DOI:10.15928/j.1674-3075.2019.04.012

草鱼洄游的适宜流速条件与适应阈值

杨 庆[1,2],胡 鹏[2],杨泽凡[2],储立民[2],杨 静[3]

(1.华北水利水电大学 水利学院,河南 郑州 450045;
2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;
3.江苏省太仓市水务局,江苏 苏州 215400)

摘要:洄游通道的连通性及其水文条件,是制约鱼类正常洄游和产卵繁殖的关键因素,现有的生态流量相关研究更多侧重于产卵场栖息地模拟,忽略了鱼类洄游水流条件的重要性。为了探究流速条件对鱼类洄游上溯的影响,选取体长(55±5) cm的草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)为实验对象,通过搭建鱼类洄游仿真河道,营造不同的流速工况,观察不同情景方案下实验鱼群上溯洄游情况,并利用模糊逻辑法对鱼类上溯洄游率、平均上溯时间及上溯持续性等实验参数进行综合分析,探索草鱼洄游的适宜流速条件与适应阈值。结果显示,在流速0.20 m/s以下时,草鱼基本无上溯行为;流速0.25~0.80 m/s,70%样本在15 min内完成上溯,但0.25~0.30 m/s时,鱼群上溯缺乏明显的持续性;0.90~1.00 m/s时,80%以上样本在5 min快速完成上溯;流速超过1.1 m/s时,上溯成功率明显降低。研究表明,实验草鱼洄游的适宜流速范围是0.40~1.00 m/s,而刺激草鱼洄游的最小流速阈值是0.20 m/s。相关结果可为河流生态水力学模拟和河流生态修复以及水利工程生态调度提供技术支撑。

关键词:草鱼;洄游;流速;阈值

中图分类号:Q331 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2019)04-0093-08

鱼类通过洄游,更换生活水域,以满足不同生活时期的需要,顺利完成生活史中繁殖、索饵、越冬等重要生命活动(常剑波等,2008)。以往栖息地模拟等具有物理机制的河湖生态需水研究,聚焦于以鱼类"三场"为代表的具体生境适宜水文条件,而较少关注鱼类不同生活时期到达适宜生境之前进行洄游的水文条件需求。以最为典型的生殖洄游为例,欧美国家河流径流量年内过程相对均衡,鱼类生殖洄游所需水文条件基本能得到满足;而我国受季风气候影响,鱼类生殖洄游的高峰期(南方3-5月,北方4-6月)尚处于汛前的低流量期,且与农田灌溉用水高峰期重合,生态和经济用水竞争激烈。加之各种水利工程的调节,导致鱼类产卵期大量河流中下游流量减小,流速缓慢,不足以对鱼类洄游形成连续的刺激和引导作用,部分区段如果水深过浅也会造成鱼类洄游通道的阻隔,使其不能顺利到达产卵繁殖的适宜生境,严重影响鱼类丰富度和多样性。因此,在开展河流生态流量核定、水利工程生态调度和河流健康修复时,明晰典型鱼类洄游对于水深、流速等水文要素的适应阈值和适宜范围尤为重要。

洄游是鱼类长期对外界环境条件变化的适应结果。冯宪斌等(2013)在室内微生境模拟条件下,应用实验生态学方法,分别评估了岩原鲤幼鱼对底质、光照、水深3种生境因子的适宜性指数;诸葛亦斯等(2013)以幼鲫为实验对象,通过流速渐变环形水槽展开实验,得到幼鲫生长对流速的关系,由此建立鱼类栖息地适宜性曲线;Vilizzi(2014)通过构造流量与水深的不同组合,分析了环境变化对幼年河鲃偏好曲线的影响。但现有实验更多集中于水文要素与鱼类某一生活时期生境数量和质量之间相关关系的研究,而对于鱼类洄游过程与水文要素的响应关系却较少开展系统性研究。在生态水文相关实验和实测数据的分析整理方面,近年来,人工神经网络(Mouton,2009)、模糊逻辑法(Muñoz-Mas,2012)、遗传算法(Maeda,2013)等数值算法,被广泛应用到水力学因子的栖息地适宜度曲线建立中,数值分析方法的应用有效提高了实验数据的客观性和准确性。

草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)是我国"四大家鱼"之一,有着重要的生态价值与经济价值,属于

收稿日期:2018-06-05

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0404503,2016YFC0401302);国家自然科学基金(51509265,51625904);中国水科院基本科研业务费项目(WR0145B522017)。

作者简介:杨庆,1990年生,男,硕士研究生,研究方向为水生态及水资源。E-mail:83668230@qq.com

通信作者:胡鹏,1985年生,男,教授级高级工程师,主要从事生态水文和生态水力学研究。E-mail:hp5426@126.com

典型的江湖半洄游性鱼类。成年草鱼通常在江河干流的附属湖泊中摄食肥育，繁殖季节则结群往上游迁移和产卵，产后的亲鱼又陆续洄游到饵料丰盛的湖泊中索饵（许承双，2017）。秋末冬初鱼群也会从较浅的湖泊中游到江河干流的河床深处越冬。在整个洄游过程中，流速是关键的影响因素之一，趋流性的鱼类要靠流速的存在和大小来判断游泳和洄游的路线（Kemp，1999；Nykänen，2002；Morita，2010）。基于此，本文以草鱼为研究对象，通过在室内构建鱼类洄游适宜水文条件实验装置，对其洄游适宜流速范围及适应阈值开展研究。

1　材料与方法

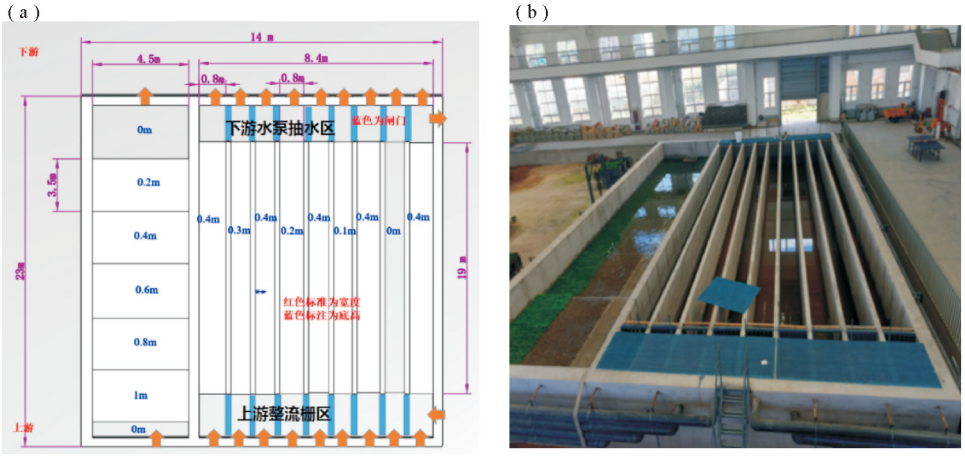
1.1　实验用鱼

实验用鱼由北京市某渔场提供，样本数60尾，鱼龄为2年，体长为（55±5）cm，体重为（1.2±0.3）kg。实验前，将草鱼放置在模拟河道稳定的水流中培养适应3 d，待摄食和行为正常后开始实验。实验用水为曝气7 d的自来水，水温为（20±1）℃，静水时溶解氧浓度维持在（6.50±0.50）mg/L，光照为室内自然光。

1.2　实验装置

实验于2017年6月13日至7月6日在中国水利水电科学研究院延庆实验基地内进行，实验装置如图1所示。

实验区域长23 m、宽14 m，包括9条模拟河道和1个阶梯型栖息地实验区，共布设11个水泵，单个水泵流量为0.1 m^3/s，河道上游布设有可调节开闭程度控制流量大小的整流栅。实验装置右侧部分为9条不同河底高程的河道，每条河道长19.0 m、宽0.8 m。从右到左编号1～9，其中1、3、5、7、9河道底高0.4 m，主要进行相同水深下、不同流速的对比实验；2、4、6、8河道底高分别为0、0.1、0.2、0.3 m，主要进行不同水深的对比实验。装置左侧部分为阶梯型栖息地实验区，每级阶梯区长度3.5 m，宽度4.5 m，相邻两阶高度间隔0.2 m，该实验区主要进行鱼类栖息位置分布观测及最小上溯洄游水深实验。



（a）：设计图；（b）：实况图

图1　鱼类栖息洄游适宜水文条件实验装置

（a）：Schematic diagram of experimental apparatus；（b）：Photograph of experimental apparatus

Fig.1　Experimental apparatus for simulating hydrological conditions of fish habitat

实验开始时，由下游水泵产生循环水流，水流通过上游河道整流栅和阻水网后形成稳定的流场。通过控制水泵开启的数量与整流栅的开闭度，调控模拟河道的水深和流速。采用多普勒流速流量计与1206B便携式流速仪共同测量河道流速，以提高其测量的准确性。实验水槽的可控流速为0.15～1.20 m/s，水深0.2～1.0 m。由于实验观察发现在水深0.2 m以上，同一流速下不同水深对于鱼类洄游无显著影响，因此本次实验主要开展相同水深下的不同流速对比实验。实验观察采用人工记录与摄像机拍摄相结合的方式，摄像机分别设置在河道水池的上、中、下游，记录鱼类上溯洄游的全过程，以分析鱼类洄游的适宜流速范围及阈值。

1.3　实验方法

首先选出10尾草鱼样本放入单河道中进行多次预实验，对实验鱼上溯洄游情况进行摸底，并完善实验观察步骤。通过预实验，判定鱼群上溯成功的标志为游到河道上游整流栅下1 m范围内；适宜观测时间为15 min，即在不同水流条件下，鱼群在15 min以内如果不能上溯成功，则判定为洄游失败。

实验前，在距下游 3、6、9、12、15 m 及整流栅下 1 m 的河道关键断面进行标记；然后为每条实验河道设置不同的流速条件，并对流速、水深、水温、溶解氧等基本条件进行测量和记录；接下来将实验鱼分为 5 组，每组实验鱼类样本 10 条左右，分别放入不同的实验河道中，通过自制鱼网将鱼群趋至河道下游 3 m 范围内，待鱼群稳定身形后撤开鱼网，开始计时和观测。通过记录鱼群到达各关键断面的时间及停留回落情况，统计鱼群上溯成功率和整体上溯时间，定量描述不同水文条件下的鱼群上溯洄游情况。为了减小鱼类活性影响等实验误差，每种流场条件重复开展实验不少于 10 组（大流速条件下每次实验结果基本一致，重复次数降低为不少于 5 组），同一组鱼类样本两次实验之间的时间间隔不少于 2 h。

1.4　数据处理

在本实验中，根据单一的上溯洄游率或平均上溯时间指标来衡量鱼群的上溯情况均有失偏颇，需要建立起一个综合的适宜度指标来反映鱼类上溯洄游对于不同流速条件的适宜度。模糊逻辑法能够有效地应用不精确或多重影响因子的实验数据，并结合模糊知识进行定量化数据分析。因此，为了得到更加准确的草鱼洄游流速适宜度曲线，本文运用模糊逻辑法对实验结果进行处理和分析。

模糊逻辑方法是以模糊集合论、模糊逻辑、模糊语言变量以及模糊推理为基础的一种非线性的控制技术（郝冬，2009）。此方法首先建立隶属度函数对输入变量进行模糊化处理，然后利用制定的模糊规则进行模糊推理，最后进行去模糊化处理，得到准确的输出变量。

模糊逻辑法基本结构如图 2 所示；其中，建立隶属度函数和模糊规则是其核心部分。

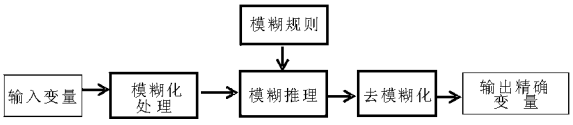


图 2　模糊逻辑法的基本结构

Fig.2　Basic structure of the fuzzy logic method used to analyze experimental data

模糊逻辑法的主要步骤如下：

（1）建立隶属度函数。根据室内实验的观测结果，选取最终（15 min）上溯成功率、5 min 上溯成功率、平均上溯时间、上溯持续性 4 项指标，对各项指标及其适宜度指数建立模糊集合的隶属度函数（图 3）。上溯成功率的语言变量值有低（low）与高（high）；平均上溯时间的语言变量有快（rapid）、中（mid）、慢（slow）；上溯持续性主要根据鱼群是否长时间停留或是否多次完成上溯进行判断，只有是（T）与否（F）两种选择，即隶属度只有 0 或 1。综合

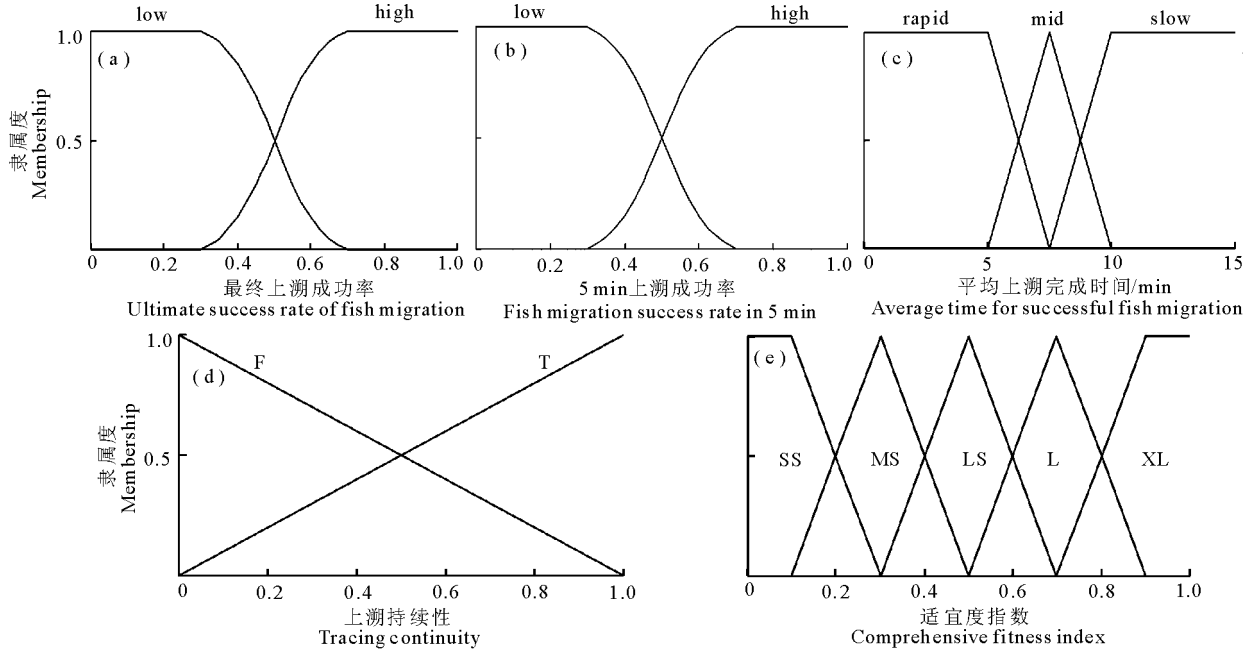


图 3　各参数隶属度函数

Fig.3　Membership function for each parameter

适宜度的取值范围为0～1；0表示最不适宜，1表示最适宜；其语言变量值为极差(SS)、差(MS)、中(LS)、好(L)、极好(XL)。

(2)制定模糊规则。模糊集合建立后，需制定模糊规则将各分项指标与综合适宜度指数联系起来。在模糊集合系统中，每条模糊推理规则包括有条件部分和结论部分，以if-then的形式展现，根据实验观测结果制定了24条模糊规则(表1)。

表1 模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules

最终上溯成功率	5 min上溯成功率	上溯完成时间	是否长时间停留或多次完成上溯	适宜度	最终上溯成功率	5 min上溯成功率	上溯完成时间	是否长时间停留或多次完成上溯	适宜度
high	high	rapid	T	XL	low	low	rapid	T	MS
high	high	rapid	F	LS	low	low	rapid	F	SS
high	high	mid	T	L	low	low	mid	T	MS
high	high	mid	F	MS	low	low	mid	F	SS
high	high	slow	T	LS	low	low	slow	T	SS
high	high	slow	F	MS	low	low	slow	F	SS
high	low	rapid	T	L	low	high	rapid	T	L
high	low	rapid	F	LS	low	high	rapid	F	MS
high	low	mid	F	MS	low	high	mid	F	MS
high	low	mid	T	LS	low	high	mid	T	LS
high	low	slow	T	MS	low	high	slow	T	MS
high	low	slow	F	MS	low	high	slow	F	SS

(3)去模糊化处理。模糊推理的输出结果是一个模糊集(张国良，2002)，必须进行去模糊化处理，使输出结果转变成一个确定值。去模糊化方法有面积中心法、面积积分法、极大值法等。本文采用最为常用的面积中心法，其原理是计算输出模糊集合曲线包围区域的重心，计算方法如下：

$$V_{cog}=\int_{z_{min}}^{z_{max}} z\mu_c(z)dz \Big/ \int_{z_{min}}^{z_{max}} \mu_c(z)dz \qquad (1)$$

式中：z为变量语言的明确值；z_{min}与z_{max}为z的最小值与最大值；$\mu_c(z)$为语言C的隶属函数；V_{cog}为去模糊化后的明确值。

利用MATLAB模糊逻辑工具箱，在完成以上步骤后，输入最终上溯成功率、5 min上溯成功率、平均上溯时间、上溯持续性4项指标，分别计算各流速工况下的综合适宜度指数。由于在去模糊化中采用了重心法，因此在计算综合适宜度时，其理论最小值和最大值并不是0和1，而是图3-e中SS和XL所在直角梯形的重心对应的适宜度指数，分别是0.108和0.892。因此，对于根据重心法计算出的适宜度值，可以利用式(2)进行处理，得到适宜度按照从0到1标准化处理后的结果：

$$V_{cogs}=(V_{cog}-V_{min})/(V_{max}-V_{min}) \qquad (2)$$

式中：V_{cogs}是标准化处理后的适宜度值；V_{cog}为去模糊化后的明确值；V_{min}是按照重心法的理论最小适宜度值；V_{max}是按照重心法的理论最大适宜度值。

2 结果与分析

2.1 不同流速下草鱼上溯情况

实验共开展草鱼洄游实验197组，通过人工观察及实验录像分析，不同流速下草鱼5 min和15 min的上溯洄游成功率情况及上溯时间如表2和图4－6所示。

由图4可以看出，流速0.15～0.50 m/s时的平均洄游时间波动较大。流速大于0.50 m/s时，随着流速的增加，鱼类样本平均洄游时间显著下降，说明高流速对于草鱼洄游的刺激作用更强，但并非流速越大，越适宜于鱼类洄游。草鱼在流速0.90～1.00 m/s上溯成功率到达顶峰后，随后洄游率急剧下降(图5，图6)。结合实际观察记录发现，随着实验流速的增大，草鱼洄游上溯情况大致可分为5个阶段：

第一阶段：在流速≤0.20 m/s时，草鱼上溯洄游率极低，鱼群基本没有上溯行为，大部分鱼类在河道下游5 m范围内停留徘徊，且鱼头朝向各异，未形成有效洄游刺激。

第二阶段：流速0.25～0.3 m/s时，5 min内约40%的样本完成上溯洄游，15 min内70%以上的样本完成洄游，但上溯过程中鱼群会在中途长时间停留，到达上游后基本不停留，随即退至中下游徘徊。

第三阶段：流速0.35～0.80 m/s时，5 min内约50%的样本完成上溯，15 min内70%左右的样本完

表 2　不同流速下草鱼上溯情况统计

Tab.2　Migration statistics of adult grass carp at different flow rates

流速/ m·s^{-1}	实验次数	样本总数	完成上溯样本数		上溯成功率/%		平均上溯时间*/ min
			5 min	15 min	5 min	15 min	
0.15	10	78	1	7	1.3	9.0	–
0.20	14	135	28	63	19.3	43.4	9.6
0.25	11	117	47	86	40.2	73.5	6.6
0.30	18	197	82	154	41.6	78.2	9.4
0.35	13	117	71	87	60.7	74.4	6.7
0.40	18	191	105	163	55.0	85.3	7.9
0.45	12	170	82	114	48.2	67.1	5.9
0.50	20	220	94	196	42.7	89.1	8.6
0.55	14	123	78	105	63.4	85.4	7.3
0.60	15	144	76	107	52.8	74.3	7.2
0.70	15	138	67	104	48.6	75.4	6.8
0.80	9	93	52	64	55.9	68.8	5.6
0.90	7	48	40	43	83.3	89.6	4.5
1.00	8	80	70	72	87.5	90.0	4.8
1.10	6	47	21	21	44.7	44.7	3.5
1.20	7	77	29	29	37.7	37.7	2.5

注：* 平均上溯时间指该流速下各次实验中鱼类样本上溯洄游所需时间的平均值；单次实验中鱼类样本上溯洄游所需时间指该次实验中成功上溯的鱼类样本首次洄游到指定区域的时间。

Note: * The average migration time refers to the average time for test fish to swim through the migration channel at a given flow rate. The time for a test fish in a single experiment refers to the time required for the fish to swim through the migration channel.

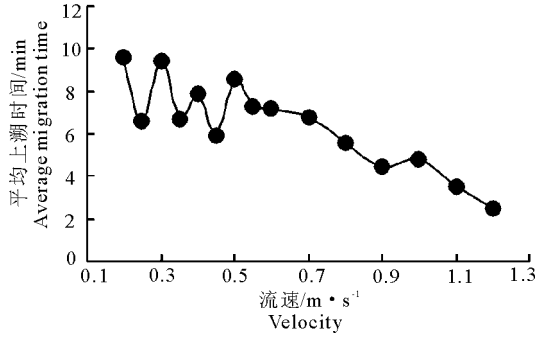


图 4　不同流速条件下洄游时间变化

Fig.4　Variation of migration time for different flow rates

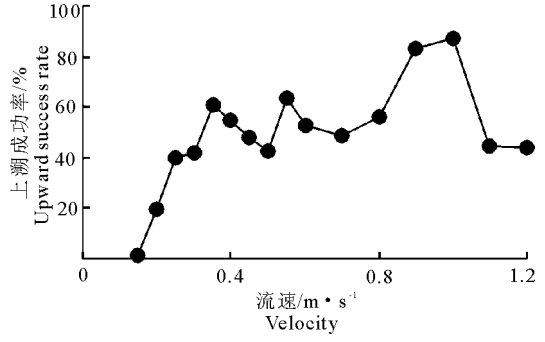


图 5　草鱼 5 min 上溯成功率

Fig.5　Rate of successful migration for adult grass carp in 5 min

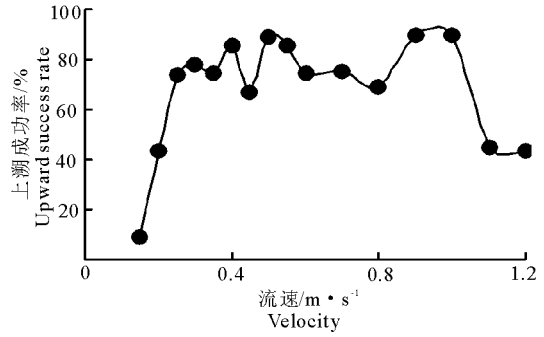


图 6　草鱼 15 min 上溯成功率

Fig.6　Rate of successful migration for adult grass carp in 15 min

成上溯。鱼群上溯过程比较连续，表现出明显的上溯意愿，到达上游后多数会较长时间停留或退回后多次反复上溯。

第四阶段：流速 0.90～1.00 m/s 时，80% 以上的样本 5 min 内完成上溯，鱼群迅速到达上游后会长时间停留至观测结束。

第五阶段：流速≥1.10 m/s 时，草鱼上溯洄游率急剧降低，到达上游的草鱼会立即回退至最下游，一般不再继续上溯，至观测结束，鱼群基本位于下游 5 m 范围内艰难维持游泳形态。

从实验结果可以看出，流速大于 1.00 m/s 或小于 0.25 m/s 并不属于该规格草鱼洄游适宜流速范围。在 0.25～1.00 m/s 流速范围内，鱼群虽然多数能在 15 min 观察期内完成上溯，但流速在 0.35 m/s 以下时，鱼群上溯至阻水网后就退回，不再持续上溯；而流速达到 0.90 m/s 后，鱼群上溯速度明显加快，相比中低流速，对于鱼类洄游的刺激和引导作用更加强烈。

2.2　洄游流速适宜度指数

运用模糊逻辑法，结合每组实验记录的关键评价指标，得出对应的适宜度指数，汇总同一流速工况，取平均值作为该流速下的适宜度指数，结果如表 3 和图 7 所示。

由图 7 可以看出，流速 0.15 m/s 对应的草鱼洄游适宜度是 0，0.20 m/s 对应的适宜度指数为 0.162，可将 0.20 m/s 作为刺激草鱼洄游的最小流速阈值；在流速 0.40 m/s 和 1.00 m/s 时，草鱼洄游的适宜度达到峰值，均超过 0.8；而在此流速区间内，适宜度指数均处于较高水平，达到峰值的 80%。因此可初步判定 0.40～1.00 m/s 是草鱼洄游的适宜流速范围；当流速超过 1.10 m/s 时，草鱼洄游适宜度指数已降至 0.188 以下，上溯洄游成功率明显降低，已经不适宜草鱼洄游。

表3 各流速梯度下适宜度指数汇总

Tab.3 Suitability index for adult grass carp migration at each flow rate

流速/m·s^{-1}	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
适宜度指数	0.000	0.162	0.407	0.412	0.771	0.804	0.689	0.698
流速/m·s^{-1}	0.55	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
适宜度指数	0.739	0.662	0.636	0.694	0.765	0.802	0.188	0.062

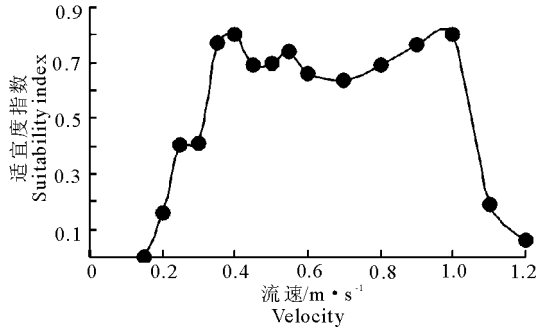


图7 不同流速下草鱼洄游的适宜度指数

Fig.7 Suitability index for adult grass carp migration for each flow rate

3 讨论

3.1 流速对草鱼洄游适宜度的影响

本文以草鱼为实验对象，通过建立仿真洄游河道，对不同流速梯度下鱼群的上溯洄游情况进行观察统计，并结合模糊逻辑法得到草鱼洄游的适宜流速范围是0.40～1.00 m/s，最小流速阈值是0.20 m/s，超过1.10 m/s后，洄游成功率明显降低。

3.2 不同实验方法的结果差异对比

本实验主要探求天然河道中亲鱼生殖洄游的适宜流速范围，从而为洄游性鱼类正常繁殖提供有效的流速刺激和通道条件；而现有研究中，大多以鱼道设计需求为目标，一般采用“递增流速法”来探求满足其通过鱼道的感应流速、喜好流速和极限流速；从以往的研究成果来看，“四大家鱼”游泳能力的研究主要集中于幼鱼；本实验研究结果发现洄游流速最小阈值与赵希坤(1980)研究得出草鱼幼鱼的感应流速一致，但高于白艳琴(2013)与曹平(2017)的研究结果；有研究发现，鱼的体长与感应流速无关(何大仁，1998；白艳琴，2013)，产生差异原因可能与实验方法不同有关。在洄游适宜流速方面，本研究结果要普遍高于赵希坤(1980)与谭均军(2017)测定的草鱼幼鱼喜好流速范围0.3～0.6 m/s和0.16～0.4 m/s。至于最大流速阈值，赵希坤(1980)与方敏(2014)测定草鱼幼鱼的临界流速均为0.7 m/s左右；龚丽等(2015)测定了体长5.0～15.0 cm的草鱼幼鱼临界游泳速度在0.68～1.0 m/s，与本实验洄游成功率明显降低的1.10 m/s流速相比也偏小。适宜流速及临界流速值与本实验差异较大原因可能与鱼的体长相关，有学者研究认为鱼类游泳的适宜流速与临界流速与体长有密切关系，适宜流速范围与临界游泳速度随着体长增大而增加(张硕，2005；龚丽，2015；俞立雄，2017)，因此幼鱼相对于体型较大的鱼，其游泳能力要弱很多，也与实验采用的方法不同相关。

3.3 不足与展望

由于实验场地和条件的限制，该研究目前还存在诸多不足之处，例如洄游河道长度较短、渔场养殖的鱼类样本与野生鱼类可能存在一定的习性差异；从影响鱼类洄游的因素上来看，也仅仅考虑了流速，下一阶段可结合不同鱼类生长阶段，深入研究水深、流速、溶解氧、水温等综合条件对于鱼类栖息洄游的影响机理。

参考文献

白艳勤，路波，罗佳，等，2013. 草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较[J]. 生态学杂志，32(8)：2085－2089.

曹平，穆祥鹏，白音包力皋，等，2017. 与鱼道水力设计相关的草鱼幼鱼游泳行为特性研究[J]. 水利学报，48(12)：1456－1464.

常剑波，陈永柏，高勇，等，2008. 水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策[C]// 北京：中国水利学会2008学术年会论文集(上册).

房敏，蔡露，高勇，等，2014. 运动消耗对草鱼幼鱼游泳能力的影响[J]. 长江流域资源与环境，23(6)：816－820.

冯宪斌，何凤勇，2013. 实验条件下岩原鲤幼鱼栖息地适宜性模型及最小栖息面积估算[J]. 应用生态学报，24(1)：228－233.

龚丽，吴一红，白音包力皋，等，2015. 草鱼幼鱼游泳能力及游泳行为实验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，13(3)：211－216.

郝冬，刘斌，2009. 基于模糊逻辑行为融合路径规划方法[J]. 计算机工程与设计，30(3)：660－663.

何大仁，1998. 鱼类行为学[M]. 厦门大学出版社.

齐亮，杨宇，王悦，等，2012. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J]. 河海大学学报(自然科学版)，40(4)：438－445.

谭均军，高柱，戴会超，等，2017. 竖缝式鱼道水力特性与鱼

类运动特性相关性分析[J]. 水利学报, 48(8):924 - 932.

许承双,艾志强,肖鸣,2017.影响长江四大家鱼自然繁殖的因素研究现状[J]. 三峡大学学报(自然科学版),39(4):27 - 30,59.

俞立雄, 段辛斌, 陈大庆,等, 2017. 5 种鱼类标志对草鱼临界游泳速度的影响[J]. 中国水产科学, 24(3):550 - 557.

张国良, 2002. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安:西安交通大学出版社.

张硕, 陈勇, 2005. 黑鲩幼鱼趋流性的初步研究[J]. 上海海洋大学学报, 14(3):282 - 287.

赵希坤, 韩桢锷, 1980. 鱼类克服流速能力的实验[J]. 水产学报, 4(1):31 - 37.

诸葛亦斯, 刘德富, 谭红武, 2013. 鱼类栖息地流速适宜性曲线实验方法[J]. 水利学报, 44(s1):1 - 7.

Kemp J L, Harper D M, Crosa G A, 1999. Use of 'functional habitats' to link ecology with morphology and hydrology in river rehabilitation[J]. Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems, 9(1):159 - 178.

Maeda S, 2013. A simulation-optimization method for eco-hydraulic design of fish habitat in a canal[J]. Ecological Engineering, 61(8):182 - 189.

Morita K, Yamamoto S, 2010. Effects of Habitat Fragmentation by Damming on the Persistence of Stream-Dwelling Charr Populations[J]. Conservation Biology, 16(5):1318 - 1323.

Mouton A M, Baets B D, Broekhoven E V, et al, 2009. Prevalence-adjusted optimisation of fuzzy models for species distribution[J]. Ecological Modelling, 220(15):1776 - 1786.

Munoz-Mas R, Martínez-Capel F, Schneider M, et al, 2012. Assessment of brown trout habitat suitability in the Jucar River Basin (SPAIN): Comparison of data-driven approaches with fuzzy-logic models and univariate suitability curves[J]. Science of the Total Environment, 440(3):123 - 131.

Nykänen M, Huusko A, 2002. Suitability criteria for spawning habitat of riverine European grayling[J]. Journal of Fish Biology, 60(5):1351 - 1354.

Vilizzi L, Copp G H, Roussel J M, 2004. Assessing variation in suitability curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use[J]. River Research & Applications, 20(5):605 - 618.

(责任编辑　万月华)

Suitable Flow Rate and Adaptive Threshold for Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*) Migration

YANG Qing[1,2], HU Peng[2], YANG Ze-fan[2], CHU Li-min[2], YANG Jing[3]

(1.North China University of Water Resources and Electric Power Hydraulic Institute, Zhengzhou 450045,P.R.China;
2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Regulation, Beijing 100038,P.R.China;
3.Water Authority of Taicang City, Jiangsu Province, Suzhou 215400,P.R.China)

Abstract: Connectivity and hydrological conditions in migratory channels are the key factors limiting fish migration and spawning. Existing studies on ecological flow focus on simulating spawning habitat rather than the importance of hydrological conditions. In this study, we simulated the fish migration channel and explored the effect of flow condition on migration behavior. Grass carps of average length (55±5) cm were selected for testing and their swimming behavior at different flows was recorded by camera. To determine suitable flow rates and migration threshold for grass carp, fuzzy logic was used to analyze fish migration rate, average migration time and migration persistence. The key findings are as follows: (1) At flow rates below 0.20 m/s, test fish did not display migration behavior. (2) In the velocity range 0.25 - 0.80 m/s, 70% of the fish completed the migration channel within 15 minutes, but were not persistent at 0.25 - 0.30 m/s. (3) In the velocity range 0.90 -1.00 m/s, more than 80% of the fish completed the migration channel in 5 minutes. (4) The rate of successful migration decreased significantly at velocities above 1.1 m/s. Thus, the optimum velocity range for grass carp migration is 0.40 - 1.00 m/s and 0.20 m/s is the threshold for stimulating migration behavior. These results provide information to support hydraulic simulation, river ecological restoration and ecological regulation of water conservancy projects.

Key words: grass carp; migration; optimal flow; migration threshold