

# 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究

刘 稳<sup>1</sup>, 诸葛亦斯<sup>2</sup>, 欧阳丽<sup>1</sup>, 余 伟<sup>1</sup>, 刘德富<sup>1</sup>

(1. 三峡大学土木水电学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 以鲫鱼为研究对象, 将其放入流速渐变环形水槽的不同水动力分区中进行实验, 研究水动力学条件对鱼类生长的影响。通过对水槽流场的三维数值模拟, 得到其中与鲫鱼生长相联系的水动力学细部特征, 将模拟结果与实测流场数据比较分析, 结果可靠。细部特征采用流速、流速梯度和动能梯度3个水动力学特征量进行量化分析, 并结合鲫鱼相对日增长率, 得到鱼类生长与水动力学特征量之间的定量关系。流速对鲫鱼有一个短期的胁迫作用, 0.20 m/s 流速比较适宜鲫鱼的生长; 鲫鱼的体重相对日增长率随着水流动能梯度增大而下降, 两者呈现负相关性, 0.009 J/(kg·m) 为鲫鱼生长所需动能梯度的一个阈值。通过量化鱼类生长对水动力学条件的需求, 可为生态水利规划提供定量化的依据。

**关键词:** 生态水力学; 水动力学; 三维数值模拟; 鱼类生长

**中图分类号:** Q178.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2009)06-0812-06

河流是各类水生生物的栖息地, 是鱼类、无脊椎动物等动物的生存繁殖和水生植物生长的基础。水利枢纽的拦蓄作用和引调水工程对水资源的重新配置, 使河流水动力学条件发生巨大变化, 对鱼类等水生生物的生长与繁殖产生很大的影响<sup>[1]</sup>。鱼类生命周期中部分或者全部生命阶段依靠某种特定的水动力学条件, 如四大家鱼产卵的发生和水位的涨落有明显的相关性, 趋流性的鱼类要靠流速的存在和大小来判断游泳路线甚至洄游的路线<sup>[2]</sup>。寻找适宜鱼类生长的水动力学条件是当前生态水力学研究的重要课题, 为探索水动力学条件对鱼类生长的影响, 修建了流速渐变环形生态水槽, 并在水槽内选取鲤科鱼类鲫鱼为代表进行模型试验研究。在获得鱼类活动区域内所有点的水动力学要素非常困难的情况下<sup>[3]</sup>, 本文运用数学模型对该流场进行模拟。水生生物总是与水动力学细部特征相联系<sup>[4]</sup>, 为了能从模型中获取到生物学上有意义的信息, 模型采用足够小的网格对小空间尺度进行了模拟。通过选用流速、流速梯度、动能梯度3个水动力学特征量量化鱼类生长的水动力学条件来定量研究其与鱼类生长的关系<sup>[5-6]</sup>。

## 1 环形渐变水槽设计及其水流状态模拟

### 1.1 水槽设计原理

设计流速渐变环形水槽长 16 m, 宽度 3 m, 模型最大水深为 2 m, 如图 1 所示。进口处由潜水泵控制流量。基于水力学连续方程  $Q = Av$ , 由于潜水泵功率固定, 在水槽模型中形成了水流循环系统, 且单位时间内向前推动的水体体积相同, 即流量  $Q$  为常数。由于沿水流前进方向过水段面的宽度  $B$  发生均匀变化, 且整个水槽模型水深控制在 60 cm, 潜水泵形成的水力坡降十分小, 可忽略不计, 水深  $h$  为常数。过水断面面积  $A = Bh$  沿水流前进方向变大的同时, 过水断面平均流速  $v = Q/A$  在不断变小。模型中间部分通过改变截面来改变断

收稿日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50639070)

作者简介: 刘 稳(1985-), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水工。E-mail: liuwen290@gmail.com

通信作者: 刘德富, E-mail: dliu@ctgu.edu.cn

面流速, 水流流速范围为 0.1 ~ 1.2 m/s。

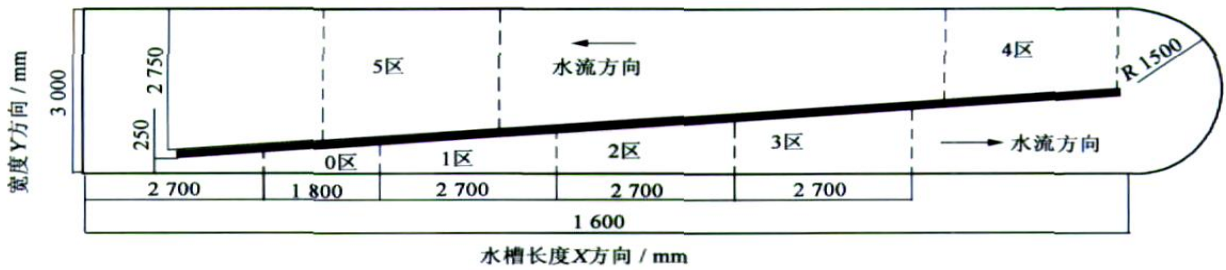


图1 水槽平面图与流速分区

Fig.1 Planar graph and velocity subzones of channel

### 1.2 水槽水流状态的实测及物理空间分区

实验中使用挪威 Nortek AS 公司 1999 年推出的声学多普勒三维点式流速仪测定水体流速<sup>[7]</sup>, 测量精度为测量值的  $(0.5 \pm 0.1) \% (\text{cm/s})$ 。沿水流方向每隔 0.9 m 布置一个测量段面, 并且在每个横断面上均布 3 ~ 5 条垂线进行测量, 将所有测出的流速点运用自然零点法插值, 绘制出流速分布云图。根据水槽模型流速分布的具体情况, 用直径为 2 cm 的网栅将水槽沿水流方向分为 6 个小区间, 分区情况如图 1 所示, 各区间流速沿水流方向总体在下降, 标号依次为 0 区 ~ 5 区, 各区的平均流速分别为 1.00、0.73、0.60、0.31、0.39、0.20 m/s。实验选用的鲫鱼为底栖鱼类, 主要受到底部流速胁迫的影响, 所以本文侧重研究鲫鱼所生活的水槽底部水动力学情况。距水槽底部 0.2 m 深度范围的实测流速分布云图如图 2 所示。

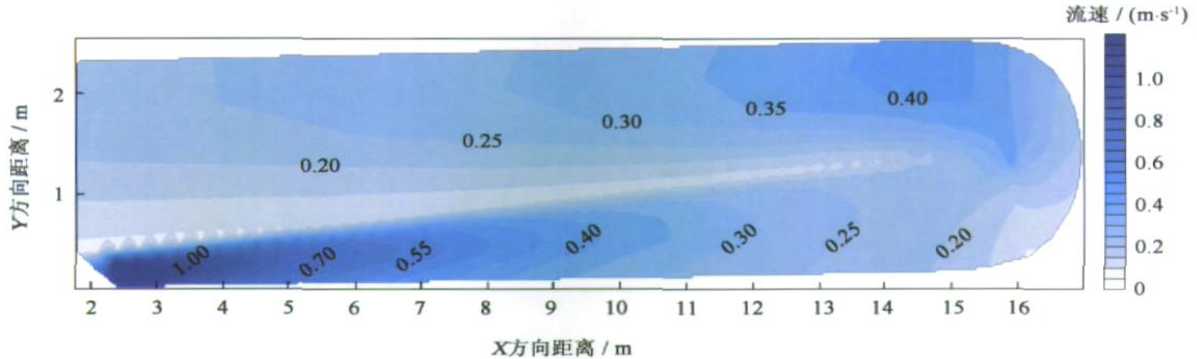


图2 水槽底部实测流速云图

Fig.2 Cloud chart of the measured bottom velocity

### 1.3 水槽水流三维数值模型模拟

水槽水流三维数值模型采用不可压缩流体、浅水、Boussinesq 假定下的 Navier-Stokes 控制方程<sup>[8]</sup>。距水槽底部 0.2 m 深度范围的模拟流速分布矢量图如图 3 所示。经过比较, 水槽流速的模拟值和实测值非常接近, 整个流场的流态也非常相似。数值模拟能较好的模拟流速渐变环形水槽的真实流态。流速按照水力学方程  $v = Q/A$ , 水槽 4 区的流速应比 3 区的平均流速小, 但从实测结果与模拟结果都可以得到水槽 4 区的平均流速比 3 区的大, 由于水槽边界的急剧变化致使水槽转弯处水流内部各质点的流速、压强发生改变, 即水流内部结构发生急剧调整, 从而使 4 区流速增大。同时可以看到水槽边界急剧变化处之后水槽的流速分布随着断面面积的增大越来越趋向于均匀, 如图 3 所示。

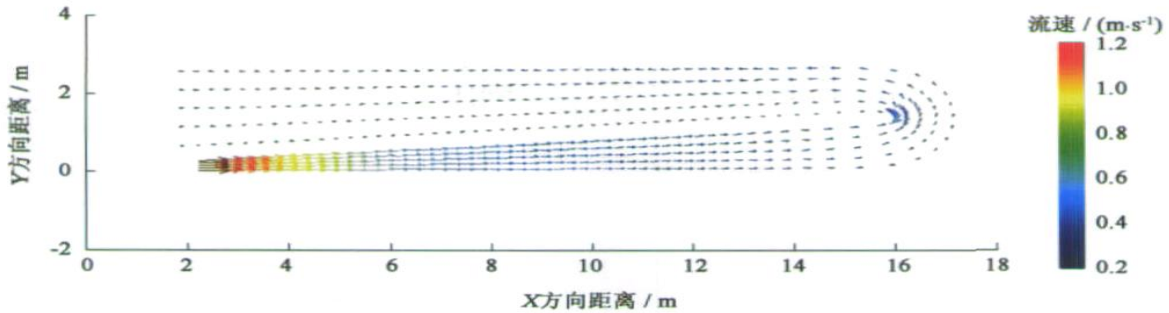


图3 水槽流场模拟流速分布矢量图

Fig.3 Contour of the simulated bottom velocity

## 2 鱼类生长研究的实验方法

选用鲫鱼为实验鱼种, 为了保证生物实验的统计意义, 并尽量减小实验误差, 选用大小、体重基本一致, 且有活力比较健康的鲫鱼作为实验对象。实验要求有适宜的温度、光照、溶解氧、食饵等。最基本的要求是要有适宜的水源, 包括合适的水化学成分和水温。本实验采用自来水作为水源, 并加入少量硫代硫酸钠去除自来水中的氯和氨。在试验水槽中加有过滤净化装置, 每周将水槽中的水全部更换1次, 其中每2 d更换水槽1/3的水。使用氧气泵保证水槽中有充足的溶解氧。为了预防疾病传染, 采用稀释的高锰酸钾溶液, 浸浴试验鱼。实验开始前先将试验鱼驯养一个星期, 使其适应水槽环境。

在1区到5区流速区间中, 每个区间都放置75尾大小比较接近的鲫鱼, 由于试验鱼数量有限, 在0区只放置10尾。鲫鱼的平均体重为52 g, 区间最大养殖密度为 $2.4 \text{ kg/m}^2$ , 可以不考虑密度对生长差异的影响<sup>[9]</sup>。每天定时在9:00和16:00投放鱼食, 每天投放鱼食量为鱼体重的5%左右。从实验开始的第3 d、第10 d、第20 d、第30 d每次从1区到5区流速区间各取12尾鲫鱼进行称重, 且在第30 d对0区的10尾鲫鱼也进行称重。试验从2008年8月2日起, 至2008年9月3日结束, 历时30 d。

## 3 水动力学条件对鱼类生长的影响

### 3.1 水力学特征量

鱼类生命周期中部分甚或全部生命阶段依靠某种特定的水动力学条件<sup>[10-12]</sup>, 根据各特征量描述对象的不同, 可以将表征河流水力学条件的特征量分为4种类型<sup>[13]</sup>, 第1类是描述水流运动的量, 如流速等; 第2类是描述河道形态的量, 如水深、湿周等; 第3类是工程水力学中常用的量纲一量, 如弗劳德数( $Fr$ )、雷诺数( $Re$ )等; 第4类是通过流体力学的相关方程导出的, 用来描述水流复杂状况的特征量, 主要包括 Crowder 和 Diplas 提出的用来描述水流复杂程度的4个特征量<sup>[14]</sup>。流速梯度用以描述流场的散乱程度, 其数学表达式是 $(v_1 - v_2)/s$ , 单位为 $\text{s}^{-1}$ 。动能梯度表示2个近距离空间点之间由于流速不同产生的动能梯度, 该值越大说明流态越紊乱, 其含义为单位距离单位质量空间动能梯度, 物理意义正比于作用在生物体上的迎面阻力, 度量从一个位置到另一个位置消耗的能量。其数学表达式是 $\bar{v}(v_1 - v_2)/s$ , 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{m})$ , 一般情况下实测值在 $0 \sim 0.2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{m})$ 。

表1 试验各流速区的水流特征量与鲫鱼体重相对日增长率  
Table 1 Flow characteristics variables and relative growth rates of each velocity subzone

区间	相对日增长率 $/\text{d}^{-1}$	平均流速 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	流速梯度 $/\text{s}^{-1}$	动能梯度 $/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
0区	0.01054	1.00	0.250	0.257
1区	0.01161	0.73	0.305	0.188
2区	0.01126	0.60	0.056	0.024
4区	0.01361	0.39	0.026	0.013
3区	0.01226	0.31	0.034	0.010
5区	0.02340	0.20	0.045	0.009

由于数值模拟能较好的模拟流速渐变环形水槽的真实流态, 且通过数值模拟得到各试验区大量的流速数据, 从而方便进行定量研究细部水动力学条件。通过读取各流速区间的所有网格节点处的模拟流速值与相应的坐标值, 计算得到整个流速区间的平均流速值, 同时求出各流速区间中每以 0.3 m 为间隔的距底部 0.2 m 区域的各过水断面平均流速, 进而求出各断面之间的流速梯度与动能梯度, 从而求出所研究流速区的平均流速梯度与动能梯度, 求得的各区间的水流特征量值如表 1 所示。表 1 中鲫鱼相对日增长率为实验 30 d 后所测得的值, 其中相对日增长率为实验区的鲫鱼体重平均相对增长率除以实验天数。

### 3.2 流速对鱼类生长影响分析

有关文献<sup>[15]</sup>指出 0.6 m/s 为鲫鱼的喜好流速上限, 从图 4 可以看出在实验开始后的前 10 d 内, 受水流流速的影响, 在大于鲫鱼喜好流速上限的流速区间中鲫鱼的体重相对日增长率呈现一个先下降(负增长)后上升的趋势; 在小于鲫鱼喜好流速上限的流速区间中鲫鱼的体重相对日增长率呈现一个先上升后下降的趋势; 在实验开始 10 d 后各流速区鲫鱼的体重相对日增长率开始趋于一个稳定状态; 到 30 d 后各流速区鲫鱼的体重相对日增长率基本保持一个稳定值。说明在一个短的时期内, 当鲫鱼生活在小于其喜好流速上限的流速环境时, 流速对鲫鱼的生长起到一个促进作用; 而当鲫鱼生活在大于其喜好流速上限的流速环境时, 流速对鲫鱼的生长起到一个阻碍作用。不同流速区间鲫鱼的体重相对日增长率存在差异, 但经过一段时期后鲫鱼开始慢慢适应其生长的水流环境, 其体重相对日增长率保持一个相对稳定值。这说明流速对鱼类有一个短期的胁迫作用, 仅选用流速不能完全表征水动力学条件对鱼类生长的影响。在整个实验过程中 0.20 m/s 流速区间中鲫鱼的相对日增长率始终比其它流速区间中鲫鱼的大, 说明 0.20 m/s 流速比较适宜鲫鱼的生长。

### 3.3 流速梯度与动能梯度对鱼类生长的影响

本文选用流速梯度与动能梯度作为水动力学特征量来表征不同的水动力学条件, 研究其对鲫鱼生长的影响, 并试图建立生态学和流体力学之间的结合。鲫鱼的生长需要一定的水动力学条件, 流速梯度可以反映水流流态紊乱程度, 水流越紊乱, 水流流速梯度越大; 动能梯度不仅与流速有关而且与流速梯度有关。

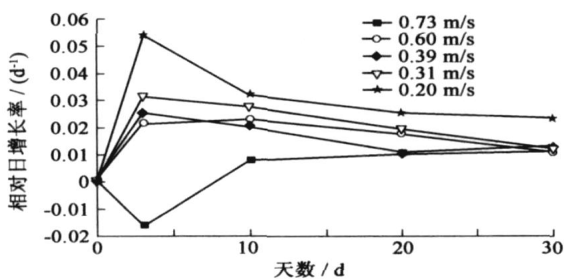


图 4 鲫鱼体重相对日增长率与时间的关系

Fig. 4 Time relation curves of relative daily growth rates of *Carassius auratus*

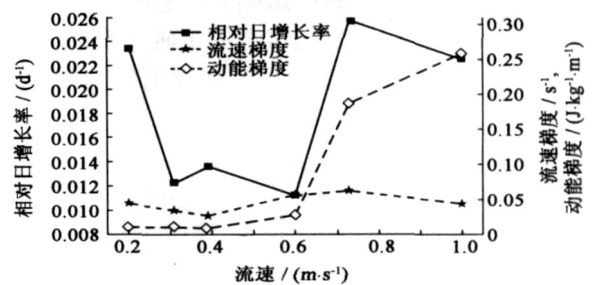


图 5 实验 30 d 时鲫鱼时相对日增长率、流速梯度, 动能梯度与流速关系曲线

Fig. 5 Relationship between relative daily growth rates, velocity gradient, kinetic gradient and velocity

从图 5 可以看出, 在流速为 0.39 m/s 时, 鲫鱼的体重相对日增长率有一个突变值, 主要是 0.39 m/s 流速对应于实验 4 区, 由前面的流速模拟与实测值可以得到, 尽管 4 区的流速相对于 3 区 (0.31 m/s) 大, 但由于 4 区前的边界急剧变化产生紊流而使 4 区的水流结构发生变化, 同时因为紊流中液体质点的混掺作用, 动量发生交换, 使其流速分布比较均匀, 因而使 4 区的流速梯度与动能梯度相对比较小, 即鱼类在 4 区的水流中运动生活时消耗的能量相对较小, 所以 0.40 m/s 流速时鲫鱼相对日增长率有一个突变值。随着流速的增大, 鲫鱼体重相对日增长率总体在下降, 同时可以看出区间平均流速与区间平均流速梯度之间没有显著的相关性。但流速梯度可以反映水流流态紊乱程度, 水流越紊乱, 水流流速梯度越大。随着流速的增大, 流速动能梯度总体在增

加, 鲫鱼的体重增长率与动能梯度呈现一种负相关性, 表明随着动能梯度的增大, 鱼类在水流中运动时消耗的能量越多, 相应的体重增长就越小。动能梯度不仅与平均流速有关而且与流速梯度有关, 能综合描述水流流速大小与水流流态, 并对鱼类在水流运动中消耗能量进行量化。当动能梯度小于  $0.009 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{m})$  时鲫鱼保持较高的相对日增长率, 但当动能梯度大于  $0.009 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{m})$  时鲫鱼相对日增长率明显随动能梯度增大而下降。 $0.009 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{m})$  为鲫鱼生长所需动能梯度的一个阈值。

## 4 结 论

本文采用的数值模型能较好的模拟流速渐变环形水槽的真实流态, 表明模型是合理和正确的, 从而为分析实验水槽内鱼类生长的水动力学条件提供大量准确的数据。在研究水动力学条件对鲫鱼等底栖类水生生物生长影响的研究时, 结合水流数值模拟, 可以克服获得水流底部流速的困难, 并且能得到水流细部特征, 另外结合生物学方法能够对鱼类等水生生物生长的水力学环境做出准确的描述, 并从中获取到生物上有意义的信息, 有利于寻找连接生态学和流体力学之间结合点, 促进生态流体力学研究。

研究结果表明鲫鱼以其喜好流速上限  $0.6 \text{ m/s}$  为阈值, 当流速小于  $0.6 \text{ m/s}$  时, 流速对鲫鱼的生长在短期内起到一个促进作用; 当流速大于  $0.6 \text{ m/s}$ , 流速对鲫鱼有一个短期的胁迫作用, 其中  $0.20 \text{ m/s}$  流速中鲫鱼体重相对日增长率最大, 比较适宜鲫鱼的生长。鲫鱼的生长需要一定的水动力条件, 仅选用流速不能完全表征水动力条件对鱼类生长的影响, 还必须综合考虑水流的紊乱程度。流速与流速梯度之间没有显著的相关性。采用动能梯度能很好地衡量鱼类在流速区间位置移动能量耗费的情况, 鲫鱼的体重增长率随着动能梯度增大而下降, 两者呈现负相关性,  $0.009 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{m})$  为鲫鱼生长所需动能梯度的一个阈值。当动能梯度小于  $0.009 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{m})$  时鲫鱼保持较高的相对日增长率。

通过水流流场的三维数值模拟定量给出水流细部特征, 并结合生物学方法进行水生生物的研究, 这对进行水力学环境对重要生物资源的影响研究及水利工程对重要生物资源生态学效应探讨等都具有较大价值。实验未考虑分区用的网栅对流态的影响, 但暂时没有更好的解决方法可以既对鱼类进行分区又对水流不产生影响的方法, 是实验的不足之处。还需进一步研究水生生物与水动力学条件的关系, 量化水生生物对水动力学条件的需求, 从而为生态水利规划提供定量化的依据, 为河流管理与决策提供支持。

## 参考文献:

- [1] 易雨君, 王兆印, 陆永军. 长江中华鲟栖息地适合度模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 538-543. (YI Yu-jun, WANG Zhao-yin, LU Yong-jun. Habitat suitability index model for Chinese sturgeon in the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 538-543. (in Chinese))
- [2] 段辛斌, 陈大庆. 长江三峡库区鱼类资源现状的研究[J]. 水生生物学报, 2002, 26(6): 605-611. (DUAN Xin-bin, CHEN Da-qing. Studies on fishery resources in the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River[J]. Freshwater Fisheries, 2002, 26(6): 605-611. (in Chinese))
- [3] 张辉, 危起伟, 杨德国. ADCP 在水域生态研究中的应用[J]. 水利渔业, 2008, 28(1): 1-4. (ZHANG Hui, WEI Qi-wei, YANG De-guo. Application of ADCP in the research of water ecology[J]. Reservoir Fisheries, 2008, 28(1): 1-4. (in Chinese))
- [4] BOOKER D, DUNBAR M, IBBOTSON A. Predicting juvenile salmonid drift-feeding habitat quality using a three-dimensional hydraulic-bioenergetic model[J]. Ecological Modelling, 2004, 177(1/2): 157-177.
- [5] 王晓刚, 严忠民. 河道汇流口水力特性对鱼类栖息地的影响[J]. 天津大学学报, 2008, 41(2): 204-208. (WANG Xiao-gang, YAN Zhong-min. Effect of hydraulic characteristics of confluent channel on physical habitat for fish communities[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(2): 204-208. (in Chinese))
- [6] 张辉, 危起伟, 杨德国, 等. 基于流速梯度的河流生境多样性分析: 以长江湖北宜昌中华鲟自然保护区核心区江段为例[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 667-674. (ZHANG Hui, WEI Qi-wei, YANG De-guo, et al. Analysis of river habitat diversity based on current velocity gradients: Example from the core reach of Chinese sturgeon nature reserve of Yangtze River, in Yichang, Hubei Province[J]. Chinese

- Journal of Ecology, 2008, 27(4): 667-674. (in Chinese))
- [7] 王元叶, 何青. 声学多普勒流速剖面仪近底有效流速数据处理初步研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 394-399. (WANG Yuan-ye, HE Qing. Near bed velocity treatment of acoustic doppler current profiler[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 394-399. (in Chinese))
- [8] 马福喜, 王金瑞. 三维水流数值模拟[J]. 水利学报, 1996(8): 39-44. (MA Fu-xi, WANG Jin-rui. Numerical modeling of 3D turbulent flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(8): 39-44. (in Chinese))
- [9] BOLASINA S, TAGAWA M, YAMASHITA Y, et al. Effect of stocking density on growth, digestive enzyme activity and cortisol level in larvae and juveniles of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. Aquaculture, 2006, 259(1/2/3/4): 432-443.
- [10] VILIZZIL, COPP G, ROUSSEL J. Assessing variation in suitability curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use[J]. River Research and Applications, 2004, 20(5): 605-618.
- [11] INGRAM B, SUNGAN S, COOLEY G, et al. Induced spawning, larval development and rearing of two indigenous Malaysian mahseer, *Tambroides* and *T. douronensis*[J]. Aquaculture Research, 2005, 36(10): 983-995.
- [12] NYKANEN M, HUUSKO A. Suitability criteria for spawning habitat of riverine European grayling[J]. Journal of Fish Biology, 2002, 60(5): 1351-1354.
- [13] 杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 125-130. (YANG Yu, YAN Zhong-min, QIAO Ye. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(2): 125-130. (in Chinese))
- [14] CROWDER D, DIPLAS P. Evaluating spatially explicit metrics of stream energy gradients using hydrodynamic model simulations[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(7): 1497-1507.
- [15] 南京水利科学研究所. 鱼道[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982: 10-11. (Nanjing Hydraulic Research Institute. Fishway[M]. Beijing: China Electricity Press, 1982: 10-11. (in Chinese))

## Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth<sup>\*</sup>

LIU Wen<sup>1</sup>, ZHUGE Yi-si<sup>2</sup>, OUYANGLi<sup>1</sup>, YU Wei<sup>1</sup>, LIU De-fu<sup>1</sup>

(1. College of Hydroelectric and Civil Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** To find out the appropriate hydrodynamic conditions for fish growth is an important issue in present eco-hydraulic research. The experimental study presented here is to investigate the effect of the hydrodynamic conditions on fish growth. Especially, the *Carassius auratus* is chosen here for the case study through taking segmentation experiments in the graded ring shape flume. The detailed hydrodynamic characteristics of flumes which are relevant to fish growth are obtained through the 3D numerical simulation of the flume's flow field. Compared with the simulation results and the on-site measurements, the simulation is shown to be reliable. Combining the relative daily growth rate of *Carassius auratus* with the flow detail characteristics which are quantized by three hydrodynamic characteristic variables including flow velocity, velocity gradient and kinetic energy gradient, the quantitative relationship is established between the fish growth and the hydrodynamic characteristic variables. There is a short-term effect of flow velocity stress on the growth of *Carassius auratus*, and 0.2 m/s is a very feasible velocity for the growth of *Carassius auratus*. A negative correlation is found between the relative daily growth rate and the kinetic energy gradient with the relative daily growth rate decreasing with the increase of kinetic energy. The threshold of kinetic energy gradient of the growth of *Carassius auratus* is 0.009 J/(kg·m). The quantification of the hydrodynamic conditions of fish growth can provide the quantitative basis for the ecological water conservancy planning.

**Key words:** eco-hydraulics; hydrodynamics; 3D numerical simulation; fish growth

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50639070).