存在一个巨大的冷水团,其底层水温不高于 10 °C,溶氧充足,水质优良,为鲢鳙鱼的海水养殖提供了优质的自然条件<sup>[3-6]</sup>。2018年5月4日,我国首座全潜式大型网箱“深蓝一号”建成下水,用于在黄海冷水团海域开展鲢鳙鱼养殖,并于2019年取得成功,实现了在低纬度温带开放海域养殖冷水鱼的创新和突破,对中国“蓝色粮仓”的建设及深远海国家战略的发展具有重要意义<sup>[6]</sup>。虹鳟鱼耐盐性广,经过海水驯化后能完全适应海水生活,是海水网箱养殖的优质鱼类之一。相关研究表明,虹鳟对海水的适应性随着规格的增大而增强<sup>[7]</sup>,在海水网箱养殖中,其入海最小规格受入海前的营养状态、盐度、光照等环境条件影响,国外通常将 100 g 的虹鳟转移到海水中进行网箱养殖<sup>[8]</sup>,目前中国主要采用 300~400 g 的虹鳟作为入海规格,经过 2 年的海水网箱养殖,可达到平均体质量 5 kg 的商品鱼规格。水流速度是虹鳟养殖的重要影响因素之一,黄海冷水团的水流速度自冷中心向外逐渐增大,流速最大值约为 30 cm/s<sup>[9-10]</sup>,因此,研究不同流速对虹鳟生长及其生理生化指标的影响具有重要意义。

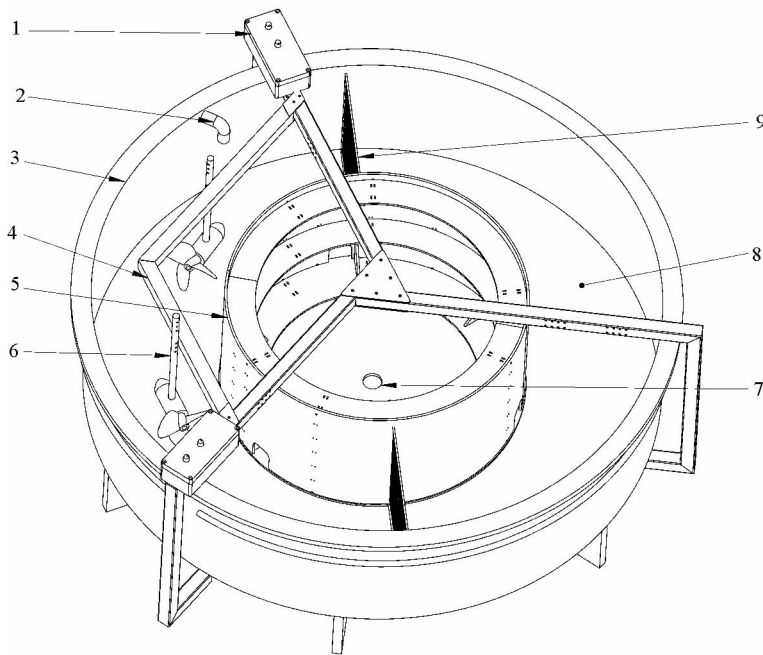
目前,国内关于不同流速对鱼类的影响仅在细鳞鲱(*Brachymystax lenok*)<sup>[11]</sup>、齐口裂腹鱼(*Schizotho-*

*rax prenanti*)<sup>[12]</sup>、红鳍银鲫(*Barbodes schwanenfeldi*)<sup>[13]</sup>和鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)<sup>[14]</sup>中有过相关报道,其主要研究对象为幼鱼,而且都只是短时间内的水流刺激,并不能体现长期不同的水流对鱼类生理生化的影响。国外学者主要研究了不同流速对鲢鳙鱼的肌肉结构<sup>[15]</sup>、心脏功能<sup>[16]</sup>和能量消耗<sup>[17]</sup>等方面的影响,但关于不同流速对虹鳟生长、呼吸代谢和免疫的影响的研究鲜有报道。本实验探究了不同流速对虹鳟生长、呼吸代谢和免疫的影响,以为虹鳟养殖流速的选择提供科学的理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料和装置

实验用鱼为体格健壮、活性较好的二倍体虹鳟,购于临沂市沂水县万泽丰养殖场,平均体质量为(370.00±5.00) g,平均体长为(30.0±0.5) cm。淡水暂养 3 d 后进行盐度驯化,初始盐度为 0,盐度每天升高 2,直至盐度 30,使虹鳟完全适应海水生活,随后开始流速养殖实验。如图 1 所示,实验采用环形泳道装置,在直径 2.3 m、高 0.5 m 的圆柱形养殖池(2.08 m<sup>3</sup>)中,通过装置圆桶和螺旋桨使之形成一个宽度为 0.55 m、高度为 0.5 m 的环形泳道,通过调节螺旋桨的转速来调节水流速度,使用流速计 LS300-A(北京韩泰)测量水流速度,在螺旋桨推进器前后设置拦网,拦网可自由移动,以便选取流速相对稳定的区域进行实验。



(1. 变频器; 2. 进水口; 3. 水槽; 4. 支架; 5. 圆筒; 6. 螺旋桨; 7. 排水口; 8. 游泳区域; 9. 拦网。1. Speed controller; 2. Water inlet; 3. Water channel; 4. Supports; 5. Cylinder; 6. Propeller; 7. Water outlet; 8. Swimming area; 9. Wire grid.)

图 1 实验装置

Fig.1 Experimental equipment

## 1.2 实验设计及样品采集

本实验共设置5个流速处理组,分别为0、0.3、0.6、0.9和1.2 bl/s,即每秒流速为0的静水组和每秒流速分别为0.3、0.6、0.9和1.2倍实验鱼初始体长(body length, bl, 30 cm)的流水组,将90尾虹鳟均匀地分于5个流速处理组,每组18条,在一周内逐渐将水流速度调节到所需流速。每天使用流速计测2次流速,使流速保持稳定。在整个实验期间,流速和其他养殖环境条件保持恒定。养殖用水为砂滤处理的自然海水,盐度为30,溶解氧为7~8 mg/L,自然光照,每天饱食投喂2次(早8:00和晚19:00)。由于实验饲料为沉性饲料,为保证实验鱼正常摄食,所以投喂时暂停水流约40 min(短时间的停止水流不会对实验结果产生显著影响)。摄食后收集残饵粪便,并将流速调到设定流速。每天换水量为全部水量的1/4,40 d养殖实验结束后,停食24 h,进行样品采集。本实验将每尾鱼视为一个独立样本进行取样,每个处理组随机取虹鳟8尾,麻醉后称量体质量,测量体长,随后使用2.5 mL注射器进行尾静脉取血,并在冰盘上进行活体解剖,取出肌肉、肝脏、胃和肠道组织,液氮迅速冷冻后转移至-80 °C冰箱中,保存备用。将血液样品注入抗凝管中,3 000 r/min转速离心15 min,抽取上清液,并置于-80 °C条件下保存。

## 1.3 呼吸代谢率的测定

由于本实验采用的环形泳道装置体积相对较小,虽然水体与空气有接触,但由于是在静水条件下测定水中溶解氧的变化,测定过程中并无水体流动,并且两次记录溶解氧读数的间隔时间较短,所以短时间内空气和静止小水体间的氧气交换可忽略不计,且在测定开始前,对不放鱼的泳道连续3次监测水中溶解氧含量的变化,每次间隔10 min,发现溶解氧含量并无显著变化,因此本实验采用开放法测定标准呼吸代谢和餐后代谢速率。在养鱼的泳道中,连续3次监测水中溶解氧含量的变化,每次间隔10 min,通过水体中溶解氧减少量计算耗氧率,以耗氧率代表呼吸代谢率。公式如下:耗氧率(mg/(kg·h))=(初始溶解氧(mg/L)-终末溶解氧(mg/L))×水容积(L)/(鱼体质量(kg)×耗时(h))。

## 1.4 免疫指标的测定

碱性磷酸酶、谷草转氨酶、谷丙转氨酶活性的测定采用全自动生化分析仪Cobas C-311(Hitachi High-Technologies Corporation, Mannheim, Germany),试剂盒由罗氏诊断公司提供。超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性、丙二醛含量和蛋白含量均采用南京建成试剂盒测定。超氧化物歧化酶用WST-1法测定,在450 nm处比色测定吸光度值计算其活性,过氧化氢酶

采用钼酸铵法测定,在405 nm处测定H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>变化量,从而计算出过氧化氢酶活性,丙二醛含量采用TBA法测定,在532 nm处比色测定吸光度值计算其含量,蛋白含量采用BCA微板法测定。

## 1.5 数据统计分析

采用SPSS v25.0软件对所测定数据进行单因素方差分析。若方差分析显著,进一步进行邓肯多重比较,分析组间差异显著性,显著水平设定 $P < 0.05$ 。实验数据采用平均值±标准差(Mean±SD)表示,摄食量以每个实验组在养殖期间摄入的总食物量表示。

## 2 结果

### 2.1 不同流速对虹鳟生长的影响

经过40 d不同流速的养殖实验,虹鳟的生长指标如表1所示。随着流速的增加,虹鳟的终末体质量、体质量增加率、特定生长率、肝体指数都呈先升高后降低的趋势,在流速为0.9 bl/s时达到最大值,其终末体质量、体质量增加率和特定生长率均显著高于流速为0、0.3和0.6 bl/s的实验组( $P < 0.05$ ),而和1.2 bl/s的实验组差异不显著( $P > 0.05$ )。此外,各流速组间的肝体指数、肥满度、心体指数和脾体指数差异不显著( $P > 0.05$ )。总摄食量在0.9 bl/s的流速条件下最高,在0 bl/s的流速条件下最低。饲料系数在0.9 bl/s的流速条件下最低。流速为0和0.3 bl/s的实验组中虹鳟的存活率低于流速为0.6、0.9和1.2 bl/s的实验组。

### 2.2 不同流速对虹鳟呼吸代谢的影响

如图2A所示,所有流水组虹鳟的标准代谢均显著低于静水组( $P < 0.05$ )。随着流速的增加,虹鳟的标准代谢呈先降低后升高的趋势。在0.9 bl/s的流速条件下,虹鳟的标准代谢最低,显著低于流速为0和1.2 bl/s的实验组( $P < 0.05$ ),而流速为0.3、0.6和1.2 bl/s的实验组间标准代谢差异并不显著( $P > 0.05$ ) (见图2A)。此外,流水组的餐后代谢率显著低于静水组( $P < 0.05$ ),而不同流速组之间差异不显著( $P > 0.05$ ) (见图2B)。

### 2.3 不同流速对虹鳟免疫的影响

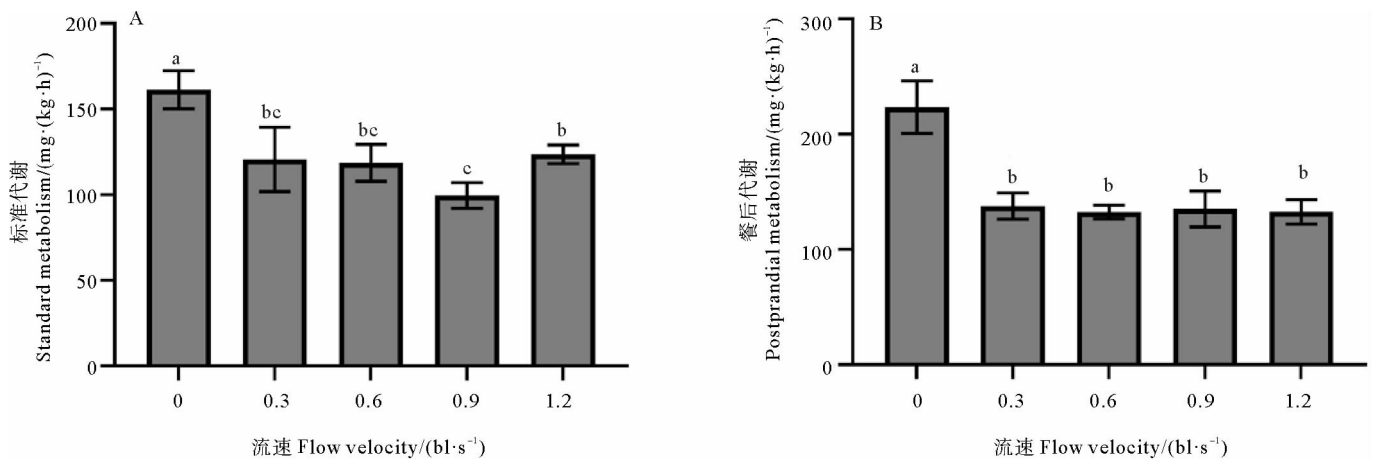
不同流速条件下,虹鳟的免疫指标变化情况如图3所示。随着流速的增加,虹鳟血浆中超氧化物歧化酶活力呈先升高后降低的趋势,并在流速为0.9 bl/s时达到最高值,显著高于流速为0、0.3、0.6和1.2 bl/s的实验组( $P < 0.05$ ) (见图3A)。此外,不同水流条件下,碱性磷酸酶活力与超氧化物歧化酶活力具有相似的变化趋势。随着流速的增加,虹鳟血浆中的碱性磷酸酶活力同样呈先升高后降低的趋势,然而碱性磷酸酶活力在流速为0.6 bl/s时达到最高值,并显著高于流速为0、0.3、0.9和1.2 bl/s的实验组( $P < 0.05$ ,见

表1 不同流速对虹鳟生长性能的影响

Table 1 Effects of different flow rates on growth performance of rainbow trout

性能指标 Performance indicators	流速 Flow velocity				
	0 bl/s	0.3 bl/s	0.6 bl/s	0.9 bl/s	1.2 bl/s
初始体质量 Initial body mass/g	370.00±5.00	370.00±5.00	370.00±5.00	370.00±5.00	370.00±5.00
终末体质量 Final body mass/g	484.08±51.99 <sup>b</sup>	496.50±78.04 <sup>b</sup>	506.69±80.02 <sup>b</sup>	571.03±87.16 <sup>a</sup>	518.28±78.46 <sup>ab</sup>
体质量增加率 Body mass gain rate/%	30.83±14.05 <sup>b</sup>	34.19±21.09 <sup>b</sup>	36.94±21.63 <sup>b</sup>	52.23±24.41 <sup>a</sup>	40.08±21.21 <sup>ab</sup>
特定生长率 Specific growth rate/%	0.66±0.27 <sup>b</sup>	0.75±0.37 <sup>b</sup>	0.76±0.39 <sup>b</sup>	1.06±0.36 <sup>a</sup>	0.82±0.37 <sup>ab</sup>
肥满度 Condition factor/%	1.29±0.07 <sup>a</sup>	1.36±0.12 <sup>a</sup>	1.28±0.07 <sup>a</sup>	1.36±0.13 <sup>a</sup>	1.33±0.08 <sup>a</sup>
心体指数 Cardiac somatic index/%	0.10±0.02 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>a</sup>	0.12±0.03 <sup>a</sup>	0.11±0.01 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>a</sup>
肝体指数 Hepatosomatic index/%	1.36±0.23 <sup>a</sup>	1.38±0.25 <sup>a</sup>	1.49±0.33 <sup>a</sup>	1.66±0.20 <sup>a</sup>	1.35±0.16 <sup>a</sup>
脾体指数 Spleen somatic index/%	0.12±0.04 <sup>a</sup>	0.13±0.06 <sup>a</sup>	0.10±0.03 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>a</sup>	0.11±0.03 <sup>a</sup>
摄食量 Feed intake/g	2 767.32	3 170.86	3 395.89	4 309.88	3 341.90
饲料系数 Feed conversion ratio	1.47	1.56	1.49	1.31	1.32
存活率 Survival rate/%	88.89	88.89	94.44	94.44	94.44

注:不同字母表示同一行数据之间差异显著( $P<0.05$ )。Different letters indicate significant differences between the same row of data ( $P<0.05$ )。)



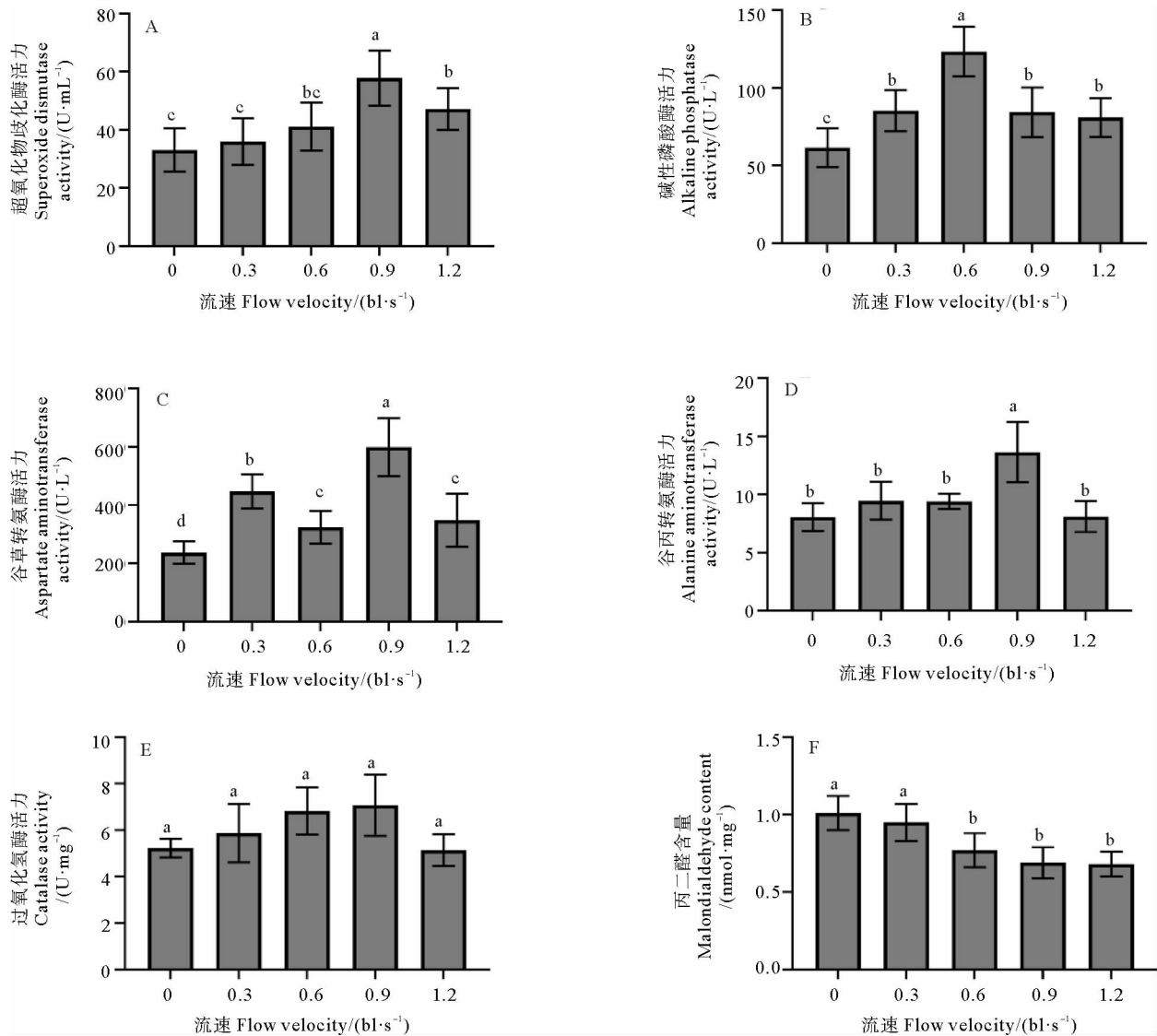
(不同小写字母代表差异显著( $P<0.05$ )。Different lowercase letters represent significant differences ( $P<0.05$ ).)

图2 不同水流速度对虹鳟标准代谢和餐后代谢的影响

Fig.2 Effects of different water flow rates on standard metabolism and postprandial metabolism of rainbow trout

图3B),其他各流水组间碱性磷酸酶活力无显著性差异,均高于静水组( $P>0.05$ ,见图3B)。如图3C所示,随着流速的增加,虹鳟血浆中的谷草转氨酶活力呈先升高后降低再升高再降低的趋势。在流速为0.9 bl/s时虹鳟血浆中谷草转氨酶活力最高,其次为0.3 bl/s的实验组,且均显著高于流速为0、0.6和1.2 bl/s的实验组( $P<0.05$ )。虹鳟血浆中谷丙转氨酶活力在流

速为0.9 bl/s的实验组显著升高,其余各组间无显著性差异(见图3D)。此外,不同流速条件下,虹鳟肝脏中过氧化氢酶活力和丙二醛含量如图3E和3F所示。随着流速的增加,虹鳟肝脏中过氧化氢酶活力呈先升高后降低的趋势,但并不存在显著性差异( $P>0.05$ )。流速为0.6、0.9和1.2 bl/s的实验组丙二醛含量显著低于流速为0和0.3 bl/s的实验组( $P<0.05$ ,见图3F)。



(不同小写字母代表差异显著( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ))

图3 不同流速对虹鳟超氧化物歧化酶、碱性磷酸酶、谷草转氨酶、谷丙转氨酶、过氧化氢酶、丙二醛的影响

Fig.3 Effects of different flow rates on superoxide dismutase, alkaline phosphatase, aspartate aminotransferase, alanine aminotransferase, catalase and malondialdehyde of rainbow trout

### 3 讨论

#### 3.1 不同流速对虹鳟生长的影响

通过本研究发现,经过 40 d 不同流速的养殖实验,0.9 bl/s 的流速显著提高了虹鳟的体质量增加率和特定生长率,其他各流速组在统计学上无显著差异,但流水组的体质量增加率和特定生长率均高于静水组。水流增加了食物的消耗,且在 0.9 bl/s 流速下摄食量最大,但饲料系数最低、生长最快。推测可能是运动训练提高了虹鳟的消化能力,使其对能量的利用效率提高,且水流可能减少了虹鳟个体间的压力和斗争情况,使更多的能量用于生长。相似的研究结果也在其他鱼类中被发现,Li 等<sup>[18]</sup>研究表明,有氧训练提高了中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)幼鱼的摄食量,促进了其生

长并提高消化酶活力,Castro 等<sup>[19]</sup>分别以 0.8 和 1 bl/s 的流速对大西洋鲑进行了 6 周持续性和间断性有氧训练,结果表明经过有氧训练的鱼比未经过训练的鱼具有更好的生长性能和游泳能力。在对褐鳟(*Salmo trutta*)的研究中发现,经过 14~28 d 的水流训练,和静水组相比,在流速为 1.5 bl/s 的条件下,鱼的生长速度更快,食物转化效率更高<sup>[20]</sup>,然而过大的流速(4.5 bl/s)严重损害了鱼体健康,致使其死亡率达到 70%。Leon<sup>[21]</sup>研究发现,在有水流的条件下,美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)不仅提高了生长和身体的健壮性,且饲料系数也有所降低。在本实验中,运动训练对心体指数、肝体指数、脾体指数和肥满度均无显著影响(见表 1),但 0.9 bl/s 组的心体指数、肝体指数均高于其他组,这和 Castro 的研究结果相类似,大西洋鲑经过 10 周的运动

训练提高了其心脏质量<sup>[22]</sup>,这可能为其快速生长提供了支撑。

### 3.2 不同流速对虹鳟呼吸代谢的影响

呼吸代谢是动物最基本的生命活动,其代谢强度与环境因素有密切的关系。鱼类代谢包括标准代谢、特殊动力作用和活动代谢<sup>[23]</sup>。标准代谢是鱼类在禁食和安静状态下的代谢,特殊动力作用是动物在进食后一段时间内,由食物刺激机体产生额外热量消耗的作用。相关研究表明,持续性有氧训练可以提高鱼类的心脏功能以及呼吸系统能力,主要包括最大耗氧量<sup>[24]</sup>、组织氧提取<sup>[25]</sup>、最大心输出量<sup>[22]</sup>、红细胞压积<sup>[26]</sup>和相对心脏大小<sup>[27]</sup>等。在本实验中,经过40 d的养殖实验,流水组的标准代谢显著低于静水组,0.9 bl/s的流速对标准代谢降低最大。由此表明适当的流速可显著降低虹鳟的标准代谢,这与先前对虹鳟的研究结果相类似,流水养殖虹鳟的标准代谢显著低于静水养殖<sup>[28]</sup>。在摄食0.5 h后,虹鳟的标准代谢均高于摄食前的标准代谢,这可能是因为食物的摄入而产生了特殊动力作用引起的,且摄食后静水组的标准代谢显著高于流水组,流水组间差异不显著。这可能与流速刺激提高了虹鳟呼吸能力和身体的健壮性有关,持续性的水流增强了虹鳟的鱼体素质,使其适应了持续性的运动,当没有水流刺激时,其维持所需的能量相比于未经过训练的鱼更低。相关的研究在大西洋鲑<sup>[29]</sup>和瓦氏黄颡鱼(*Peltebagrus vachelli*)<sup>[30]</sup>中也有报道,在对野生大西洋鲑进行了18 d的运动训练实验中,发现运动训练改变了大西洋鲑心脏呼吸系统的可塑性,提高了其呼吸能力。瓦氏黄颡鱼经过21 d的训练后,其标准代谢和餐后代谢未发生显著变化,这与本实验结果恰好相反,其原因可能是鱼的种类、大小和训练方案的不同。

### 3.3 不同流速对虹鳟免疫的影响

提高养殖鱼类的生长性能和免疫力是水产养殖的重要目标。相关研究表明,有氧训练可以提高鱼的生长和抗病能力<sup>[19]</sup>。免疫酶活性是衡量鱼类健壮性和抗病能力的重要指标,一般认为谷草转氨酶、谷丙转氨酶和碱性磷酸酶在机体非特异性免疫反应中发挥着重要作用。在本实验中,随着流速的增加,谷草转氨酶、谷丙转氨酶和碱性磷酸酶活力均呈先增加后降低的趋势,谷草转氨酶和谷丙转氨酶的活力在0.9 bl/s条件下最高,而碱性磷酸酶的活力在0.6 bl/s条件下最高,显著高于其他4组,说明有氧训练可以提高虹鳟的非特异性免疫能力,机体在有水流的条件下,能调整自身的生理状况以适应环境的变化,且在0.9 bl/s条件下对提高虹鳟的生长性能和免疫力较有利。有研究表明,有氧运动会增加活性氧的产生<sup>[31]</sup>,在机体内,细胞不断产生自由基和活性氧作为代谢过程的一部分,当

活性氧积累过多时,就会对机体产生影响。目前大多数研究使用丙二醛作为由运动引起的氧化应激的测量指标。超氧化物歧化酶可以催化超氧阴离子,使自由基歧化生成氧和过氧化氢从而对机体起到保护作用,过氧化氢酶作为机体重要的抗氧化酶,可以分解歧化反应产生的最终产物,将过氧化氢分解成水和氧气。在本实验中,超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的活力随流速的增加呈先升高再降低趋势,在流速为0.9 bl/s条件下活性最高,丙二醛含量则呈逐渐降低的趋势。说明有氧训练有助于提高机体的抗氧化能力,机体在长期的运动条件下健壮性和免疫力得到了提高,有利于其生命活动的进行。

## 4 结论

本研究表明,经过40 d的养殖实验,在流速为0.9 bl/s(27 cm/s)的条件下,可显著提高虹鳟的生长性能和免疫能力,同时也显著降低了虹鳟的标准代谢。该结果与目前黄海冷水团最大流速30 cm/s的水文条件及虹鳟入海规格300~400 g的生产实际相吻合。本研究结果可为虹鳟海水养殖选择适宜的流速条件和适宜的入海规格提供参考。

### 参考文献:

- [1] 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 X J. Feeding metabolism and locomotion metabolism in fishes[J]. Chinese Journal of Zoology, 2008, 43(2): 150-159.
- [2] 赵淑梅. 我国冷水鱼养殖的概况和思考[J]. 科学养鱼, 2011, 264(8): 1-2.  
Zhao S M. General situation and thinking of cold water fish culture in China[J]. Scientific Fish Farming, 2011, 264(8): 1-2.
- [3] Uda M. The results of simultaneous oceanographical investigations in the North Pacific Ocean adjacent to Japan made in August, 1933 [J]. Journal of the Imperial Fish Experimental Station, 1935, 6: 1-130.
- [4] 赫崇本,汪圆祥,雷宗友,等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1959, 11(1): 11-15.  
He C B, Wang Y X, Lei Z Y, et al. A preliminary study on the generation and the characteristics of the Cold Water Mass of the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1959, 11(1): 11-15.
- [5] 张竹琦. 黄海和东海北部夏季底层溶解氧最大值和最小值特征分析[J]. 海洋通报, 1990, 9(4): 22-26.  
Zhang Z Q. On maximum and minimum dissolved oxygen with bottom layer in Yellow Sea and Noethern East China Sea in summer [J]. Marine Science Bulletin, 1990, 9(4): 22-26.
- [6] 董双林. 黄海冷水团大型鲑科鱼类养殖研究进展与展望[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 1-6.  
Dong S L. Researching progresses and prospects in large salmonidae farming in Cold Water Mass of Yellow Sea[J]. Periodical of

- Ocean University of China, 2019, 49(3): 1-6.
- [7] Johnsson J, Clarke W C. Development of seawater adaptation in juvenile steelhead trout (*Salmo gairdneri*) and domesticated rainbow trout (*Salmo gairdneri*)—effects of size, temperature and photoperiod[J]. Aquaculture, 1988, 71(3): 247-263.
- [8] Landless P J. Acclimation of rainbow trout to sea water[J]. Aquaculture, 1976, 7(2): 173-179.
- [9] 袁业立. 黄海冷水团环流——I. 冷水团中心部分的热结构和环流特征[J]. 海洋与湖沼, 1979, 10(3): 187-196.  
Yuan Y L. Circulation of the Yellow Sea Cold Water Mass: Thermal structure and circulation characteristics of the central part of the cold water mass[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1979, 10(3): 187-196.
- [10] 石洪源, 袁晓凡. 海水资源利用产业发展现状与前景研究[M]. 广州: 广东经济出版社, 2018: 144-147.  
Shi H Y, Yuan X F. Study on Development Status and Prospect of Seawater Resource Utilization Industry[M]. Guangzhou: Guangdong Economic Publishing House, 2018: 144-147.
- [11] 徐革锋, 牟振波, 韩英, 等. 温度和流速对细鳞鲈(*Brachymystax lenok*)幼鱼游泳能力的影响及其与呼吸代谢的关系[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(4): 786-792.  
Xu G F, Mou Z B, Han Y, et al. Effect of temperature and flow velocity on swimming of juvenile manchurian trout *Brachymystax lenok* (pallas) and the relationship to respiratory metabolism[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(4): 786-792.
- [12] 韩京成, 曹婷婷, 刘国勇, 等. 温度和流速对齐口裂腹鱼幼鱼呼吸代谢的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2010, 56(1): 81-86.  
Han J C, Cao T T, Liu G Y, et al. Effect of temperature and flow velocity on the respiratory metabolism of *Schizothorax prenanti* Juveniles[J]. Journal of Wuhan University(Natural Science Edition), 2010, 56(1): 81-86.
- [13] 宋波澜, 林小涛, 王伟军, 等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化[J]. 动物学报, 2008, 54(4): 686-694.  
Song B L, Lin X T, Wang W J, et al. Effects of water velocities on rheotaxis behaviour and oxygen consumption rate of tinfoil barb *Barbodes schwanenfeldi* [J]. Current Zoology, 2008, 54(4): 686-694.
- [14] 梁园园, 林晨宇, 陈廷, 等. 鲢幼鱼在不同水流速度下的暴发-滑翔行为策略[J]. 水生生物学报, 2016, 40(6): 1187-1193.  
Ling Y Y, Lin C Y, Chen T, et al. The burst-gliding behavior strategy of juvenile silver carp at different flow speeds[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, 40(6): 1187-1193.
- [15] Davie P S, Wells R M G, Tetens V. Effects of sustained swimming on rainbow trout muscle structure, blood oxygen transport, and lactate dehydrogenase isozymes: Evidence for increased aerobic capacity of white muscle[J]. Journal of Experimental Zoology, 1986, 237(2): 159-171.
- [16] Farrell A P, Johansen J A, Suarez R K. Effects of exercise-training on cardiac performance and muscle enzymes in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 1991, 9(4): 303-312.
- [17] Kieffer J D, Alsop D, Wood C M. A respirometric analysis of fuel use during aerobic swimming at different temperatures in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Journal of Experimental Biology, 1998, 201(22): 3123-3133.
- [18] Li X M, Yu L J, Wang C, et al. The effect of aerobic exercise training on growth performance, digestive enzyme activities and postprandial metabolic response in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2013, 166(1): 8-16.
- [19] Castro V, Grisdale-Helland B, Helland S J, et al. Aerobic training stimulates growth and promotes disease resistance in Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular Integrative Physiology, 2011, 160(2): 278-290.
- [20] Davison W, Goldspink G. The effect of prolonged exercise on the lateral musculature of the brown trout (*Salmo trutta*)[J]. Journal of Experimental Biology, 1977, 70(1): 1-12.
- [21] Leon K A. Effect of exercise on feed consumption, growth, food conversion, and stamina of brook trout[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1986, 48(1): 43-46.
- [22] Castro V, Grisdale-Helland B, Helland S J, et al. Cardiac molecular-acclimation mechanisms in response to swimming-induced exercise in Atlantic salmon[J]. PLoS One, 2013, 8(1): e55056.
- [23] 崔奕波. 鱼类生物能量学的理论与方法[J]. 水生生物学报, 1989(4): 369-383.  
Cui Y B. Bioenergetics of fish: Theory and methods[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1989(4): 369-383.
- [24] Gallagher P E, Thorarensen H, Kiessling A, et al. Effects of high intensity exercise training on cardiovascular function, oxygen uptake, internal oxygen transport and osmotic balance in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) during critical speed swimming[J]. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(16): 2861-2872.
- [25] Farrell A P, Clutterham S M. On-line venous oxygen tensions in rainbow trout during graded exercise at two acclimation temperatures[J]. Journal of Experimental Biology, 2003, 206(3): 487-496.
- [26] Hochachka P W. The effect of physical training on oxygen debt and glycogen reserves in trout[J]. Canadian Journal of Zoology, 1961, 39(6): 767-776.
- [27] Davison W. The effects of exercise training on teleost fish, a review of recent literature[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 1997, 117(1): 67-75.
- [28] Skov P V, Larsen B K, Frisk M, et al. Effects of rearing density and water current on the respiratory physiology and haematology in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* at high temperature[J]. Aquaculture, 2011, 319(3-4): 446-452.
- [29] Zhang Y, Timmerhaus G, Anttila K, et al. Domestication compromises athleticism and respiratory plasticity in response to aerobic exercise training in Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. Aquaculture, 2016, 463: 79-88.
- [30] Li X M, Cao Z D, Peng J L, et al. The effect of exercise training on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile darkbarbel catfish (*Peltebagrus vachelli*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular Integrative Physiology, 2010, 156(1): 67-73.
- [31] Urso M L, Clarkson P M. Oxidative stress, exercise, and antioxidant supplementation[J]. Toxicology, 2003, 189(1-2): 41-54.

## Effect of Water Flow Rate on Growth Performance, Respiratory Metabolism and Immune-Related Enzyme Activities of Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss*

Dai Zhongyi<sup>1</sup>, Gao Qinfeng<sup>1,2</sup>, Gao Yonggang<sup>3</sup>, Dong Shuanglin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mariculture(Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266003, China; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Rongcheng Fisheries Technology Promotion Station, Weihai 264300, China)

**Abstract:** In the present study, we examined the effects of different water flow rates on growth, respiratory metabolism and the activities of immune-related enzymes of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. Fish individuals with body mass of  $(370.00 \pm 5.00)$  g and body length of  $(30.0 \pm 0.5)$  cm were cultured for 40 days at 5 water flow rates including static water and 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 time of body length (bl) (0, 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 bl/s) and 18 fish individuals were used each group. The results showed that the final body mass, body mass gain rate and specific growth rate of rainbow trout under flowing conditions were higher than those under static conditions, and the experimental group of 0.9 bl/s was significantly higher than those of 0, 0.3 and 0.6 bl/s ( $P < 0.05$ ), but there was no significant difference from the experimental group of 1.2 bl/s ( $P > 0.05$ ). The total feed intake rates of rainbow trout under flowing conditions were higher than those under static conditions, and the feed intake rates were the highest under 0.9 bl/s, but the feed coefficients were the lowest. There was no significant difference in hepatosomatic index, spleen somatic index, cardiac somatic index and fatness among all groups ( $P > 0.05$ ). The standard metabolic rates and postprandial metabolic rates under flowing conditions were significantly lower than those under static conditions ( $P < 0.05$ ). The activities of aspartate aminotransferase, alanine aminotransferase, alkaline phosphatase and superoxide dismutase under flowing conditions were higher than those under static conditions. The activities of aspartate aminotransferase, alanine aminotransferase and superoxide dismutase in 0.9 bl/s group were the highest, and the activities of alkaline phosphatase in the 0.6 bl/s group were highest. Catalase activities increased and then decreased with the increasing flow rates, and the highest activity was found at the water flow rate of 0.9 bl/s. The content of malondialdehyde decreased gradually with increasing flow rate, 0.6, 0.9 and 1.2 bl/s were significantly lower than 0 and 0.3 bl/s ( $P < 0.05$ ). The results showed that the growth and immunity of rainbow trout were significantly improved under the water flow rate of 0.9 bl/s. Long-term moderate water flow training (0.9 bl/s) can effectively reduce the standard metabolism of rainbow trout, and enhance the ability of respiratory system and improve the immune capacity.

**Key words:** rainbow trout; flow rate; growth performance; respiratory metabolism; immune capacity

责任编辑 朱宝象