

两种鲟鱼卵在均匀流场中的漂移特性研究

罗佳¹ 石小涛^{1,2} 刘德富¹ 陈求稳¹ 乔晔² 白艳勤¹ 高柱¹ 姜伟³

(1.三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002; 2. 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079; 3. 中国长江三峡集团公司中华鲟研究所, 宜昌 443100)

DRIFTING ROUTES OF EGGS FROM KALUGA STURGEON AND PADDLEFISH

LUO Jia¹, SHI Xiao-Tao^{1,2}, LIU De-Fu¹, CHEN Qiu-Wen¹, QIAO Ye², BAI Yan-Qin¹, GAO Zhu¹ and JIANG Wei³

(1. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of Aquatic Ecosystem, Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, China; 3. Institute of Chinese sturgeon Research, China Three Gorges Project Corporation, Yichang 443100, China)

关键词: 匙吻鲟; 达氏鳇; 卵; 水流; 漂移规律

Key words: Kaluga sturgeon; Paddlefish; Egg; Current; Drifting routes

中图分类号: Q958.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2013)05-0978-04

鱼卵的漂移是鱼类早期发育时期响应水文过程的一个重要阶段^[1,2]。鱼卵的漂移有利于其在河流生态系统中的分布扩散、孵化和躲避敌害等^[3,4]。鱼卵的漂移过程受到多方面的影响,包括鱼卵本身的质量、大小、形状和水的特征如流速、流态以及泥沙含量等^[5,6]。因此,在各种环境外在影响和鱼卵内在因素的作用下,各种鱼类的漂流方式不尽相同,同一种鱼卵在不同江段也呈现不同的漂移方式^[7-9]。目前,鱼卵漂移规律的研究主要体现在大尺度的鱼卵分布调查(如洋流)中,有少量学者报道了不同水流速度下鱼卵垂直分布的定量情况、安全漂流孵化的下限流速等,而鱼卵与水流细部特征的响应关系和沉降规律等方面的报道较少^[10-13]。因此,尽管国内外学者对鱼卵的漂移规律展开了初步研究,鱼卵在水流中如何漂移的问题仍然没有得到系统的回答。

近年来,水利枢纽的建设改变了水文情势,进而在一定程度上改变了鱼卵的漂移规律,导致鱼卵漂移范围发生变化,最终可能产生存活率降低(如鱼卵沉入库区)

以及增加天敌摄食率等结果^[14-17]。深入研究鱼卵的漂移问题,既能给这些鱼类的生物学研究积累资料,又可为水利工程鱼类生态学影响评价提供依据,同时有益于鱼卵保护策略的制定。匙吻鲟(*Polyodon spathula*)属硬骨鱼纲(Osteichthyes)、鲟形目(Acipenseriformes)、匙吻鲟科(Ployodontidae)^[18]。达氏鳇(*Huso dauricus*)又称黑龙江鳇,属于鲟形目(Acipenseriformes)、鲟科(Chondrodtei)、鳇属(*Huso*)鱼类,为世界上最大的淡水鱼类。上述两种鱼类的鱼卵均为黏性沉性卵,与中华鲟卵有着相似的特点^[19]。达氏鳇和匙吻鲟鱼卵,在沉底之前会随着水流漂移,而且两者的密度以及直径都各不相同,其漂流特性研究有助于了解黏性沉性卵的漂移规律,可以协助了解鲟鱼卵在自然河流中的漂流散布规律。鉴于中华鲟卵难以获取的现实,本研究拟通过对匙吻鲟卵和达氏鳇鱼卵的漂移规律研究,探究一种鱼卵漂移的研究方法,为研究中华鲟卵提供间接的方法技术以及理论上的帮助。

收稿日期: 2012-09-13; 修订日期: 2013-05-01

基金项目: 楚天学者基金(KJ2010B002); 国家自然科学基金(50979049, 51009082); 中国博士后科学基金; 水利部公益性行业科研专项(201201030, 201201028-02); 中国长江三峡集团公司科研项目; 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室开放基金资助

作者简介: 罗佳(1988—), 女, 湖北荆门人; 在读硕士研究生; 主要从事水生动物生态学研究。E-mail: jiajiadebaiyangshu@126.com

通信作者: 石小涛(1981—), 男, 湖北红安人; 博士; 主要从事水生动物生态学研究。E-mail: sxtshanghai@163.com

1 材料与方 法

1.1 实验材料和实验设备

实验材料和暂养 所用鲟鱼卵均为受精24h左右的健康鱼卵, 其中达氏鲟鱼卵来自湖北天峡鲟业有限公司, 匙吻鲟鱼卵来自于宜昌三江渔业有限公司。运输回来的鱼卵, 通过适应水温后, 暂养在装有曝气12h的自来水的蓝色塑料水箱中(60 cm×42 cm×42 cm), 水温保持在(18±1)℃, 且持续充氧。实验用水为连续曝气12h的自来水, 水温保持为(18±1)℃。

实验设备 实验装置主要有测鱼卵的漂移装置以及视频采集装置(索尼 DSC-W360)。漂移装置为一长方体水槽(仿 Lologosystem 公司, 丹麦), 材质为有机玻璃, 水槽游泳区(试验区)长为 78.5 cm, 宽 12.5 cm, 高 13 cm, 上方的盖子保证该装置在实验条件下为一个封闭的水环境。水槽盖子上靠近上游区开设一小孔, 用于安置放入鱼卵的塑料管。水槽通过调节电机频率来控制水流速度, 通过整流栅整流后得到均匀流场。本装置所用电机为黄山市龙邦科技有限公司的三相异步电动机 YS7112。实验中还用到了改造后的注射器, 主要用于向密封水槽中放置鱼卵, 该注射器的主要特征在于连接有直径略大于鱼卵的塑料管。用于测流速的是便携式直读流速仪 LS-501E 型。

1.2 实验方法

匙吻鲟卵和达氏鲟卵直径和密度的测量 由于单个鱼卵重量较小, 其重量通过用电子天平同时测量20粒鱼卵的总量求取平均值来测得, 实验重复20次, 其中每次重复采用不同的样本进行测量。鱼卵的直径则是通过在固定标尺下给鱼卵拍照, 然后通过 logger pro 软件进行分析所得, 实验重复20次, 每次测量采用不同的鱼卵。在实验中将鱼卵视为近似于球形, 通过计算可以得到鱼卵的相应密度。

匙吻鲟卵和达氏鲟卵的漂移试验 将长水槽中注满曝气超过 12h 的自来水, 加盖形成密封的水体。调节电机的频率, 使长水槽中产生均匀的流场。用改造后的注射器(600 mL)吸入鱼卵, 注入水体中, 静止释放(初始速度为零), 其中鲟鱼卵的释放点距离水面 2—4 cm。用视频录像记录鱼卵在水里的漂移轨迹, 运用 logger pro 软件进行处理, 设备的流速范围为 0.1—0.75 m/s, 流速与电机频率之间呈线性关系, 即 $y=0.091x+0.1076$ ($R^2=0.9956$), 其中 x 为电机频率, y 为水流速度。在试验中通过频率调控控制电机转速, 控制装置内水流速度大小。在实验中, 电机设置 10、15、20、25 和 30 Hz 5 个梯度, 分别对应 5 个不同的水流速度。实验设置重复, 每组实验重复 30 次(即 30 粒鱼卵)。

数据统计与分析 本实验数据首先采用 Excel 计算处理以及绘图, 之后采用 SPSS 软件综合数据分析。

2 结果与讨论

试验中测得匙吻鲟卵的直径为(0.319±0.030) cm, 重量为(0.017±0.030) g, 密度为0.224 g/cm³; 达氏鲟卵的直径为(0.427±0.030) cm, 重量为(0.061±0.040) g, 密度为0.347 g/cm³。这两种鱼卵均为沉性卵, 在不同的水流中均会随着水流漂移并沉降。

匙吻鲟鱼卵在漂移过程中, 随着水流速度的变化, 匙吻鲟鱼卵在水流中的漂移轨迹也发生相应的变化(图1)。

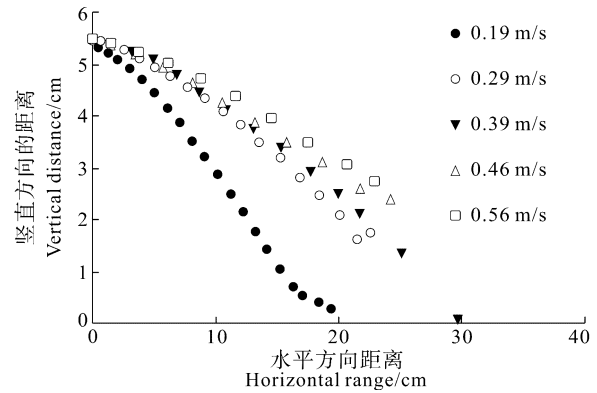


图1 匙吻鲟鱼卵在不同水流速度下的漂移轨迹图

Fig. 1 The drifting trajectory of Paddlefish eggs in different flow velocity

1. 水平方向的距离为鱼卵在平行于地平面方向上移动的距离; 竖直方向的距离为鱼卵在垂直地平面方向上移动的距离; 2. 当 $x=0$ 的时候的 y 值即为释放点高度(图2相关备注同图1)

1. The horizontal distance is the distance which fish eggs moving parallel to the ground plane, the vertical distance is the distance which fish eggs moving perpendicular to the ground plane; 2. When $x=0$, y value is the highest release point. (The explanation of fig. 3 is the same to fig. 2)

达氏鲟在漂移过程中, 随着水流速度的不同, 其漂移轨迹也有一定的变化(图2)。

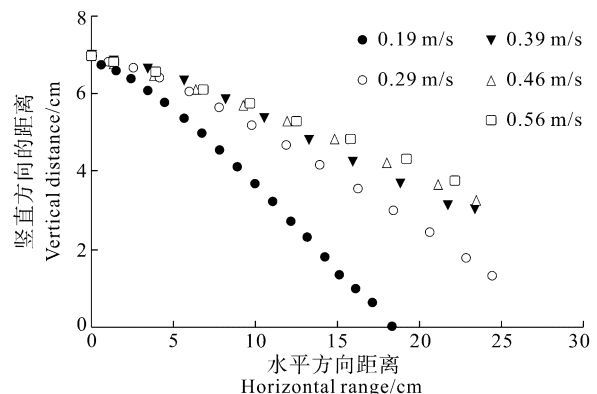


图2 达氏鲟鱼卵在不同水流速度下的漂移轨迹图

Fig. 2 The drifting trajectory of Kalugasturgeon eggs in different flow velocity

为了简便计算, 将图中的线性关系进行拟合, 根据决定系数 R^2 拟合得到的结果可以简化为, 鱼卵在不同

的水流速度下,其轨迹方程就类似于直线(R^2 最大),方程式为 $y=ax+b$,其中 b 为鱼卵在水流中的释放点距离底

面的高度, x 、 y 分别为水平方向和竖直方向的距离,因此会得到如下表 1 和表 2 的中所得到的关系式。

表 1 匙吻鲟卵轨迹关系式分析
Tab. 1 The comparative analysis of trajectory of the eggs of Paddlefish

频率 Frequency (Hz)	水流速 Flow velocity (m/s)	轨迹拟合公式 Trajectory fitting formula	R^2 值 R^2 value	直线斜率 Straight slope
10	0.19	$y=-0.2937x+5.7502$	0.9911	-0.2937
15	0.29	$y=-0.1818x+5.8710$	0.9857	-0.1818
20	0.39	$y=-0.1588x+5.8968$	0.9799	-0.1588
25	0.46	$y=-0.1338x+5.6314$	0.9957	-0.1338
30	0.56	$y=-0.1231x+5.6862$	0.9869	-0.1231

表 2 达氏鳊卵轨迹关系式分析
Tab. 2 The comparative analysis of trajectory of the eggs of Kalugasturgeon

频率 Frequency (Hz)	水流速度 Flow velocity (m/s)	轨迹拟合公式 Trajectory fitting formula	R^2 值 R^2 value	直线斜率 Straight slope
10	0.19	$y=-0.3868x+7.3480$	0.9923	-0.3868
15	0.29	$y=-0.2348x+7.3190$	0.9913	-0.2348
20	0.39	$y=-0.1813x+7.1954$	0.9938	-0.1813
25	0.46	$y=-0.159x+7.0868$	0.9959	-0.159
30	0.56	$y=-0.1447x+7.0748$	0.9971	-0.1447

轨迹拟合公式(表 1、表 2) 表明,水流的变化会影响鲟鱼卵的漂移轨迹。以两种鱼卵的轨迹方程轨迹线性的斜率和对应流速为基础,拟合可以得到水流速度与其轨迹的斜率的关系曲线(图 3)。

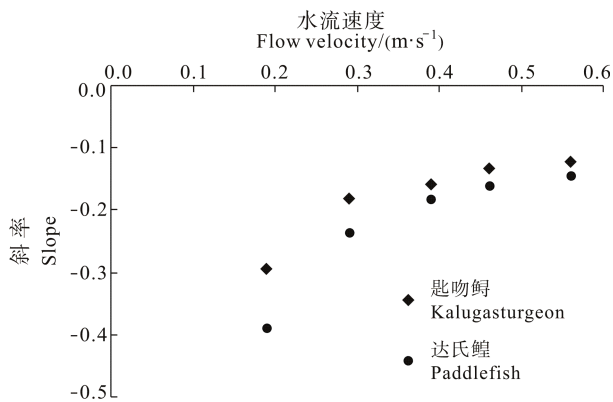


图 3 匙吻鲟卵与达氏鳊卵在不同水流速度下轨迹斜率与流速的关系

Fig. 3 The relationship between flow velocity and drifting trajectory of the eggs of Kalugasturgeon and Paddlefish

匙吻鲟 $a=0.153\ln(u)-0.0229$ ($R^2=0.9168$), 达氏鳊 $a=0.225\ln(u)-0.0126$ ($R^2=0.931$)。其中 u 为水流速度,而 a 即为鱼卵漂移轨迹的拟合线性斜率。根据轨迹拟合公式 $y=ax+b$, 将 a 代入, 则得到: 匙吻鲟卵的漂移轨迹与速度的关系式为 $y=[0.153\ln(u)-0.0229]x+b$; 达氏鳊卵的漂移轨迹与水流速度的关系式为 $y=[0.225\ln(u)-0.0126]x+b$ 。根据公式可以知道, b 可以通过室内试验测量得到, 而 u

也可以通过流速仪测得, 也就是说只要知道这两个定值, 就可以估计和推测鱼卵在均匀流场下的漂移距离和漂移范围。在上述公式中, 不同鱼卵漂移轨迹与水流速度的关系式中未知数 u 前面的系数以及后面的常数不同, 这可能是鱼卵的密度不同而造成的, 与鱼卵大小和重量有关^[20, 21], 其深层次的关系需要通过进一步实验加以研究。

本试验表明, 均匀流场下不同鱼卵在不同流速下有不同的漂移轨迹, 其轨迹可以通过公式推算, 其漂移距离和范围可以预测。同时, 本试验提供了一种合理的实验方法来研究匙吻鲟鱼卵和达氏鳊鱼卵在各种不同水流速度下的漂移规律。以此类推, 该方法通过进一步的完善和优化, 就可以用于其他鱼卵的漂移状态研究, 例如中华鲟卵。以本实验为基础, 在了解中华鲟卵的密度和直径之后, 有望预测在均匀流场下中华鲟卵的漂移轨迹, 最终为中华鲟的保护提供帮助。本研究的不足体现在仅探讨了均匀流场下鱼卵的漂移规律, 而自然界中水流的流态复杂多变^[22, 23]。为了进一步了解鱼卵的漂移规律, 下一步的实验应该包括在不同流态下鱼卵的漂移规律研究。

参考文献:

- [1] Penaz M, Roux A L, Jurajda P, et al. Drift of larval and juvenile fishes in a by-passed floodplain of the upper River Rhine, France [J]. *Folia Zoologica*, 1992, **41**(3): 281—288
- [2] Zitek A, Schmutz S, Unfer G, et al. Fish drift in a Danube sidearm-system: II. Seasonal and diurnal patterns [J]. *Journal of Fish Biology*, 2004, **65**(5): 1319—1338

- [3] Wan L, Cai Y P, Tang H Y, *et al.* Preliminary study on the larval resources of fishes spawning drifting eggs in the middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(4): 53—57 [万力, 蔡玉鹏, 唐会元, 等. 汉江中下游产漂流性卵鱼类早期资源现状的初步研究. 水生态学杂志, 2011, **32**(4): 53—57]
- [4] Muth R T, Schmulbach J C. Downstream transport of fish larvae in a shallow prairie river [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1984, **113**(2): 224—230
- [5] Yi B L, Yu Z T, Liang Z S, *et al.* The distribution, natural conditions and breeding production of the spawning grounds of four famous freshwater fishes on the main stream on the Yangtze River [A]. In: Yi B L, Yu Z T, Liang Z S, *et al.* (Eds.), *Gezhouba Water Control Project and Four Famous Fishes in Yangtze River* [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press. 1988, 1—46 [易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊, 等. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉: 湖北科学技术出版社. 1988, 1—46]
- [6] Coombs S H. A density-gradient column for determining the specific gravity of fish eggs, with particular reference to eggs of the mackerel *Scomber scombrus* [J]. *Marine Biology*, 1981, **63**(1): 101—106
- [7] Gadomski D M, Barfoot C A. Diet and distributional abundance patterns of fish embryos and larvae in the lower Columbia and Deschutes rivers [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1998, **51**(4): 353—368
- [8] Niu C J, Hu H X, Luo J, *et al.* Genetic diversity in the reserved parent fish broodstocks of *Asipenser schernckii* and *Huso dauricus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, **34**(12): 1795—1799 [牛翠娟, 胡红霞, 罗静, 等. 史氏鲟和达氏鳇养殖亲鱼群体遗传多样性分析. 水产学报, 2010, **34**(12): 1795—1799]
- [9] Price M V, Gilpin M. Modelers, Mamalogists, and Metapopulations. In McCulloch, D. R. *Metapopulations and wildlife Conservation* [M]. Washington D.C. USA, Island Press. 1996, 217—240
- [10] Lamouroux N, Olivier J, Persat H, *et al.* Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics [J]. *Freshwater Biology*, 1999, **42**(2): 275—299 .
- [11] Sheaffer W A, Nickum J G. Backwater areas as nursery habitats for fishes in Pool 13 of the upper Mississippi River [J]. *Hydrobiologia*, 1986, **136**(1): 131—139
- [12] Harvry B C. Susceptibility of young-of-the-year fishes to downstream displacement by flooding [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1987, **116**(6): 851—855
- [13] Koch C, Chanson H. Turbulence Measurements in Positive Surges and Bores [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, **47**(1): 29—40
- [14] Jiang W, Liu H Z, Duan Z H, *et al.* Studies on drift pattern of drifting fish eggs with tracers in upper Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(6): 1172—1178 [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. 水生生物学报, 2010, **34**(6): 1172—1178]
- [15] Habit E, Belk M C, Parra O. Response of the riverine fish community to the construction and operation of a Diversion Hydropower Plant in Central Chile [J]. *Aquatic Conservation-marine and Freshwater Ecosystems*, 2007, **17**(1): 37—49
- [16] Li X F, Huang D M, Xie W X, *et al.* Spawning sites of four major Chinese carps in the middle reaches of Hanjiang River [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2006, **41**(2): 76—80 [李修峰, 黄道明, 谢文星, 等. 汉江中游江段四大家鱼产卵场现状的初步研究. 动物学杂志, 2006, **41**(2): 76—80]
- [17] Wang Y, Yang Y, Gao Y, *et al.* Numerical simulation on transport of eggs and fry of *Acipenser sinensis* in spawning site in Gezhouba Reach [J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(1): 1—4 [王悦, 杨宇, 高勇, 等. 葛洲坝下中华鲟产卵场卵苗输移过程的数值模拟. 水生态学杂志, 2012, **33**(1): 1—4]
- [18] Coop G H. Comparative microhabitat use of cyprinid larvae and juveniles in a lotic floodplain channel [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1992, **33**: 181—193
- [19] Zhao X N, Wang Z Y, Zhang H. Studies on the eye egg hatching and fry cultivation of Polyodontidae [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2004, **17**(2): 46—50 [赵兴那, 王志远, 张辉. 匙吻鲟发眼卵孵化及仔幼鱼培育试验. 水产学杂志, 2004, **17**(2): 46—50]
- [20] Yi J S, Kuang Y Y, Chang Y M, *et al.* Tolerance of *Huso dauricus* embryo at its different development stages to low temperature [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(4): 703—708 [伊家胜, 匡友谊, 常玉梅, 等. 达氏鳇不同发育时期胚胎对低温的耐受研究. 应用生态学报, 2006, **17**(4): 703—708]
- [21] Zhou C S, Liang Z S, Huang H N. Ecological features of the spawning of certain fishes in the Hanjiang River after the construction of dams [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1980, **7**(2): 175—188 [周春生, 梁秩燊, 黄鹤年. 兴修水利枢纽后汉江产漂流性卵鱼类的繁殖生态. 水生生物学报, 1980, **7**(2): 175—188]
- [22] Wang B, Huang W, Yin Z J. On ecological flow impact of large cascade reservoirs [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(9): 860—864 [王波, 黄薇, 尹正杰. 大型梯级水库对河流生态流量的影响. 长江流域与资源环境, 2009, **18**(9): 860—864]
- [23] Humphries P, Lake P S. Fish larvae and the management of regulated rivers [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2000, **16**(5): 421—432