

文章编号:0559-9350(2021)12-1430-09

漂流性鱼卵安全漂流的临界水动力条件实验研究

胡 鹏, 唐家璇, 杨泽凡, 曾庆慧, 杨明达

(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)

摘要: 漂流性鱼卵安全漂流的水动力条件对于生态流量目标制定、鱼类生境保护和早期资源量恢复具有重要意义。为了探求近天然条件下鱼卵安全漂流的临界水动力条件, 本文通过建设室外大型明渠, 对56种不同工况下, 不同流速、水深、水面宽以及水流雷诺数对鱼卵漂流的影响进行了实验研究。结果表明: 水面宽一定时, 鱼卵安全漂流对流速的要求随水深的升高而降低; 水深一定时, 在一定流速范围内, 水面越宽, 鱼卵收集率越高; 相比于单一流速条件, 以水流雷诺数作为漂流性鱼卵能否安全漂流的判别条件更加科学合理, 在明渠均匀流中, 水流雷诺数达到 7.9×10^4 以上时, 鱼卵收集率超过90%, 实现安全漂流。相关成果对于开展天然河流鱼类产卵期敏感生态需水目标制定、鱼卵漂流轨迹模拟、水利工程生态调度等具有支撑作用。

关键词: 漂流性鱼卵; 水动力条件; 明渠均匀流; 雷诺数; 生态流量

中图分类号: X143

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20210360

1 研究背景

以四大家鱼为典型代表的产漂流性卵鱼类, 受精卵需要一定的漂流时间和距离, 在顺水漂流过程中孵化并发育至具有自主游泳能力的仔鱼, 这有利于物种的散布和躲避敌害^[1-3]。漂流性鱼卵一旦沉底, 则会因触底造成的破碎、泥沙掩埋导致的缺氧等原因而死亡^[4-6]。随着水库大坝等拦河建筑物的大量修建, 河流水动力条件大幅改变^[7-8], 可能无法满足维持鱼卵漂流孵化的流速^[9]、流态^[10]、漂程^[11]等条件, 进而导致漂流性鱼卵不能成功孵化, 对产漂流性卵鱼类的物种多样性和丰度造成严重影响^[12-13]。此外, 漂流性鱼卵安全漂流的水动力条件是构建河流水文-生态响应关系的重要水文参数, 可服务于河流生态流量的相关研究^[14-16]。深入开展漂流性鱼卵安全漂流的临界水动力条件研究, 对于河流生态流量目标制定和鱼类保护具有重要意义。

目前, 关于鱼卵漂流的研究方法主要有实验观察和模型模拟两种, 实验观察又分为野外实验和室内实验^[17]。野外实验方面, 易伯鲁等^[18]在5—6月四大家鱼产卵期, 使用塑料标志物, 于长江干流江段开展漂流试验, 初步得到卵苗在江中平均漂流速度为0.947 m/s的结论。唐会元等^[19]在丹江口水库设置6处漂流性鱼卵采集断面, 根据各断面表、底层鱼卵分布变化, 认为流速为0.27 m/s时鱼卵开始下沉, 流速为0.1 m/s时鱼卵全部沉底。姜伟等^[20]在长江上游江段, 以植物种子作为标志物模拟漂流性鱼卵, 结果表明主要投放点投放的3组标志物平均漂流速度存在显著差异, 主要投放点和对照投放点投放的4组标志物漂流密度的高峰值、低峰值相间出现。

由于野外实验条件复杂、干扰因素众多, 在可控条件下开展重复性室内实验成为研究鱼卵运动和漂流对水动力需求的有效手段。唐明英等^[21]通过水槽实验, 研究了漂流距离为20 m时不同流速与四大家鱼鱼卵悬浮率的响应关系, 提出以0.25 m/s作为三峡水库库区漂流性鱼卵安全漂流的下限流

收稿日期: 2021-04-18; 网络首发时间: 2021-09-07

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210906.1655.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404503); 国家自然科学基金项目(52009146, 51625904)

作者简介: 胡鹏(1985-), 博士, 正高级工程师, 主要从事生态水文学和生态水力学研究。E-mail: hp5426@126.com

速。

Garcia等^[22]利用视频录像,对漂流距离为2 m时不同流速、河床形态对模型鱼卵运动的影响进行了研究,发现流速大于0.2 m/s时,平坦和非平坦河床形态下鱼卵悬浮率无明显差异。刘雪飞等^[23]借鉴泥沙实验机理,利用PTV粒子追踪测速技术,分析了恒定均匀流条件下漂流距离为4 m时不同流速、水深对模型鱼卵运动速度、轨迹的影响,并推导了适用于主流区的鱼卵运动方程,但由于实验条件限制,实验水深皆小于0.6 m。杨庆^[24]借助仿真河道,探究了漂流距离为19 m时流速、水深对鲢鱼受精卵漂流的协同作用,初步得出水深的降低需要一定程度上提高下限流速以保证鱼卵安全漂流的结论。

上述室内实验都对鱼卵漂流的水动力需求进行了研究,但大都局限于流速对鱼卵漂流和运动的影响,且由于实验装置的限制,实验过程中鱼卵漂流的距离十分有限,水深与天然河流相比也较小。王殿常等^[25]曾在探究明槽水流中颗粒运动特性时,计算了不同工况下的水流雷诺数,但由于实验工况较少,雷诺数变化范围很小,未深入关注水流雷诺数对颗粒运动的影响。在前述研究基础上,本研究拟通过在室外建设大型仿真河道,分析流速、水深、水面宽等因素对鱼卵漂流的协同影响机制,并探究决定漂流性鱼卵能否安全漂流的控制性因子及其阈值。

2 材料与方法

2.1 实验装置 本次实验在中国水利水电科学研究院延庆实验基地内开展,大型室外明渠实验装置和鱼卵收集装置如图1所示。

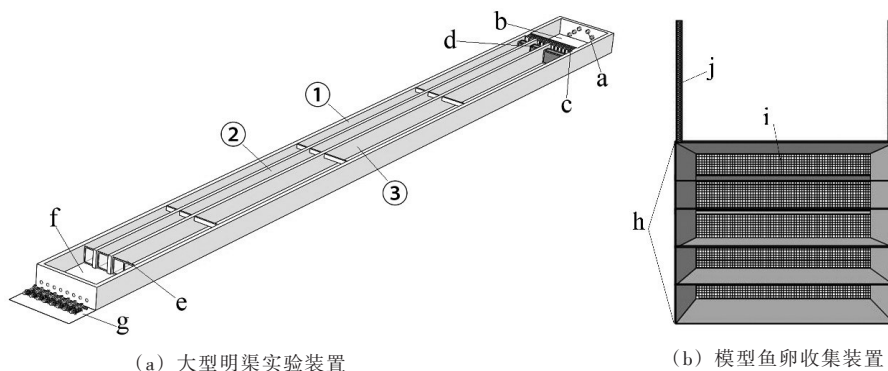


图1 大型明渠实验装置及模型鱼卵收集装置示意

大型明渠实验装置(见图1(a))整体长60 m、高1.5 m,矩形明渠①、②、③宽度分别为0.8、0.8和1.8 m,主要结构有:a为上游进水口、b为消能缓冲池、c为可调闸门、d为稳流栅、e为下游出水口、f为水泵抽水区、g为水泵。

模型鱼卵收集装置(见图1(b))主体宽0.8和1 m,高1.25 m,布置于下游出水口处,主要结构有:h为鱼卵收集区,共分5层,每层高0.25 m;i为纱网,规格为7目(直径2.8 mm);j为木质提升杆。

大型明渠实验装置利用8台水泵,通过输水管道将水流从下游出水口抽至上游消能缓冲池,以实现水体的循环流动,为实验提供水源及动力。通过改变水泵开启数量和闸门开度控制明渠进水量,从而控制水流流速。稳流栅设于闸门后,用于消能并稳定水流流态。此外,自制与水槽矩形断面形状一致的鱼卵收集装置,能够起到收集模型鱼卵,又不显著阻挡水流的作用。

2.2 实验材料 实验所用模型鱼卵的主要成分为海藻酸钠,具有一定的吸水膨胀特性,充分吸水膨胀后的直径介于4.0~5.0 mm,与四大家鱼受精卵吸水膨胀后的卵径4.0~5.3 mm^[21,26]基本一致。模型鱼卵吸水膨胀后的相对比重介于1.001~1.01,为更接近真实鱼卵的相对比重1.0014~1.0031^[21],利

用不同浓度梯度的盐水筛选出相对比重在 1.002 ~ 1.005 的模型鱼卵进行实验。经测量，模型鱼卵静水下沉速度为 0.0067 ~ 0.0095 m/s，与四大家鱼真实鱼卵基本一致，能够较好的反映漂流性鱼卵的各项物理性质。

2.3 工况设置 实验共设置 7 种流速、4 种水深、2 种水面宽，共计 56 种工况，每种工况进行 5 组对比实验，共计 280 组，实验工况基本参数见表 1。由于大型明渠实验装置位于室外，难以人为控制水温，实验过程中平均水温为 9.1 ℃，6.9 ~ 11 ℃ 范围的实验组占比为 83.2%。

水流雷诺数是一种用来表征流体流动情况、物体在流动中所受阻力的无量纲数^[27-28]，56 种工况下的不同实验组各对应一组雷诺数，可根据明渠水面宽以及水流的流速、水深和温度计算得到，计算公式为：

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{1}$$

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； v 为流体的平均流速， m/s ； d 为特征长度，由断面形状决定， m ； μ 为流体的动力黏滞系数，与温度相关， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

对于矩形明渠，特征长度 d 与其水力半径相关^[29]：

$$d = \frac{bh}{b + 2h} \tag{2}$$

式中： b 为矩形明渠的宽度， m ； h 为矩形明渠的高度， m 。

因此，矩形明渠中水流雷诺数的计算公式可表达为：

$$Re = \frac{\rho v}{\mu} \frac{bh}{b + 2h} \tag{3}$$

2.4 实验步骤 (1) 实验开始前，按预设水深从自备井中抽取地下水注入明渠。由于大型实验装置的水深较难精准控制，在各组实验中可能略有差异 ($\pm 2 \text{ cm}$)。(2) 实验开始时，先于下游出水口处布设鱼卵收集装置，再通过控制水泵开启数量和闸门开度将水流中层平均流速调至预设水平，流速采用 YSI Flow Tracker 流速仪和多普勒流速流量计共同测量，以提高测量的准确性。(3) 在水流中层使用水温计测得水温并记录。(4) 在上游水流稳定处 (距离下游出水口 50 m)，水面 10 cm 以下释放模型鱼卵，每组实验释放 200 颗模型鱼卵。(5) 达到预计最大漂流时间后，将鱼卵收集装置取出，对收集到的模型鱼卵进行人工计数，计算鱼卵收集率，并进行数据记录和分析。

3 结果与分析

由于本次实验过程中水温变化对水流动力黏滞系数的影响幅度较小，因此不单独考虑水温差异，重点针对流速、水深、水面宽以及水流雷诺数与鱼卵收集率的关系进行分析。

3.1 流速单因子对鱼卵漂流的影响 本研究对于 7 种不同流速的实验各进行了 40 组，不同流速下的鱼卵收集率如图 2 所示。流速在 0.1 ~ 0.25 m/s 范围内，鱼卵收集率先是随流速的增大而增加；当流速达到 0.25 m/s 后，鱼卵平均收集率达到 84.5%，与唐明英等^[21]和杨庆^[24]的实验结果基本一致。虽然 0.35、0.4 m/s 流速下鱼卵收集率较 0.25、0.3 m/s 流速下略有增加，鱼卵平均收集率达到了 91.0% 和 92.4%，但增加幅度不大，流速达到 0.25 m/s 后鱼卵收集率增加趋势基本趋于平缓。鱼卵收集率在 0.35 和 0.4 m/s 流速下与前人实验结果的差异，可能是因为唐明英等^[21]和杨庆^[24]所用实验材料为家鱼真卵，在漂流过程中存在破碎现象，影响最终计数结果，使鱼卵收集率偏小。

表 1 实验工况基本参数

水面宽/m	水深/m	流速/(m/s)
0.8	0.5	0.1
1.8	0.75	0.15
	1	0.2
	1.25	0.25
		0.3
		0.35
		0.4

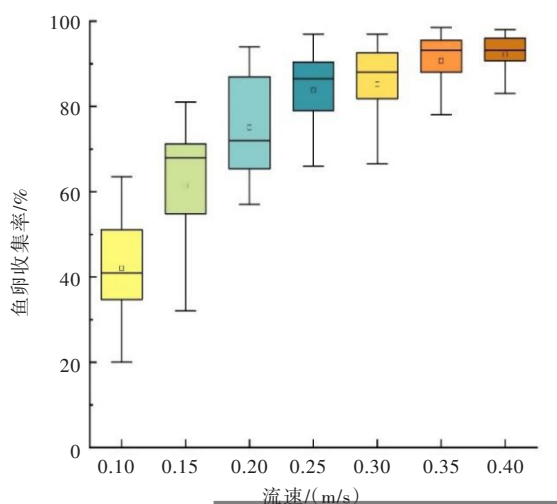


图2 不同流速条件下的鱼卵收集率

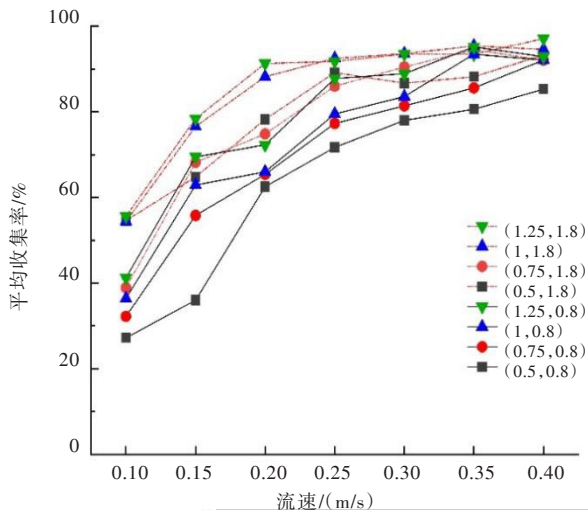


图3 不同水深、流速条件下的鱼卵平均收集率

另一方面, 根据图2的箱体变化可知, 流速小于0.3 m/s时, 各流速下的鱼卵收集率极差皆大于30%, 上、下四分位数之差皆大于10%, 一定程度上反映出在较低流速下(<0.3 m/s), 以流速单因子作为判别鱼卵能否安全漂流的临界条件存在不足。

3.2 流速和水深对鱼卵漂流的影响 图3分别展示了在两种水面宽下, 不同流速、水深组合条件对鱼卵漂流影响的实验结果。

由图3可知, 水面宽为0.8 m时, 对比相同流速、不同水深下的鱼卵平均收集率, 水深越大, 鱼卵平均收集率明显越高。其中, 在0.5和0.75 m水深下, 鱼卵平均收集率始终随流速的增大而上升, 未呈现出趋于平缓的迹象; 在1和1.25 m水深下, 当流速达到0.35 m/s时, 鱼卵平均收集率趋于稳定。水面宽为1.8 m时, 相同流速下, 0.5和0.75 m水深的鱼卵平均收集率均小于1和1.25 m水深平均收集率, 但其两两之间差距不显著。从变化趋势来看, 0.5和0.75 m水深下, 鱼卵平均收集率先随着流速的增大而增加, 当流速达到0.3 m/s时, 平均收集率开始趋于稳定; 而1和1.25 m水深下, 流速达到0.25 m/s时, 平均收集率即趋于稳定。

综上可以看出, 水面宽一定时, 水深越大对鱼卵实现安全漂流的临界流速要求越低。为了更清晰地说明不同水深下鱼卵安全漂流的流速需求, 参考唐明英等^[21]确定漂流性鱼卵安全漂流下限流速所对应的收集率, 以鱼卵平均收集率达到90%作为鱼卵安全漂流的标准, 不同水深下的临界流速需求见表2。

表2 不同水深下鱼卵安全漂流临界流速需求 (单位: m/s)

水面宽/m	0.5m 水深	0.75m 水深	1m 水深	1.25m 水深
0.8	>0.4	0.4	0.35	0.35
1.8	0.4	0.3	0.25	0.2

在0.8 m水面宽时, 若的保障鱼卵安全漂流, 0.5 m水深所需流速大于0.4 m/s; 0.75 m水深所需流速为0.4 m/s; 1、1.25 m水深所需流速为0.35 m/s。在1.8 m水面宽时, 若的保障鱼卵安全漂流, 0.5 m水深所需流速为0.4 m/s; 0.75 m水深所需流速为0.3 m/s; 1 m水深所需流速为0.25 m/s; 而1.25 m水深所需流速为0.2 m/s。其中, 水深相同时, 1.8 m水面宽下鱼卵安全漂流的临界流速需求皆小于0.8 m水面宽。结果表明, 流速、水深对鱼卵安全漂流具有协同影响, 并且水面宽也是影响鱼卵漂流的因素之一。

3.3 流速和水面宽对鱼卵漂流的影响 为了进一步分析水面宽对于鱼卵漂流的影响, 图4分别展示了同一水深下, 不同水面宽与不同流速组合条件下的鱼卵收集率。

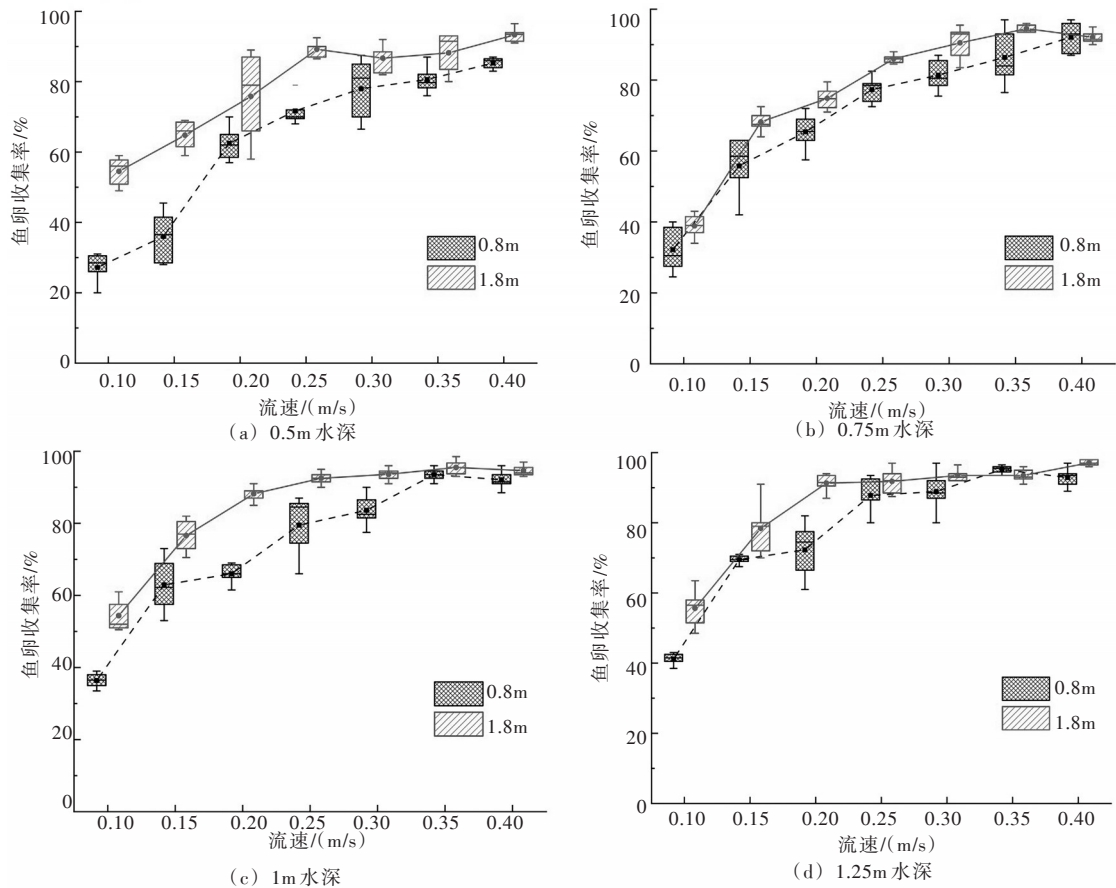


图4 不同水面宽、流速条件下的鱼卵收集率

如图4所示, 0.5 m水深下, 1.8 m水面宽的鱼卵平均收集率在所有流速下皆大于0.8 m水面宽, 并且两种水面宽的鱼卵平均收集率始终随着流速增大而增加, 无趋于稳定的迹象。0.75 m水深下, 流速小于0.35 m/s时, 1.8 m水面宽的平均收集率大于0.8 m水面宽, 当流速达到0.4 m/s时, 二者趋于一致。1 m水深下, 在流速未达到0.35 m/s时, 1.8 m水面宽的平均收集率大于0.8 m水面宽, 流速达到0.35 m/s后, 二者趋于一致。1.25 m水深下, 在流速达到0.25 m/s之前, 1.8 m水面宽的平均收集率大于0.8 m水面宽, 当流速达到0.25 m/s之后, 0.8 m水面宽的平均收集率开始接近1.8 m水面宽, 并在流速达到0.35 m/s时趋于一致。

可见, 水深一定时, 在一定流速范围内, 1.8 m水面宽的鱼卵平均收集率皆大于同等流速下0.8 m水面宽的平均收集率。并且, 当流速达到一定条件时, 1.8 m水面宽的鱼卵平均收集率与0.8 m水面宽的平均收集率可趋于一致。

3.4 水流雷诺数对鱼卵漂流的影响及其阈值 综合前述分析结果, 以流速单因子作为鱼卵能否安全漂流的判别条件不够合理, 且水深、水面宽对鱼卵漂流具有重要影响。水流雷诺数与流速、水深、水面宽三种影响因素密切相关, 预测其与鱼卵的运动和漂流存在响应关系。

从式(3)中可以看出, 矩形明渠中水流的雷诺数与水流的动力黏滞系数、流速、水深、水面宽4种因素有关, 其中, 水流的动力黏滞系数与温度相关。根据每组实验的水温、流速、水深、水面宽数据, 计算得到不同实验组的水流雷诺数, 56种工况下280组实验的水流雷诺数与鱼卵收集率的响应关系见图5。

根据图5(a)可知, 雷诺数在15 000~60 000之间时, 鱼卵收集率随着雷诺数的增大而增加; 当雷诺数增大到60 000~75 000之间时, 鱼卵收集率增加的趋势放缓, 开始趋于稳定; 随着雷诺数的继续增大, 鱼卵收集率更加稳定集中。根据图5(b)可知, 在相同水深、水面宽下, 水流雷诺数随着流

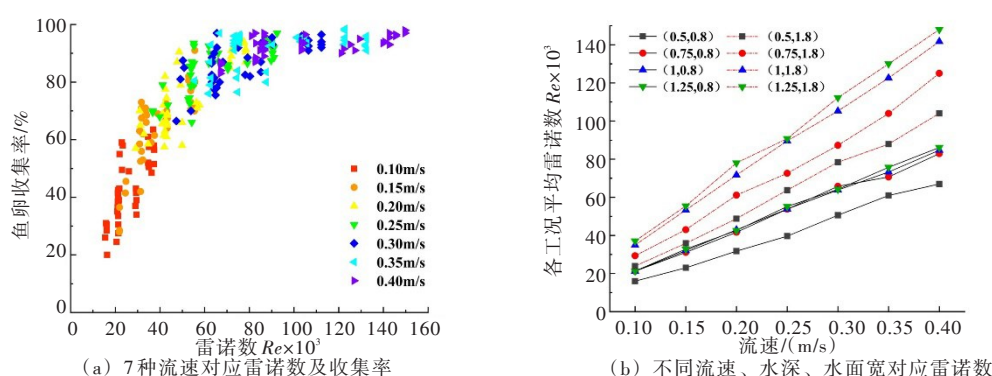


图5 水流雷诺数与鱼卵收集率响应关系

速增大而增加；相同流速下，水面越宽、水深越深，水流雷诺数越大，这与3.2和3.3节的实验结果完全一致。综合来看，水流雷诺数与鱼卵收集率存在紧密的相关性。

由于同一工况下5组实验水温和水流雷诺数差距不大，为了提高拟合的精度，计算56种工况下的平均雷诺数，并与对应的鱼卵平均收集率进行多项式拟合，结果如图6所示。

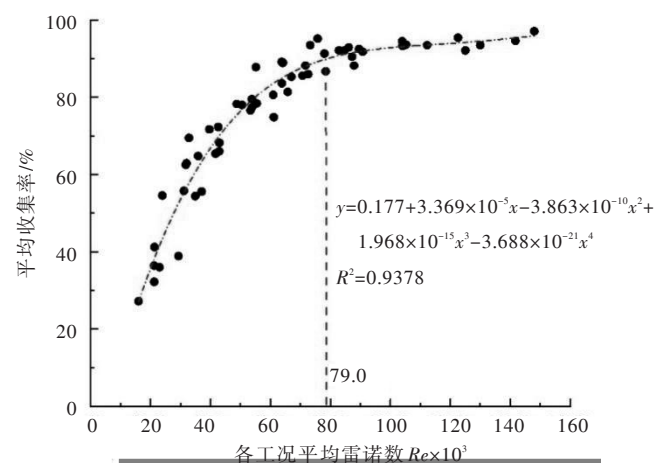


图6 各工况平均雷诺数与鱼卵收集率的拟合曲线

如图6所示，采用四阶多项式进行拟合后，雷诺数与鱼卵收集率的相关系数达到0.938，证明了二者之间的强相关性。选取鱼卵平均收集率达到90%时对应的水流雷诺数作为鱼卵安全漂流的临界阈值，求解得到，在明渠均匀流中，当水流雷诺数达到 7.9×10^4 时，漂流性鱼卵可实现安全漂流。

4 讨论

(1)水流雷诺数对于鱼卵漂流的作用机理。鱼卵在顺水漂流过程中一般受到水流浮力、阻力、拖曳力等的共同作用，从而克服自身重力保持悬浮状态^[17]。刘雪飞等^[23]对比鱼卵运动理论公式计算结果和实验分析结果，发现未考虑紊流作用的理论公式计算结果对鱼卵纵向速度、沉速都有所高估，这种差异表明：在紊流中，除了水流流速大小，还应有水流流速引起的紊动效应对鱼卵的运动产生着影响。由水流流速引发的水流在不同方向的紊动对鱼卵产生了附加阻力，减缓了其纵向漂流速度和垂向沉速，进而迟滞了其下沉趋势。而水流紊动的强烈程度受到水流雷诺数的影响^[30]，水流雷诺数反映了水流惯性力和黏滞力的对比关系，惯性力相对黏滞力越大，水流生成漩涡、混掺、保持和强化扰动的能力越强^[31]，因此不同水流雷诺数条件应对鱼卵漂流具有不同程度的影响。

(2) 弗劳德数与鱼卵漂流的响应关系。弗劳德数作为表征水流水动力条件的重要无量纲数，也有相关研究表明其与鱼卵漂流存在一定的相关性^[32]，其计算公式为：

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad (4)$$

式中： v 为流体的平均流速，m/s； l 为特征长度，m； g 为重力加速度，m/s²。

为了验证弗劳德数与鱼卵漂流之间的相关性，对本实验 56 种工况下的平均弗劳德数及其鱼卵平均收集率采用多种函数进行拟合分析，发现 Boltzmann 函数的拟合效果最好，结果如图 7 所示。从图 7 来看，二者具有一定的相关性，弗劳德数在 0.05 ~ 0.15 范围内，鱼卵平均收集率随弗劳德数的增大而增加，当弗劳德数大于 0.15 后，鱼卵收集率逐渐趋于稳定。但在最佳拟合效果下，二者间的相关系数也仅为 0.557，远低于雷诺数与鱼卵收集率之间的相关性，这也进一步验证了采用雷诺数作为判断漂流性鱼卵能否安全漂流的临界条件的合理性。

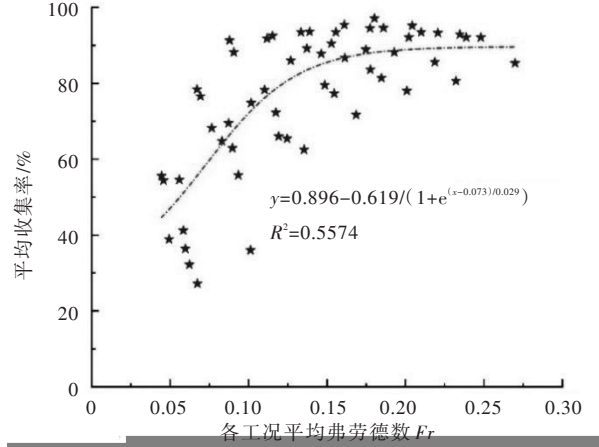


图 7 各工况平均弗劳德数与鱼卵平均收集率关系拟合曲线

(3) 实验结果在天然河流和模型中的应用。本研究虽然采用了室外大型明渠，但与天然河流相比，仍存在断面规则化、水面宽偏窄等限制因素。雷诺数计算公式中特征长度 d 与断面形状密切相关，对于天然河流，尤其是大江大河，一般水面宽远大于水深，这种情况下假设，则天然河流的雷诺数计算公式为：

$$Re_{\text{天然河流}} = \frac{\rho v}{\mu} \left(\frac{nh^2}{(n+2)h} \right) \quad (5)$$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{nh^2}{(n+2)h} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{nh}{n+2} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{h}{1 + \frac{2}{n}} = h \quad (6)$$

$$Re_{\text{天然河流}} \approx \frac{\rho v h}{\mu} \quad (7)$$

由式(7)可以看出，在天然河流中，流速和水深对鱼卵漂流起主导作用。在鱼类集中产卵期，可根据不同河段的平均水深，推求维持漂流性鱼卵安全漂流的最小流速和流量要求，支撑鱼类产卵期河流敏感生态需水目标的制定和调控保障，促进产漂流性卵鱼类的自然繁殖；同时，实验成果还可与水动力学模型相结合，实现对于较长河段(河流)内鱼卵漂流轨迹的整体模拟。在以往研究中，Zeng^[33]等基于三维水动力学模型，以 0.25 m/s 作为鱼卵安全漂流的临界条件，结合拉格朗日粒子示踪技术，模拟了金沙江中游鲁地拉水库不同调度方案下漂流性鱼卵的漂流轨迹。在后续研究中，可以探索将本研所得水流雷诺数阈值作为鱼卵安全漂流的临界条件，以更加准确地模拟漂流性鱼卵的漂流轨迹，支撑相应优化调控方案的制定。

5 结论与展望

本研究通过开展室外大型明渠鱼卵漂流实验，对流速、水深、水面宽以及水流雷诺数与鱼卵收集率的关系进行了分析，主要结论如下：(1) 流速是决定漂流性鱼卵能否安全漂流的重要影响因素，但相比于流速，以综合反映流速、水深、水面宽等信息的水流雷诺数作为鱼卵安全漂流的临界判别条件更加合理。(2) 在明渠均匀流中，当水流雷诺数达到 7.9×10^4 以上时，漂流性鱼卵的收集率可达到

90%，且趋于稳定，可作为明渠均匀流中鱼卵安全漂流的临界水动力条件。(3)在天然河流中，水面宽一般远大于水深，此时断面的雷诺数主要取决于水深和流速，研究得到的相关阈值可应用于鱼类产卵期敏感生态需水目标制定等工作。

本实验采用的明渠断面为规则矩形，与天然河流存在一定差异，但若对天然河流不规则断面进行网格剖分和微分处理后，其微观机理和阈值是基本一致的，下一阶段可选择合适的天然河流/河段进一步开展野外验证，并通过生态调度等手段，营造适宜的流场条件，促进产漂流性卵鱼类的自然繁殖。

参 考 文 献：

- [1] 刘飞,张富斌,王雪,等.赤水河产漂流性卵鱼类的繁殖活动及其与环境因子之间的关系[J].水生生物学报,2019,43(S1):77-83.
- [2] 柏海霞,彭期冬,李翀,等.长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述[J].中国水利水电科学研究院学报,2014,12(3):249-257.
- [3] 李翀,廖文根,陈大庆,等.三峡水库不同运用情景对四大家鱼繁殖水动力学影响[J].科技导报,2008(17):55-61.
- [4] CHAPMAN D C, GEORGE A E. Developmental rate and behavior of early life stages of bighead carp and silver carp[J]. US Geological Survey Scientific Investigations, 2011(11): 5076.
- [5] RACH J J, SASS G G, LUOMA J A, et al. Effects of water hardness on size and hatching success of silver carp eggs[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2010, 30(1): 230-237.
- [6] GARVEY J E. Spatial assessment of Asian carp population dynamics: development of a spatial query tool for predicting relative success of life stages[R]. US Fish and Wildlife Service, 2007.
- [7] 吕军,汪雪格,刘伟,等.松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境[J].水资源保护,2017,33(6):155-160,174.
- [8] 张欧阳,卜惠峰,王翠平,等.长江流域水系连通性对河流健康的影响[J].人民长江,2010,41(2):1-5,17.
- [9] 张汶海,胡鹏,侯佳明,等.横断山区水电开发对鱼类资源多维影响及其保护措施研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(1):12-20.
- [10] 常留红,徐斌,张鹏,等.深水航道整治丁坝群对鱼类生境的影响[J].水利学报,2019,50(9):1086-1094.
- [11] 李翀,廖文根,陈大庆,等.基于水力学模型的三峡库区四大家鱼产卵场推求[J].水利学报,2007,38(11):1285-1289.
- [12] 雷欢,谢文星,黄道明,等.丹江口水库上游梯级开发后产漂流性卵鱼类早期资源及其演变[J].湖泊科学,2018,30(5):1319-1331.
- [13] TIEMANN J S, GILLETTE D P, WILDHABER J L, et al. Effects of lowhead dams on riffle-dwelling fishes and macroinvertebrates in a Midwestern River[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2004, 133: 705-717.
- [14] 刘苗苗,吕翠美,王民,等.基于四大家鱼生境需求的灌河生态需水过程研究[J/OL].水利水电技术(中英文):1-15[2021-03-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20210301.1417.004.html>.
- [15] 王俊娜,董哲仁,廖文根,等.基于水文-生态响应关系的环境水流评估方法——以三峡水库及其坝下河段为例[J].中国科学(技术科学),2013,43(6):715-726.
- [16] 赵琴,李嘉,王锐,等.基于Euler-Lagrange方法的漂流性鱼卵生态需水量数值研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(6):31-37.
- [17] 林俊强,彭期冬,黄真理.河流鱼类鱼卵运动的水力学研究进展[J].水利学报,2015,46(7):869-876.
- [18] 易伯鲁,余志堂,梁秩乐.葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M].武汉:湖北科学技术出版社,1988.
- [19] 唐会元,余志堂,梁秩乐,等.丹江口水库漂流性鱼卵的下沉速度与损失率初探[J].水利渔业,1996(4):25-27.

- [20] 姜伟, 刘焕章, 段中华, 等. 以标志物对长江上游漂流性鱼卵漂流方式的研究[J]. 水生生物学报, 2010, 34(6): 1172-1178.
- [21] 唐明英, 黄德林, 黄立章, 等. 草、青、鲢、鳙鱼卵水力学特性试验及其在三峡库区孵化条件初步预测[J]. 水利渔业, 1989(4): 26-30.
- [22] GARCIA T, ZUNIGA ZAMALLOA C, JACKSON P R, et al. A laboratory investigation of the suspension, transport, and settling of silver carp eggs using synthetic surrogates[J]. PLoS ONE, 2015, 10(12): e0145775.
- [23] 刘雪飞, 林俊强, 彭期冬, 等. 应用PTV粒子追踪测速技术的鱼卵运动试验研究[J]. 水利学报, 2018, 49(4): 501-511.
- [24] 杨庆. 典型鱼类生存繁衍适宜水文条件与适应阈值实验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [25] 王殿常, 禹明忠, 王兴奎. 明槽水流中颗粒运动特性的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000(3): 301-309.
- [26] 张扬宗, 谭玉钧, 欧阳海. 中国池塘养鱼学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [27] 赵孝保. 工程流体力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [28] 陈玉璞. 对雷诺数与弗劳德数的再认识[J]. 力学与实践, 1990(1): 64-65.
- [29] 齐清兰. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [30] 周家俞, 刘亚辉, 吴门伍, 等. 泥沙粒径与水流紊动关系试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2006(5): 679-684.
- [31] 孙东坡, 丁新求. 水力学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2016.
- [32] 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(2): 125-130.
- [33] ZENG Q, HU P, WANG J H, et al. The influence of cascade hydropower development on the hydrodynamic conditions impacting the reproductive process of fish with semi-buoyant eggs[J]. Science of the Total Environment, 2019(689): 865-874.

Experimental study on critical hydrodynamic conditions for safe drifting of semi-buoyant eggs

HU Peng, TANG Jiaxuan, YANG Zefan, ZENG Qinghui, YANG Mingda

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Research on critical hydrodynamic conditions for safe drifting of semi-buoyant eggs is of great significances on ecological flow target setting, fish habitat protection and early fish resources restoration. In order to explore critical hydrodynamic conditions for safe drifting, 56 different experimental groups with varying flow velocity, water depth, water surface width and Reynolds number were carried out to investigate the effects on semi-buoyant eggs drifting in large-scale open flume. The results show that when water surface is constant, the requirements of flow velocity for safe drifting decrease with the increase of water depth; when the water depth is constant and within a certain range of flow velocity, the wider the water surface is, the higher the collection rate of semi-buoyant eggs will be; and compared with the single flow velocity, it is more reasonable to use the Reynolds number as the criterion for safe drifting of semi-buoyant eggs, according to the experimental results, for uniform flow in open channel, when the Reynolds number reaches 7.9×10^4 or more, the semi-buoyant eggs collection rate can reach 90% so that achieve safe drifting. This study can support the setting of sensitive ecological water demand targets during fish spawning period of natural rivers, simulation of fish eggs drifting trajectory and ecological regulation of water conservancy projects.

Keywords: semi-buoyant eggs; hydrodynamic conditions; uniform flow in open channel; Reynolds number; ecological flow

(责任编辑: 韩 昆)