

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

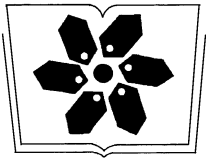
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 5 期
Vol.31 No.5
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 5 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

盐胁迫下 3 种滨海盐生植物的根系生长和分布····· 弋良朋,王祖伟 (1195)

蕙兰病株根部内生细菌种群变化····· 杨 娜,杨 波 (1203)

森林不同土壤层全氮空间变异特征····· 张振明,余新晓,王友生,等 (1213)

基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测····· 罗 翀,徐卫华,周志翔,等 (1221)

黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释····· 王晓春,赵玉芳 (1230)

两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性····· 李维焕,于兰兰,程显好,等 (1240)

2005—2009 年浙江省不同土地类型上空对流层 NO₂ 变化特征 ····· 程苗苗,江 洪,陈 健,等 (1249)

关帝山天然次生针叶林林隙径高比 ····· 符利勇,唐守正,刘应安 (1260)

鄱阳湖湿地水位变化的景观响应····· 谢冬明,郑 鹏,邓红兵,等 (1269)

模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹凋落物分解的影响····· 涂利华,戴洪忠,胡庭兴,等 (1277)

喷施芳香植物源营养液对梨树生长、果实品质及病害的影响 ····· 耿 健,崔楠楠,张 杰,等 (1285)

不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响 ····· 马忠明,杜少平,薛 亮 (1295)

干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响 ····· 张仁和,郑友军,马国胜,等 (1303)

不同供水条件下冬小麦叶与非叶绿色器官光合日变化特征 ····· 张永平,张英华,王志敏 (1312)

水分亏缺下紫花苜蓿和高粱根系水力学导度与水分利用效率的关系 ··· 李文娆,李小利,张岁岐,等 (1323)

美洲森林群落 Beta 多样性的纬度梯度性 ····· 陈圣宾,欧阳志云,郑 华,等 (1334)

水体泥沙对菖蒲和石菖蒲生长发育的影响····· 李 强,朱启红,丁武泉,等 (1341)

蚯蚓在植物修复芫污染土壤中的作用····· 潘声旺,魏世强,袁 馨,等 (1349)

石榴园西花蓟马种群动态及其与气象因素的关系····· 刘 凌,陈 斌,李正跃,等 (1356)

黄山短尾猴食土行为····· 尹华宝,韩德民,谢继峰,等 (1364)

扎龙湿地昆虫群落结构及动态····· 马 玲,顾 伟,丁新华,等 (1371)

浙江双栉蝠蛾发生与土壤关系的层次递进判别分析····· 杜瑞卿,陈顺立,张征田,等 (1378)

低温导致中华蜜蜂后翅翅脉的新变异 ····· 周冰峰,朱翔杰,李 月 (1387)

双壳纲贝类 18S rRNA 基因序列变异及系统发生 ····· 孟学平,申 欣,程汉良,等 (1393)

基于物理模型实验的光倒刺鲃生态行为学研究 ····· 李卫明,陈求稳,黄应平 (1404)

中国铁路机车牵引能耗的生态足迹变化 ····· 何吉成 (1412)

城市承载力空间差异分析方法——以常州市为例····· 王 丹,陈 爽,高 群,等 (1419)

水资源短缺的社会适应能力理论及实证——以黑河流域为例 ····· 程怀文,李玉文,徐中民 (1430)

寄主植物叶片物理性状对潜叶昆虫的影响····· 戴小华,朱朝东,徐家生,等 (1440)

专论与综述

C₄ 作物 FACE (free-air CO₂ enrichment) 研究进展 ····· 王云霞,杨连新,Remy Manderscheid,等 (1450)

研究简报

石灰石粉施用剂量对重庆酸雨区受害马尾松林细根生长的影响····· 李志勇,王彦辉,于澎涛,等 (1460)

女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察 ····· 石 辉,王会霞,李秧秧,刘 肖 (1471)

基于物理模型实验的光倒刺鲃生态行为学研究

李卫明^{1,2}, 陈求稳^{2,*}, 黄应平²

(1. 武汉大学水电学院 430072; 2. 三峡大学, 宜昌 443002)

摘要:建立了基于天然河道的物理模型,通过控制实验研究水环境因子对鱼类行为的影响。文中选取了金沙江下游 2.6 km 河段建立物理模型,以南方水系的经济鱼类光倒刺鲃为研究对象,进行了鱼的行为对底质和流速的响应实验。分析得出,光倒刺鲃对砂卵石底质的选择明显大于其它底质且差异极其显著($P < 0.01$),光倒刺鲃 2 龄幼鱼期的喜好流速范围为 0.3—0.6 m/s; 研究同时发现水流紊动强度对光倒刺鲃行为具有重要影响。该研究结果可以为光倒刺鲃栖息地模型提供参考。

关键词:物理模型实验;光倒刺鲃行为;底质;流速;流速脉动

Laboratory study on ethology of *Spinibarbus hollandi*

LI Weiming^{1,2}, CHEN Qiuwen^{2,*}, HUANG Yingping²

1 College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: The ethology of *Spinibarbus hollandi* (*S. hollandi*), which is an important freshwater fish in South China, was investigated in a physical model that represents a 2.6 km-long reach of Jingshajiang River on a scale of 1:60. The study focused on the fish's preference to different substrate and flow conditions. Five types of substrate of different grain diameter (silver sand of 1 mm, rough sand of 3 mm, small gravel of 40 mm, medium gravel of 50 mm, sand and cobble of 40 mm) were used in the experiments on substrate preference of young *S. hollandi*. Flow velocity preference of young *S. hollandi* and turbulence intensity effects were investigated as well. The total residency time of *S. hollandi* on each substrate is 0.4 h (rough sand), 0.8 h (medium gravel), 2.2 h (rough sand), 1 h (small gravel) and 0.3 h (silver sand), respectively. Preference of young *S. hollandi* to sand and cobble beds ($P < 0.01$) was found to be significant in the experiments. Consistent results on substrate selection were obtained both in experiments with colonies of fish and individual fishes. Regarding to flow preference, a flume with flat-bottom was used. It was found that young (2-year-old) individuals were in significant favor ($P < 0.05$) of a flow velocities in the range 0.3—0.6 m/s. In previous studies on flow preference of fish, the average velocity was used as the indicator of inductive velocity, favorite velocity and critical velocity. However, there is a growing consensus that turbulent flow fluctuations have important effects on flow preference. Moreover, natural flows are mostly characterized by turbulence. Therefore, the effects of turbulence on fish behaviour were also investigated in this study. Velocity fluctuations and turbulence intensity were used as indicators to further quantify *S. hollandi*'s preference to flow conditions. It was found that *S. hollandi* favored assembling in deepwater zones under static condition, but were more frequently present in zones with intensive turbulence under flow condition. Fishes were more frequently found in the curved conduit of the water tank which waters with high turbulence intensity but low average flow velocity. This suggests that flow fluctuations are more important than average flow velocity with respect to fish behaviour. Therefore, it is recommended to include turbulence in the description of fish response to complex flow conditions. The study results are of importance to the development of a fish habitat model for *S. hollandi*. Moreover, they indicate that heterogeneous river morphology and diverse flow conditions, natural or man-made, are effective measures to improve fish habitat.

基金项目:973 计划资助项目(2010CB429004);国家自然科学基金项目(50879086)

收稿日期:2010-12-03; 修订日期:2011-01-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qchen@cees.ac.cn

Key Words: physical model; *S. hollandi* behavior; bed materials; velocity; velocity fluctuation

河流中大坝等水利工程的运行改变了河流的水文情势,使得水环境因子发生变化,从而改变了水生生物栖息地时间和空间上的分布^[1-3]。鱼类是水生态系统的重要指示性生物,因此成为水生态研究的重点。

鱼的生态行为取决于鱼的栖息环境和生活史,因此,研究处于不同生活史阶段鱼的行为对水环境要素(流速、底质等)的响应机制,建立定量关系,对于研究鱼类栖息地保护具有重要的意义。

研究鱼类行为学的方法主要包括野外调查、室内实验和数值模拟等几种^[4],绝大多数鱼类运动研究都寻求简化水动力环境从而而更好的去理解复杂的游泳运动^[5]。目前,讨论较多是采用室内水槽进行鱼的趋流行为以及游泳能力实验,如宋波澜等人^[6]研究了不同流速下鱼的趋流行为鱼耗氧率的变化;Liao^[5]研究了复杂水动力条件对游泳能力的影响;Pavlov 等、Hinch 和 Rand、Enders 等研究了紊流对鱼的运动能量消耗的影响^[7-10];Webb^[9]研究了紊流对鱼类日常行为的影响;Fausch、McLaughlin 和 Noakes、Heggenes、Enders 等、Smith 进行了紊流对鱼类栖息地影响的研究^[11-14];刘稳等研究了水动力条件对鱼类生长的影响^[15];余国安等人研究了人工阶梯-深潭对河流水生栖息地的影响^[16]。

但是,截至目前,文献分析尚未发现采用模拟天然河道的物理模型进行鱼类行为学研究。本文针对自然河段建立物理模型,真实模拟天然河道中浅滩、深潭等多样性地形,通过光倒刺鲃行为学实验建立其对底质和水流的响应关系,并分析河道地形异质性对改善鱼类栖息地的作用。

1 实验方法

1.1 模型设计

为了真实地模拟自然河道的环境特征,选取金沙江下游 2.6 km 的天然河段作为研究区域,该河段具有浅滩、深槽等多样性地形。根据场地的条件实验模型比尺定为 1:60,模型全长 43 m,宽 5—13 m,模型根据 1:2000 地形图制作,实验模型按照重力相似准则并按几何相似进行模型设计,考虑到鱼类行为学实验对水深要求,满足最小水深 0.5 m,模型最大为水深 1.2 m。

1.2 模型制作

地形造型采用断面法、等高线法制作,模型中两控制断面间距取 50 cm,对于地形变化较复杂的控制断面进行了加密处理。平面导线布置用经纬仪控制(模型平面布置图见图 1),模型高程用水准仪进行控制,误差均满足水工模型试验规范要求。

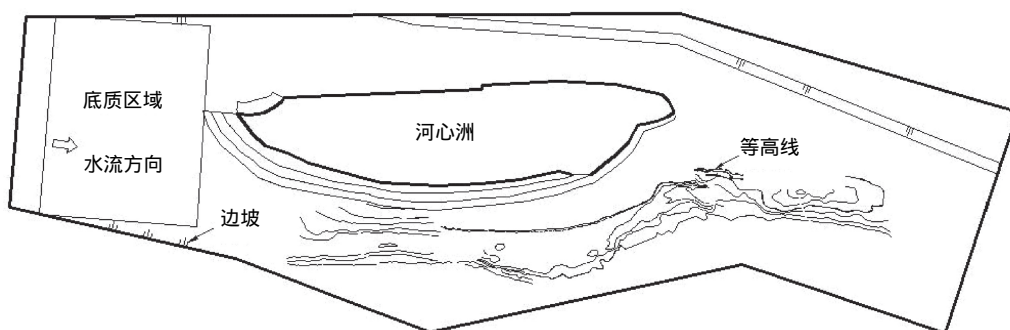


图 1 物理实验模型平面图

Fig. 1 Layout of the physical model

1.3 实验材料

实验鱼为光倒刺鲃(*Spinibarbus hollandi*),属鲤形目,鲤科,鲃亚科,倒刺鲃属,分布于长江、钱塘江、闽江、九龙江、珠江、漓江、元江、台湾岛及海南岛等水系,属于南方水系一种重要的经济鱼类。农业部将广东流溪河光倒刺鲃保护区列为国家级水产种质资源保护区,该保护区的主要保护对象是光倒刺鲃产卵场。实验用鱼从河中捕捞后运送至室内 17.5m×3m×1.5m 环形水槽内驯养 1 个月后进行实验,水槽内装有供氧装置持续供

氧,水槽每周换 1 次水,每天定量喂食,实验前 2d 停止喂食。这些鱼都是经过精心挑选的体健的个体,体重 300—350 g、体长 26—28 cm,2 龄鱼,共 90 条。为了避免对实验用鱼的干扰,体长和体重均在实验完成后进行测量;实验用水为经过充分曝气的自来水。

1.4 实验设计

本实验按静水和动水方案进行设计,静水实验主要目的是观察鱼对底质的选择,动水实验方案分为鱼的喜好流速实验和水动力条件对鱼类行为的影响实验。

实验过程中通过多种观测手段观察不同实验方案下鱼的行为反应,为了避免外界环境对实验的影响,实验过程中大厅内只有实验观察人员,采用水下红外监视器、摄像机、照相机、高倍军用望远镜等多种设备对鱼类的行为进行远、近距离观测。实验分为 3 组,每组 30 尾分别进行实验。

底质实验:为让鱼适应实验环境,将鱼放入模型中驯养 1 个星期后开始实验,在模型中铺设了细沙(1 mm),粗沙(3 mm),小碎石(40 mm),中碎石(50 mm),砂卵石(40 mm)5 种不同的底质,底质铺设在水深较深、地形基本相同的模型的前部(图 1),铺设厚度根据地形变化而定,以保证底质铺设区域在同一水平面上,从而消除地形差异对鱼类底质选择的影响。每种底质宽度为模型宽度,长度为沿水流向 1.2 m,每种底质周围均布置水下摄像装置进行 24 h 连续录像,观察鱼在不同底质下的驻留的时间和频率,以鱼在某种底质中驻留的时间长短和驻留的频率为判断鱼喜好的标准。

喜好流速实验:鱼的感应流速、喜好流速等指标通常是用平均流速来表示,为了更好的反映光倒刺鲃对流速的响应关系,喜好流速实验在平底的玻璃水槽中进行,水槽断面为渐变型,在流量一定时,不同断面具有不同的流速,如图 2 所示,实验通过在动水条件下对鱼主要活动区域进行观测和流速测量,并对录像资料和三维流速进行处理,将各点的平均流速进行频数统计,然后通过加权平均得到各点的平均流速值。

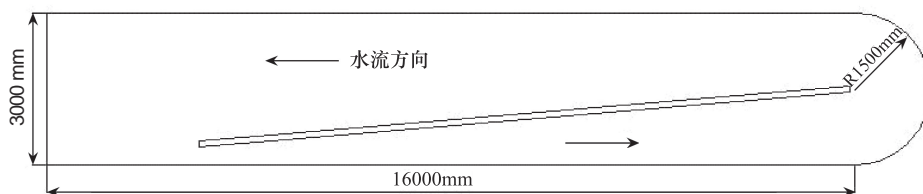


图 2 实验水槽

Fig. 2 Experimental flume

水动力分析实验:水动力实验在物理模型中进行,流量通过矩形量水堰进行测量,为控制模型中水流速度,通过调节模型尾门的开度来进行控制。在水温、溶氧、pH 值等其它环境因子均适宜的情况下,观察鱼在紊流环境中的行为反应,本实验先通过观察鱼在动水情况下主要的活动区域,然后测出该活动区域的三维流速,可分析得出鱼喜好的水流环境。为避免流速测量对实验的影响,先观察 4h 后再进行流速测量。流速测量采用 SonTek 公司生产的 ADV 声学多普勒流速仪进行测量,该仪器可进行平均流速、边界层流速、紊流(雷诺应力)和波浪谱测量,可采用遥距测量,不干扰流场,为分析水流的紊动特性提供了极大的方便。本实验测量采样点设置为 200 个/s,采集时间为 30s,每个点 x 、 y 、 z 方向各采集 6000 个瞬时流速值。

2 结果分析

2.1 数据处理

底质和水流实验时,均以鱼的驻留时间作为判断指标。采用非参数统计方法 Kruskal-Wallis test 检验鱼在不同底质和流场中驻留时间的差异是否显著,检验用 SPSS 统计软件进行。

2.2 鱼对底质的选择

用 Hach 便携式多参数水质分析仪测得实验时水温 21—22℃,pH 值 6.9—7.2,溶氧 5.5—6.5 mg/L,实验环境均满足实验鱼种适应性要求。对录像资料分析统计发现,白天鱼绝大部分时间处于游动状态,很少停留,晚上有少部分时间驻留,鱼在 5 种底质中驻留的累计时间分别为:粗沙 0.4h,中碎石 0.8h,砂卵石 2.2h,小碎

石 1h, 细沙 0.3h。经检验, 光倒刺鲃幼鱼在 5 种底质种驻留的时间存在显著性差异, 对砂卵石底质具有极其显著的选择性 ($P < 0.01$)。

2.3 鱼的喜好流速实验

通常, 在对鱼类的趋流性进行分析研究时, 均采用感应流速、喜爱流速和极限流速作为指标。在研究鱼类栖息地适应性指标时通常把鱼的喜好流速作为一个重要的指标来评价。喜爱流速是指鱼能克服的各种流速值中对他们的游动最为合适的某一流速范围, 鱼喜欢聚集在这一流速范围内顶流前进^[17]。从图 4 中可以看出, 在流速为 0.3—0.6 m/s 区域内, 鱼出现的频率明显高于其他流速区域, 当流速超过 0.7 m/s 时, 鱼出现的频率急剧下降, 流速越大, 鱼出现的频率越低; 观察发现在流速为 1.5 m/s 区域, 鱼进入该区域即被水流冲走, 只有极少数鱼能游过此区域, 1.7 m/s 达到抵抗的极限流速。经检验, 光倒刺鲃幼鱼在 0.3—0.6 m/s 流速区间出现的频率存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

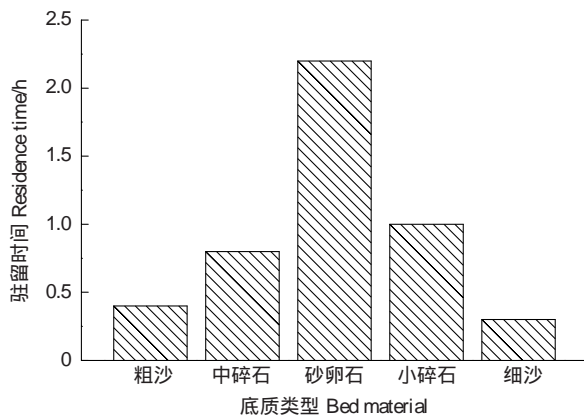


图 3 底质和驻留时间关系图

Fig. 3 The relationship between residence time and bedmaterials

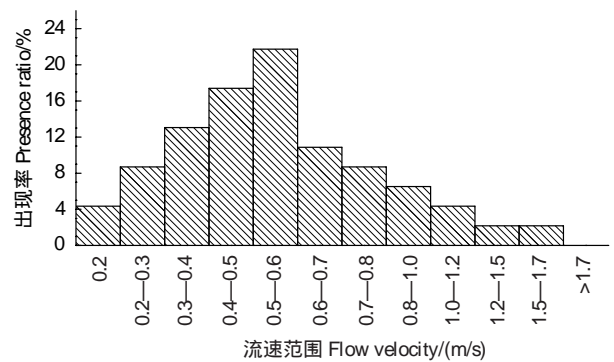


图 4 流速和出现率关系图

Fig. 4 The relationship between presence ratio and flow velocity

2.4 水流紊动强度对鱼类行为的影响

在鱼类生活的环境中, 鱼类生命周期中部分甚至全部生命阶段需要某种特定的水动力学条件^[18-20]。天然河道中的水流绝大部分为紊流, 水动力条件较复杂, 仅考虑平均流速指标难于准确地反映水流对鱼类行为的影响, 本文选用脉动流速及紊动强度作为水动力学特征量来表征不同的水动力学条件, 研究其对鱼类行为的影响, 并试图建立鱼类行为学和水动力学之间的结合。

水流的紊流运动看似杂乱无章, 但从数学统计规律上可以将瞬时流速分解为时均流速和脉动流速, 脉动流速可用下列公式计算得出:

$$v_p = v - \bar{v} \quad (1)$$

式中, v_p 为脉动流速, v 为瞬时流速, \bar{v} 为时均流速。水流中任一测点紊动强度 σ 用脉动流速的均方根值表示:

$$\overline{v_p^2} = \frac{1}{N} \sum_1^N (v - \bar{v})^2 = \frac{1}{N} \sum_1^N v_p^2 \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\overline{v_p^2}} \quad (3)$$

纵向紊动强度 σ_x , 横向 σ_y , 垂向紊动强度 σ_z 。紊动强度具有速度的因次, 因此通常采用紊动强度与相应时均流速的比值, 即相对紊动强度 T :

$$T = \frac{\sigma}{\bar{v}} = \frac{\sqrt{\overline{v_p^2}}}{\bar{v}} \quad (4)$$

将 ADV 流速仪测得的三维流速值按公式(1)—(4)进行计算可得到 x 、 y 、 z 方向的流速脉动值, 紊动强度

值。通过分析发现,鱼出现频率高的地方,该活动区域流速脉动值较大,水流紊乱。2#点 x 、 y 、 z 方向的平均流速值分别为 0.15 m/s 、 0.09 m/s 、 0.11 m/s ,从三维流速图(图 5)中可以看出该点的瞬时流速值较发散,对应图 6 中流速脉动值波动较大。

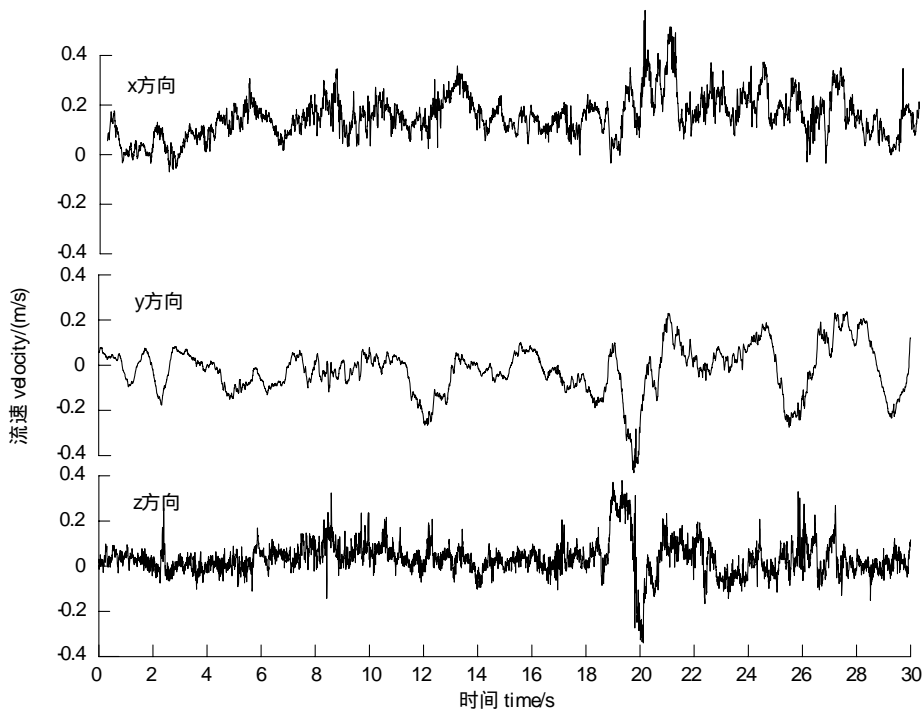


图 5 第 2# 点三维瞬时流速

Fig. 5 The 3-dimensional instant velocity at the 2nd monitoring point

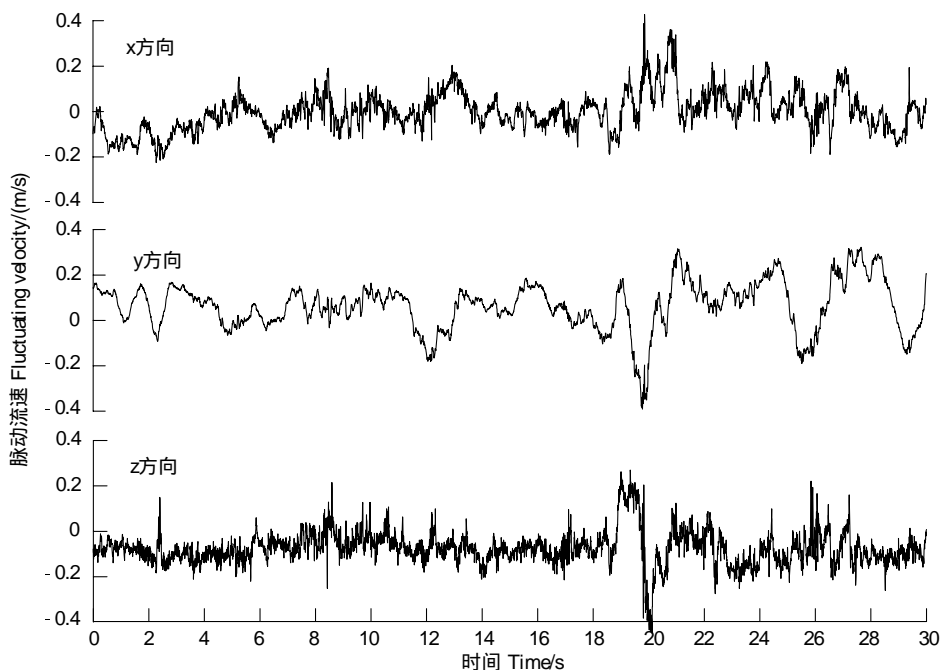


图 6 第 2# 点三维脉动流速

Fig. 6 The 3-dimensional fluctuating velocity at the 2nd monitoring point

表 1 水流相对紊动强度与鱼类出现频率关系

Table 1 Fish presence frequency and relative turbulence intensity of flow

测点 Monitoring point	\bar{v}_x /(m/s)	\bar{v}_y /(m/s)	\bar{v}_z /(m/s)	T_x	T_y	T_z	出现率 Presence ratio/%
1#	1.25	0.30	0.62	0.60	1.26	1.12	19.35
2#	0.15	0.09	0.11	0.37	1.46	1.22	22.58
3#	0.27	0.04	0.10	0.28	1.57	1.13	25.8
4#	0.08	0.23	0.10	0.23	1.1	1.00	22.58
5#	0.50	0.06	0.04	0.25	0.75	0.89	9.67

\bar{v}_x 、 \bar{v}_y 、 \bar{v}_z :x、y、z 方向平均流速; T_x 、 T_y 、 T_z :纵向、横向、垂向紊动强度

从表 1 中可以看出,1#点 3 个方向的平均流速较大,横向和垂向相对紊动强度较适宜,鱼出现的频率较高;2#—4#点 3 个方向的平均流速值均较小,但沿横向和垂向的相对紊动强度较大,水流紊乱,鱼出现的频率仍较高;5#点平均流速值在鱼的喜好流速范围之内,但横向和垂向相对紊动强度较小,鱼出现的频率较低。

物理模型地形的异质性,导致了水流流态的多样性。实验中发现,在模型的深潭附近,平均流速值较小,但其相对紊动强度值较大,鱼出现的频率较高;在浅滩区域,水流流速较大,水流较平顺,但相对紊动强度小,鱼出现的频率很低。可见,鱼对紊流强度的响应比对流速的响应更敏感。这些现象是以前水槽实验无法揭示的。

2.5 结论

通过实验发现,光倒刺鲃对砂卵石底质具有极其显著的选择性,对 0.3—0.6m/s 的流速区间具有显著的喜好;此外,对紊流强度的响应比对流速的响应更为敏感。

3 讨论

鱼类行为学研究主要有野外调查,室内实验及数值模拟几种方法^[9]。目前,鱼类行为学研究还是以室内实验居多。室内实验便于控制水流环境,能方便的观察实验鱼行为变化,易于建立鱼类对水环境单因子的响应关系。

以往进行室内鱼类流场有关实验时,主要以底部为平底的水槽、水池等为实验场所,没有考虑地形对水流环境的影响。但是,在天然河道中,河貌(浅滩和深潭)、床质、水动力等要素在空间上的差异构成了多样性的栖息地环境,维持着河流生态系统完整性。本实验基于天然河段多样性特征,采用了天然河道的比尺模型,其中包含深潭 3 处,浅滩若干,河床水深、流速、床质条件呈现多样化,比以前的水槽和水池具有显著的改进。

但是,在进行鱼类室内实验时,不论是水槽实验还是本文研究的大型物理模型实验都很难考虑物理模型大小和实验鱼个体大小及鱼密度的影响,不同尺寸的物理模型适合多大个体的鱼进行实验到目前为止还没有一个统一的标准,实验鱼的大小和实验模型的大小是否存在相似比的问题还有待进一步研究。

底质实验是在静水的情况下进行的,一般来说,静水时鱼类会选择水深较深的区域活动,很少在浅水区活动,因此,将底质铺设在模型水深较深且地形较平坦的深水区。鱼对底质的选择是以鱼停留在底质上的时间为判断标准,鱼没有接触到底质只是在底质区域游动没有计入驻留时间。鱼一般只有在静水中或者水流流速很小的(感应流速附近)区域才可能停留在底质上,超过一定的流速,鱼不得不通过摆尾来维持身体平衡。有关文献指出,鱼对底质的选择与鱼不同生命阶段及体长存在一定的关系。本实验鱼为 2 龄期的幼鱼,没有考虑体长大小对底质选择的影响。底质实验考虑了个体和群体两种情况,因实验模型区域太大,单条鱼实验不便于观察,个体底质实验在水槽中进行,铺设的底质与本实验底质相同,经实验发现,个体与群体实验结果一致。天然河床中的底质绝大多数为混合底质,本实验中并没有考虑鱼对混合底质的偏好,因为实际河流中底质的混合级配具有很大的空间差异,需要在野外调查的基础上根据具体情况进行实验,这方面可以结合具体实例进一步的研究。

实验建立了光倒刺鲃幼鱼对平均流速单因子响应关系。但是,文中得出的喜好流速具有一定的局限性,

因为同种鱼在不同生长阶段具有不同的流速适应能力,其喜好流速也应该不同,鱼的喜好流速应以不同生命阶段、不同体长、生活环境等因素来考虑。另外,实验发现,仅考虑平均流速不能够准确地反映鱼对水动力环境响应关系。本研究引入了脉动流速和紊流强度分析了鱼类行为与水动力环境的响应关系。通过分析得出,喜好流速区域鱼并不一定出现的频率高,水流紊动强度能更好地反映鱼对水流条件的适应程度,至于鱼对紊动强度喜好范围还有待于进一步研究。

本研究建立的实验方法和实验结果对于鱼类栖息地模型^[21-22]和鱼类动态模拟^[23-24]具有重要的参考价值。

References:

- [1] Hutchinson G E. An Introduction to Population Ecology. New Haven: Yale University Press, 1978.
- [2] Wetzel R G. Limnology: Lake and River Ecosystems. New York: Academic Press, 2001.
- [3] Koop J H E, Schäffer M, Ortmann C, Winkelmann C. Towards environmental assessment of river ecosystems by analyzing energy reserves of aquatic invertebrates. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 2008, 38(3/4): 378-387.
- [4] Vilizzi L, Copp G H, Roussel J M. Assessing variation in suitability curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use. *River Research and Applications*, 2004, 20(5): 605-618.
- [5] Liao J C. A review of fish swimming mechanics and behavior in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2007, 362(1487): 1973-1993.
- [6] Song B L, Lin X T, Wang W J, Li G W. Effects of water velocities on rheotaxis behaviour and oxygen consumption rate of tinfoil barbs *Barbodes schwanefeldi*. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54(4): 686-694.
- [7] Pavlov D S, Skorobogatov M A, Shtaf L G, Baryekian A S. The critical current velocity of fish and the degree of flow turbulence. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1982, 267: 1019-1021.
- [8] Hinch S G, Rand P S. Optimal swimming speeds and forward-assisted propulsion: energy-conserving behaviours of upriver-migrating adult salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(12): 2470-2478.
- [9] Webb P W. Control of posture, depth, and swimming trajectories of fishes. *Integrative Comparative Biology*, 2002, 42(1): 94-101.
- [10] Enders E C, Boisclair D, Roy A G. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, 60(9): 1149-1160.
- [11] Fausch K D. Experimental analysis of microhabitat selection by juvenile steelhead (*Oncorhynchus mykiss*) and coho salmon (*O. kisutch*) in a British Columbia stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, 50: 1198-1207.
- [12] McLaughlin R L, Noakes D L. Going against the flow: an examination of the propulsive movements made by young brook trout in streams. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 1998, 55(4): 853-860.
- [13] Heggenes J. Flexible summer habitat selection by wild, allopatric brown trout in lotic environments. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2002, 131(2): 287-298.
- [14] Smith D L, Brannon E L, Odeh M. Response of juvenile rainbow trout to turbulence produced by prismatoidal shapes. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, 134(3): 741-753.
- [15] Liu W, Zhuge Y S, Ouyang L, Yu W, Liu D F. Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 812-817.
- [16] Yu G A, Wang Z Y, Zhang K, Wang F X. Effect of artificial step-pools on improving aquatic habitats and stream ecological in incised river channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(2): 162-167.
- [17] Nanjing Hydraulic Research Institute. *Fishway*. Beijing: China Electricity Press, 1982: 102-111.
- [18] Vilizzi L, Copp G H, Roussel J M. Assessing variation in suitability curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use. *River Research and Applications*, 2004, 20(5): 605-618.
- [19] Ingram B, Sungan S, Gooley G, Sim S Y, Tinggi D, De Silva S S. Induced spawning, larval development and rearing of two indigenous Malaysian mahseer, *Tortambroides* and *T. douronensis*. *Aquaculture Research*, 2005, 36(10): 983-995.
- [20] Nykänen M, Huusko A. Suitability criteria for spawning habitat of riverine European grayling. *Journal of Fish Biology*, 2002, 60(5): 1351-1354.
- [21] Li R N, Chen Q W, Wu S Y, Cai D S, Wang H M. Application of fuzzy logic to model fish habitat in the downstream of Lijiang River under

reservoir operations. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 128-137.

- [22] Li W F, Han R, Chen Q W, Cheng Z N, Qu S. Individual-based modelling of fish population dynamics in the river downstream under flow regulation. *Ecological Informatics*, 2010, 5(2): 115-123.
- [23] Chen Q W, Cheng Z N, Cai D S, Wu S Y. Analysis on the downstream fish responses to reservoir operation using individual-based model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(8): 897-903.
- [24] Li R N, Chen Q W, Ye F. Modelling the impacts of reservoir operations on the downstream riparian vegetation and fish habitats in the Lijiang River. *Journal of Hydroinformatics*, 2009, (in press). doi:10.2166/hydro.2010.008

参考文献:

- [6] 宋波澜, 林小涛, 王伟军, 李国文. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化. *动物学报*, 2008, 54(4): 686-694.
- [15] 刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 余伟, 刘德富. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究. *水科学进展*, 2009, 20(6): 812-817.
- [16] 余国安, 王兆印, 张康, 王费新. 人工阶梯-深潭改善下切河流水生栖息地及生态的作用. *水利学报*, 2008, 39(2): 162-167.
- [17] 水利部交通部南京水利科学研究所. 鱼道. 北京: 电力工业出版社, 1982: 102-111.
- [21] 李若男, 陈求稳, 吴世勇, 蔡德所, 王洪梅. 模糊数学方法模拟水库运行影响下鱼类栖息地的变化. *生态学报*, 2010, 30(1): 128-137.
- [23] 陈求稳, 程仲尼, 蔡德所, 吴世勇. 基于个体模型模拟的鱼类对上游水库运行的生态响应分析. *水利学报*, 2009, 40(8): 897-903.

CONTENTS

Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes YI Liangpeng, WANG Zuwei (1195)

Population dynamics of endophytic bacteria isolated from the roots of infected *Cymbidium faberi* YANG Na, YANG Bo (1203)

Spatial variability of forest soil total nitrogen of different soil layers ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, WANG Yousheng, et al (1213)

Habitat prediction for forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Qinling mountain range based on niche model LUO Chong, XU Weihua, ZHOU Zhixiang, et al (1221)

Growth release determination and interpretation of Korean pine and Koyama spruce in Shengshan National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China WANG Xiaochun, ZHAO Yufang (1230)

Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals LI Weihuan, YU Lanlan, CHENG Xianhao, et al (1240)

Characters of the OMI NO₂ column densities over different ecosystems in Zhejiang Province during 2005—2009 CHENG Miaomiao, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (1249)

The forest gap diameter height ratio in a secondary coniferous forest of Guan Di Mountain FU Liyong, TANG Shouzheng, LIU Yingan (1260)

Landscape responses to changes in water levels at Poyang Lake wetlands XIE Dongming, ZHENG Peng, DENG Hongbing, et al (1269)

Effect of simulated nitrogen deposition on litter decomposition in a *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocala mopsi* plantation, Rainy Area of West China TU Lihua, DAI Hongzhong, HU Tingxing, et al (1277)

Effect of aromatic plant-derived nutrient solution on the growth, fruit quality and disease prevention of pear trees GENG Jian, CUI Nannan, ZHANG Jie, et al (1285)

Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land MA Zhongming, DU Shaoping, XUE Liang (1295)

Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling ZHANG Renhe, ZHENG Youjun, MA Guosheng, et al (1303)

Photosynthetic diurnal variation characteristics of leaf and non-leaf organs in winter wheat under different irrigation regimes ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, WANG Zhimin (1312)

The root system hydraulic conductivity and water use efficiency of alfalfa and sorghum under water deficit LI Wenrao, LI Xiaoli, ZHANG Suiqi, et al (1323)

Latitudinal gradient in beta diversity of forest communities in America CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1334)

Influence of silts on growth and development of *Acorus calamus* and *Acorus tatarinowii* in turbid water LI Qiang, ZHU Qihong, DING Wuquan, et al (1341)

Roles of earthworm in phytoremediation of pyrene contaminated soil PAN Shengwang, WEI Shiqiang, YUAN Xin, et al (1349)

Population dynamics of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) along with analysis on the meteorological factors influencing the population in pomegranate orchards LIU Ling, CHEN Bin, LI Zhengyue, et al (1356)

Geophagy of *Macaca Thibetana* at Mt. Huangshan, China YIN Huabao, HAN Demin, XIE Jifeng, et al (1364)

The structure and dynamic of insect community in Zhalong Wetland MA Ling, GU Wei, DING Xinhua, et al (1371)

Analysis of layer progressive discriminant relations between the occurrence of *Bipectilus zhejiangensis* and soil DU Ruiqing, CHEN Shunli, ZHANG Zhengtian, et al (1378)

New mutations in hind wing vein of *Apis cerana cerana* (Hymenoptera: Apidae) induced by lower developmental temperature ZHOU Bingfeng, ZHU Xiangjie, LI Yue (1387)

18S rRNA gene variation and phylogenetic analysis among 6 orders of Bivalvia class MENG Xueping, SHEN Xin, CHENG Hanliang, et al (1393)

Laboratory study on ethology of *Spinibarbus hollandi* LI Weiming, CHEN Qiuwen, HUANG Yingping (1404)

Dynamic change in ecological footprint of energy consumption for traction of locomotives in China HE Jicheng (1412)

Approach to spatial differences analysis of urban carrying capacity: a case study of Changzhou City WANG Dan, CHEN Shuang, GAO Qun, et al (1419)

Social adaptive capacity for water resource scarcity in human systems and case study on its measuring CHENG Huaiwen, LI Yuwen, XU Zhongmin (1430)

Effects of physical leaf features of host plants on leaf-mining insects DAI Xiaohua, ZHU Chaodong, XU Jiasheng, et al (1440)

Review and Monograph

Progresses of free-air CO₂ enrichment (FACE) researches on C₄ crops: a review WANG Yunxia, YANG Lianxin, Remy Manderscheid, et al (1450)

Scientific Note

Influence of limestone powder doses on fine root growth of seriously damaged forests of *Pinus massoniana* in the acid rain region of Chongqing, China LI Zhiyong, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1460)

Leaf surface microstructure of *Ligustrum lucidum* and *Viburnum odoratissimum* observed by Atomic force microscopy (AFM) SHI Hui, WANG Huixia, LI Yangyang, LIU Xiao (1471)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次, 全国排名第 1; 影响因子 1.812, 全国排名第 14; 第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊; 中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 5 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 5 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址: 北京海淀区双清路 18 号
邮政编码: 100085
电话: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址: 北京海淀区双清路 18 号
邮政编码: 100085

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址: 东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717
电话: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱
邮政编码: 100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

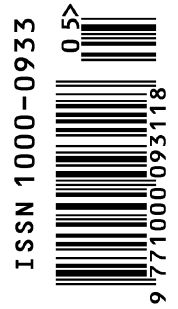
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元