

持续水流刺激对青鱼幼鱼体型特征的影响^①

李秀明^{1,2}, 徐 桂¹, 付世建², 张耀光¹

1. 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;

2. 重庆师范大学 进化生理与行为学实验室/重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331

摘要: 为了考察持续水流刺激对青鱼幼鱼体型特征的影响, 在 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 水温条件下, 将大小相当的 144 尾体质量为 $(11.90 \pm 0.24)\text{g}$ 、体长为 $(8.94 \pm 0.31)\text{cm}$ 的实验鱼随机分为对照组、9 cm/s、18 cm/s 和 36 cm/s 处理组, 分别在不同水流速度下处理 8 周. 随后从各组中各随机挑选 12 尾实验鱼, 测量分析其体型特征参数变化. 结果显示: 9 cm/s 处理组的头长和头长/体长显著大于对照组($p < 0.05$); 18 cm/s 处理组的头长、头高、体高、叉长、鱼体侧面积和头长/体长显著大于对照组($p < 0.05$); 36 cm/s 处理组的头长、头高、尾柄下侧长度、尾柄侧面积、头长/体长和尾柄侧面积/鱼体侧面积显著大于对照组($p < 0.05$), 其他形态参数较对照组无显著差异. 结果表明: 持续水流刺激显著影响了青鱼幼鱼的体型特征; 高流速(36 cm/s)刺激下青鱼幼鱼的尾柄面积显著增加, 这可能有利于其游泳能力的改善.

关键词: 水流; 体型特征; 青鱼

中图分类号: Q959.46⁺8

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)02-0022-06

在自然水域中, 水流速度不仅依赖于地理条件差异, 还受到季节变化和人为活动的影响. 大量研究发现, 水流速度变化对鱼类的生长能力、组织形态、生理特征和行为策略等方面都有极为显著的影响^[1]. 鱼类的体型与其运动能力密切相关, 其特征不仅与鱼的种类有关, 还受到各种生态因素的显著影响^[2-5]. 有研究发现, 生活在野外不同流速环境中的鱼类之间其鱼鳍形状和体型特征具有显著差异^[6]. 在实验室条件下, 持续的水流刺激也能够改变鲤鱼 *Cyprinus carpio*、剑尾鱼 *Xiphophorus montezumae* 和中华倒刺鲃 *Spinibarbus sinensis* 的体型特征^[7-9]. 研究者认为, 这些体型特征的改变可能有利于鱼类游泳能力和能耗效率的提高, 进而影响鱼类的生存能力和能量分配模式. 以往的研究者主要关注水流刺激对鱼类生长、肌肉结构和生理特征的影响^[1, 10-11], 而有关鱼类在不同流速条件下体型特征变化的研究资料还相对较少.

青鱼 *Mylopharyngodon piceus*, 属鲤形目、鲤科、青鱼属, 作为我国淡水养殖四大家鱼之一, 是长江中下游水域的重要渔业资源及人工养殖主要经济鱼类. 目前已有大量研究涉及青鱼的生长发育和遗传特性等方面, 但对其体型特征及影响因素的研究还鲜有报道^[12-14]. 本实验以青鱼幼鱼为研究对象, 研究其不同流速下体型特征参数的变化, 以期对青鱼增殖放流等资源保护和利用实践提供一定的基础资料.

① 收稿日期: 2016-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31302160); 高等学校学科创新引智计划(111 计划)建设项目(B14037); 中国博士后科学基金项目(2014M562271); 重庆市科委重大项目(cstc2014yykfC80001); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA80007); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ1400506); 重庆师范大学基金项目(14XLB001).

作者简介: 李秀明(1979-), 男, 重庆大渡口人, 博士研究生, 副教授, 主要从事鱼类生理生态研究.

通信作者: 张耀光, 教授, 博士研究生导师.

1 材料和方法

1.1 实验鱼的来源与驯养

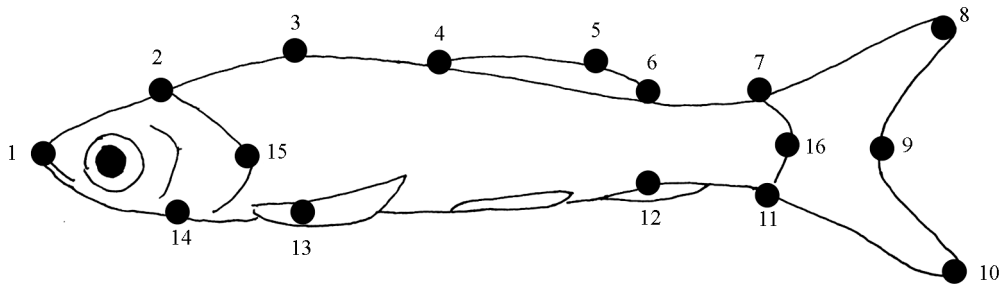
本实验所用的青鱼幼鱼来源于重庆北碚歇马鱼种养殖场(重庆). 实验前将其放入室内循环水养殖系统中养殖 4 周, 以浮性颗粒饲料为饵料(通威公司), 每天饱足投喂 1 次, 每隔 2 d 用充分曝气的自来水置换养殖水体水量的 10%. 驯养期间养殖水体溶氧水平控制在大于 6 mg/L, 水体温度控制在 $(25\pm0.5)^\circ\text{C}$, 光照制度设定为 12L : 12D.

1.2 实验方案

本实验采用自主研制的“鱼类运动训练仪”对实验鱼进行不同流速刺激处理, 详细描述见参考文献[9]. 驯养期结束后, 将实验鱼禁食 1 d 后用质量浓度为 50 mg/L 的 3-氨基苯甲酸乙酯甲基磺酸盐(MS-222)轻度麻醉, 选取平均体质量和体长分别为 (11.90 ± 0.24) g 和 (8.94 ± 0.31) cm 的青鱼幼鱼 144 条, 随机均分为对照组、9 cm/s 处理组、18 cm/s 处理组和 36 cm/s 处理组. 再将每组 36 尾实验鱼随机均分到同一条游泳水道的 3 个单元格中(每个单元格 12 尾实验鱼). 实验期间对照组水道流速始终控制在大约 3 cm/s 左右(预备实验发现此流速有利于水道内水体循环, 但不至于诱导实验鱼的游泳运动), 另外 3 个水流处理组水道初始绝对流速各自为 9、18 和 36 cm/s, 实验鱼每天经历 18 h 的不同流速刺激. 训练历时 8 周, 用 4 d 时间逐步提高流速直至达到正式实验所需的流速以减少对实验鱼的生理胁迫. 随着鱼体生长, 根据其体长每 2 周调整 1 次流速. 正式实验期间投喂及水温等其他条件与驯养期间一致.

水流刺激处理周期结束之后, 将所有实验鱼禁食 1 d, 分别从各组中随机选取 12 尾实验鱼(每个单元格各 4 尾), 用过量质量浓度(400 mg/L)的 MS-222 麻醉致死, 然后将实验鱼左侧朝上平放在带有直尺的白色背景板上, 利用相机(Canon IX-US105)拍取照片^[9].

采用 TpsDig 软件对每张照片 16 个特征点进行标记(图 1), 测定实验鱼的相关体型特征参数^[9]. 本实验测定的参数包括: 头长(Head length, HL)、头高(Head depth, HD)、体高(Body depth, BD)、尾柄上侧长(the length of the upper side of caudal peduncle, L_{uc})、尾柄下侧长(the length of the lower side of caudal peduncle, L_{lc})、叉长(Fork length, FL)、体长(Body length, BL)、尾鳍面积(The area of caudal fin, A_c)、背鳍面积(The area of dorsal, A_d)、尾柄侧面积(The side area of caudal peduncle, A_{cp})、鱼体侧面积(The side area of body, A_b).



点 1 至点 9 距离为叉长(FL)、点 1 至点 16 距离为体长(BL)、点 1 至点 15 为头长(HL)、点 2 至点 14 为头高(HD)、点 3 至点 13 为体高(BD)、点 6 至点 7 为尾柄上侧长(L_{uc})、点 11 至点 12 为尾柄下侧长(L_{lc})、点 6, 7, 16, 11 和 12 依次连线所围面积为尾柄侧面积(A_{cp})、点 4, 5 和 6 所围成的面积为背鳍面积(A_d)、点 7, 8, 9, 10, 11 和 16 所围成的面积为尾鳍面积(A_c)、点 1, 2, 3, 4, 6, 7, 16, 11, 12, 13 和 14 所围成的面积为鱼体侧面积(A_b).

图 1 青鱼幼鱼相关形态学测量的特征点

运用 TpsRegr 图像处理软件得到各组实验鱼的综合图像, 进而综合分析其体型特征变化情况(图 2). 具体原理详见参考文献[9].

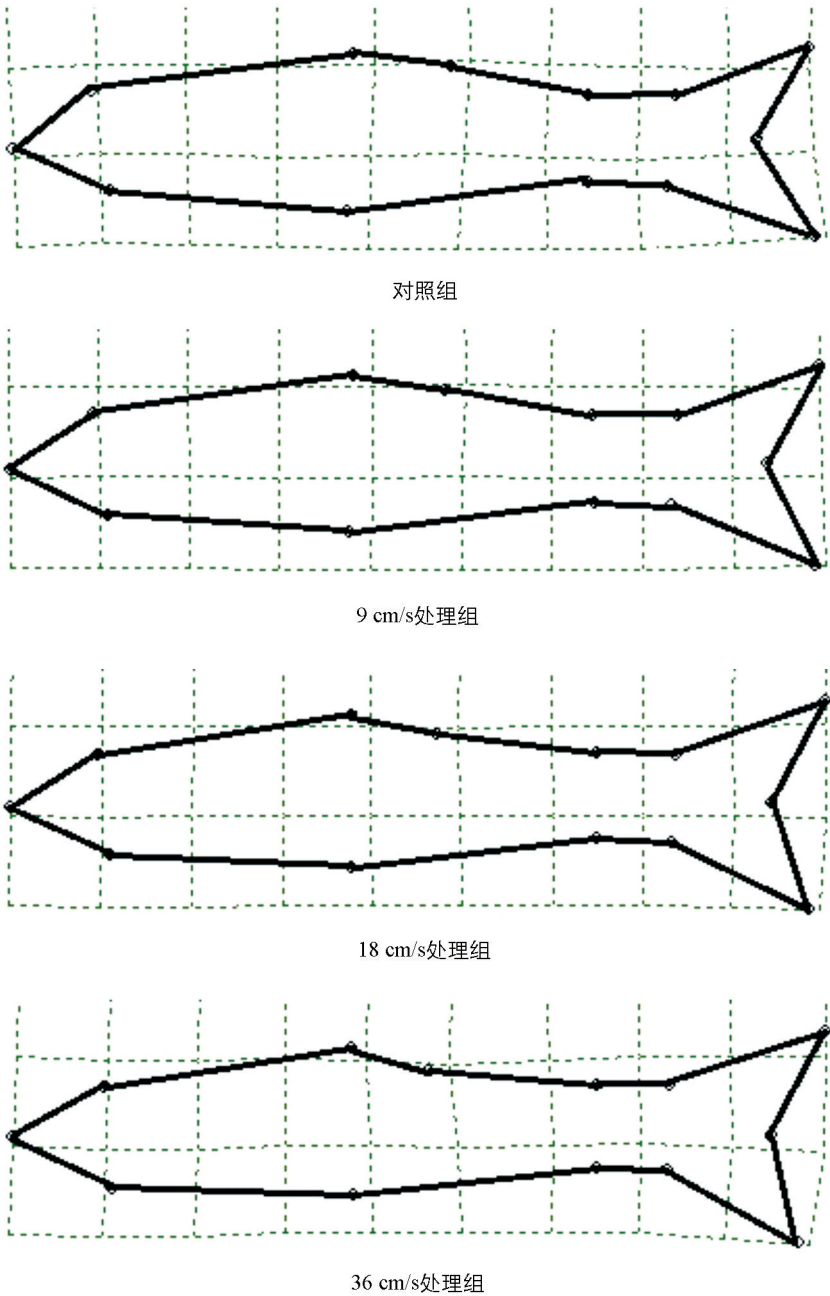


图 2 不同流速刺激后青鱼幼鱼体型变化

1.3 数据统计与分析

运用 EXCEL(2010)对实验数据进行常规计算,以平均值±标准误(Mean±SE)表达.统计分析采用 SPSS 17.0 软件进行.利用单因素方差分析(One-way analysis of variance)检验水流刺激对实验鱼所有体型参数的影响,若有差异显著存在则以 LSD 法进行多重比较,显著性水平设定为 $p<0.05$.

2 结 果

2.1 不同流速刺激后青鱼幼鱼体型图像变化

青鱼在不同流速刺激后,根据 TpsRegr 软件分析所得图像背景网格的弯曲情况发现,不同流速处理组实验鱼图像均呈现出不同程度的变化,其中尾鳍和尾柄的背景网格弯曲较为明显,36 cm/s 处理组的背景网格弯曲最为明显(图 2).

2.2 不同流速刺激对青鱼幼鱼体型特征参数的影响

持续水流刺激对青鱼幼鱼体型参数影响的统计分析结果见表 1. 结果显示, 9 cm/s 处理组、18 cm/s 处理组和 36 cm/s 处理组的 HL 和 HL/BL 显著大于对照组($p<0.05$); 18 cm/s 处理组和 36 cm/s 处理组的 HD 显著大于对照组($p<0.05$), 而 9 cm/s 处理组的 HD 与对照组无显著差异; 9 cm/s 处理组和 36 cm/s 处理组的 BD 和 FL 与对照组无显著差异, 而 18 cm/s 处理组的 BD 和 FL 显著大于对照组($p<0.05$); 18 cm/s 处理组的 L_{uc} 显著小于对照组($p<0.05$), 36 cm/s 处理组的 L_{lc} 显著大于对照组($p<0.05$), 而 9 cm/s 处理组的 L_{uc} 和 L_{lc} 均与对照组无显著差异; 4 个实验组的 $BL, A_c, A_d, HD/BD, BD/BL, L_{lc}/BL, A_c/A_b$ 和 A_d/A_b 之间无显著差异; 36 cm/s 处理组的 A_{cp} 显著大于对照组($p<0.05$), 9 cm/s 处理组和 18 cm/s 处理组的 A_{cp} 与对照组无显著差异; 18 cm/s 处理组的 A_b 显著大于对照组($p<0.05$), 而 9 cm/s 处理组和 36 cm/s 处理组的 A_b 与对照组无显著差异; 9 cm/s 处理组、18 cm/s 处理组和 36 cm/s 处理组的 HL/BL 显著大于对照组($p<0.05$); 9 cm/s 处理组和 18 cm/s 处理组的 L_{uc}/BL 显著小于对照组($p<0.05$), 36 cm/s 处理组的 L_{uc}/BL 与对照组无显著差异; 36 cm/s 处理组的 A_{cp}/A_b 显著大于对照组和 9 cm/s 处理组($p<0.05$), 9 cm/s 处理组和 18 cm/s 处理组的 A_{cp}/A_b 与对照组无显著差异.

表 1 持续水流刺激对青鱼幼鱼体型参数的影响

参数	对照组	9 cm/s 处理组	18 cm/s 处理组	36 cm/s 处理组
头长 HL/mm	23.62±0.34b	25.47±0.47a	25.96±0.34a	25.48±0.65a
头高 HD/mm	15.71±0.25b	16.46±0.28ab	17.14±0.34a	17.10±0.42a
体高 BD/mm	19.04±0.33b	19.44±0.37ab	20.20±0.38a	20.00±0.47ab
尾柄上侧长 L_{uc}/mm	8.28±0.23a	7.67±0.24ab	7.34±0.25b	7.92±0.31ab
尾柄下侧长 L_{lc}/mm	9.04±0.23b	9.36±0.19ab	9.71±0.30ab	9.94±0.26a
叉长 FL/mm	99.10±1.27b	101.64±1.60ab	104.13±1.75a	102.70±2.22ab
体长 BL/mm	89.17±1.15	90.74±1.38	92.99±1.60	92.26±2.02
尾鳍面积 A_c/mm^2	276.68±8.30	312.40±15.82	300.63±17.40	303.67±17.30
背鳍面积 A_d/mm^2	50.35±2.53	51.98±2.83	50.25±2.31	50.95±2.60
尾柄侧面积 A_{cp}/mm^2	100.25±3.53b	103.08±2.77b	112.69±4.53ab	118.09±6.37a
鱼体侧面积 A_b/mm^2	1348.43±37.04b	1396.87±41.40ab	1495.31±51.92a	1458.07±66.15ab
头长/体长 HL/BL	0.26±0.01b	0.28±0.01a	0.28±0.01a	0.28±0.01a
头高/体高 HD/BD	0.83±0.01	0.85±0.01	0.85±0.01	0.86±0.01
体高/体长 BD/BL	0.21±0.01	0.21±0.01	0.22±0.01	0.22±0.01
尾柄长 1/体长 L_{uc}/BL	0.09±0.01a	0.09±0.01b	0.08±0.01b	0.09±0.01ab
尾柄长 2/体长 L_{lc}/BL	0.10±0.01	0.10±0.01	0.10±0.01	0.11±0.01
尾鳍面积/鱼体侧面积 A_c/A_b	0.21±0.01	0.22±0.01	0.20±0.01	0.21±0.01
背鳍面积/鱼体侧面积 A_d/A_b	0.04±0.01	0.04±0.01	0.03±0.01	0.04±0.01
尾柄侧面积/鱼体侧面积 A_{cp}/A_b	0.07±0.01b	0.07±0.01b	0.08±0.01ab	0.08±0.01a

注: 表 1 中同行字母不同表示差异显著($p<0.05$).

3 讨 论

鱼类体型特征的种间和种内差异是其运动方式和运动能力不同的主要原因, 也对其捕食、逃逸、洄游及繁殖等生命活动具有重要影响^[2, 15-17]. 作为影响鱼类生活史的重要生态因子之一, 水流能够通过改变鱼类的体型来影响其游泳能力, 进而影响其生存适合度^[8-9]. 大多数鱼类为了更好地适应水生环境, 在进化过程中体型趋向“流线型”, 这可能与其游泳能力和能耗效率有关. 闫冠杰等^[15]通过对 20 种鲤科鱼类的研究发现, 生境水流速度塑造了鲤科鱼类不同的身体比例(体高/体长)等体型特征, 这是导致其游泳运动能力差异的重要原因. 一些研究发现, 持续水流刺激使鲤鱼、褐鲮 *Salmo trutta* 和剑尾鱼体型变得更为修长^[7-8, 18]. 而另外有研究发现, 持续的高流速刺激使中华倒刺鲃幼鱼和大西洋鲑鱼 *Salmo salar* 的体型更趋向“非流线型”. 研究者认为, 这种体型可能增加其游泳耗能, 减少其生长耗能^[9, 18]. 本研究发现, 不同流速

刺激并没有对青鱼幼鱼的体高/体长比例产生显著性影响(表 1). 由此表明, 水流刺激对不同鱼类体型的影响不尽相同.

鱼鳍在鱼类运动过程中的主要作用是维持平衡、产生动力和控制方向, 对其游泳行为具有重要的影响. 研究发现, 鱼鳍大小、形状及尾柄侧面积是影响鱼类游泳能力和能耗效率的重要因素^[19]. 目前, 有关水流刺激对鱼类尾柄和鱼鳍的影响并没有得到一致性结论. 比如, 持续水流(4.1 cm/s, 7.8 cm/s 和 12.9 cm/s, 32 d)刺激没有对剑尾鱼尾柄和尾鳍面积等特征产生显著性影响^[7]. 一定的水流刺激(60% 临界游泳速度, 15 d, 6 h/d 或 12 h/d)导致鲤鱼幼鱼尾柄侧面积显著增大, 而对尾鳍面积影响不显著^[8]. 中华倒刺鲃幼鱼经过适当水流刺激(10 cm/s 或 21 cm/s, 56 d)后, 其尾柄侧面积也显著增加, 而背鳍和臀鳍面积没有显著变化^[9]. 不过高流速刺激(41 cm/s, 56 d)下其尾柄和鱼鳍都没有发生显著变化. 本研究发现, 经过 36 cm/s 流速刺激 56 d 后, 青鱼幼鱼的尾柄绝对面积和相对面积都显著增加, 这可能有利于增大尾柄摆动幅度和频率, 为其游泳运动提供更多的动力, 进而提高其运动能力. 相似结果在雄性孔雀鱼 *Poecilia reticulata* 的研究中也有发现^[20]. 不过, 青鱼幼鱼尾柄面积的变化在 9 cm/s 或 18 cm/s 流速刺激下却并未发生(表 1). 由此表明, 水流刺激对鱼类体型特征的影响不仅存在种间差异, 与水流强度也密切相关, 其原因有待进一步研究.

参考文献:

[1] DAVISON W. The Effects of Exercise Training on Teleost Fish, A Review of Recent Literature [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 1997, 117(1): 67—75.

[2] BOILY P, MAGNAN P. Relationship Between Individual Variation in Morphological Characters and Swimming Costs in Brook Charr (*Salvelinus fontinalis*) and Yellow Perch (*Perca flavescens*) [J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(7): 1031—1036.

[3] IMRE I, MCLAUGHLIN R L, NOAKES D L G. Phenotypic Plasticity in Brook Charr: Changes in Caudal Fin Induced by Water Flow [J]. Journal of Fish Biology, 2002, 61(5): 1171—1181.

[4] SCHAEFER J, RYAN A. Developmental Plasticity in the Thermal Tolerance of Zebrafish *Danio rerio* [J]. Journal of Fish Biology, 2006, 69(3): 722—734.

[5] 宋昭彬, 何学福. 饥饿状态下南方鲇仔鱼的形态和行为变化 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 1998, 23(4): 462—466.

[6] LEAVY T R, BONNER T H. Relationships among Swimming Ability, Current Velocity Association, and Morphology for Freshwater Lotic Fishes [J]. North American Journal of Fisheries Management, 2009, 29(1): 72—83.

[7] ALCARAZ G, URRUTIA V. Growth in Response to Sustained Swimming in Young Montezumae Swordtails, *Xiphophorus montezumae* [J]. Marine and Freshwater Behaviour and Physiology, 2008, 41(1): 65—72.

[8] 闫冠杰, 曹振东, 彭姜岚, 等. 运动锻炼对鲤鱼幼鱼形态参数的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2011, 28(3): 18—21.

[9] 李秀明, 王 川, 于丽娟, 等. 有氧运动训练对中华倒刺鲃幼鱼形态特征的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(7): 1—6.

[10] 李秀明, 陈红波, 袁建明, 等. 有氧运动训练对 3 种鲤科鱼类摄食, 生长和白肌纤维组织结构特征的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 22—28.

[11] LI X M, LIU L, YUAN J M, et al. The Effect of Aerobic Exercise and Starvation on Growth Performance and Postprandial Metabolic Response in Juvenile Southern Catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2016, 193: 36—44.

[12] 王瑞霞. 青鱼的原始器官原基的形成和消化系统呼吸系统的发生 [J]. 水产学报, 1982, 6(1): 77—83.

[13] 沈斌乾, 陈建明, 郭建林, 等. 饲料中添加枯草芽孢杆菌对青鱼生长, 消化酶活性和鱼体组成的影响 [J]. 水生生物学报, 2013, 37(1): 48—53.

[14] 李思发, 吕国庆. 长江中下游鲢鳙草青四大家鱼线粒体 DNA 多样性分析 [J]. 动物学报, 1998, 44(1): 82—93.

[15] 闫冠杰. 鲤科鱼类形态及游泳能力的种间比较 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2012.

[16] HANSON K C, HASLER C T, SUSKI C D, et al. Morphological Correlates of Swimming Activity in Wild Largemouth

- Bass (*Micropterus salmoides*) in Their Natural Environment [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2007, 148(4): 913–920.
- [17] WEBB P W. Body Form, Locomotion and Foraging in Aquatic Vertebrates [J]. American Zoologist, 1984, 24(1): 107–120.
- [18] PAKKASMAA S, PIIRONEN J. Water Velocity Shapes Juvenile Salmonids [J]. Evolutionary Ecology, 2001, 14(8): 721–730.
- [19] SEBASTIEN R, HELENE G, PIERRE M. Effects of Morphology on Swimming Performance in Wild and Laboratory Crosses of Brook Trout Ecotypes [J]. Functon Ecology, 2010, 24(2): 310–321.
- [20] NICOLETTO P F. The Influence of Water Velocity on the Display Behavior of Male Guppies, *Poecilia reticulata* [J]. Behavioral Ecology, 1996, 7(3): 272–278.

The Effects of Continuous Water Flow on the Body Shape Features of Juvenile *Mylopharyngodon piceus*

LI Xiu-ming^{1,2}, XU Gui¹, FU Shi-jian², ZHANG Yao-guang¹

1. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

Abstract: To investigate the effects of continuous water flow on the body shape features of juvenile *Mylopharyngodon piceus*, 144 fish (body mass: 11.90 ± 0.24 g, body length: 8.94 ± 0.31 cm) were randomly divided into four groups (control group, 9 cm/s treatment group, 18 cm/s treatment group and 36 cm/s treatment group). Fish in the four groups were forced to swim against different water velocities for 8 weeks at a constant temperature of (25 ± 0.5) °C. Then, the morphological images and related parameters of the juvenile *M. piceus* were measured and calculated after 8 weeks. The fish in 9 cm/s treatment group displayed significant increase in head length (*HL*) and *HL*/body length (*BL*) ratio compared with the fish of control group ($p < 0.05$). The fish in 18 cm/s treatment group displayed significant increase in *HL*, head depth (*HD*), body depth (*BD*), fork length (*FL*), the side area of body (*A_b*), and *HL*/*BL* ratio compared with the fish of control group ($p < 0.05$). The fish in 36 cm/s treatment group displayed significant increase in *HL*, *HD*, the length of the lower side of caudal peduncle (*L_{lc}*), side area of caudal peduncle (*A_{cp}*), *HL*/*BL* ratio and *A_{cp}*/*A_b* compared with the fish of control group ($p < 0.05$). Continuous flow stimulation showed no effect on the other morphological parameters when compared to the control group. These results suggested that (1) the body shape features of *M. piceus* were impacted by the continuous flow stimulation; (2) high water velocity (36 cm/s) resulted in a significant increase in relative *A_{cp}* and *A_b*, which may be beneficial to the improvement of swimming performance in juvenile *M. piceus*.

Key words: water velocity; body shape features; *Mylopharyngodon piceus*

