

中华鲟产卵场平面平均涡量计算与分析

王远坤^{1,2,*}, 夏自强^{1,2}, 王桂华², 杨 宇³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:采用 Delft3D-Flow 模型对葛洲坝下游中华鲟产卵场河段进行流场模拟, 用实测资料对模型进行验证和参数率定, 模拟结果和实测资料基本吻合。在此基础上, 阐述了平面平均涡量计算方法, 利用模拟所得流速场, 通过计算得到中华鲟产卵场河段区域平面平均涡量强度分布。计算结果表明, 鱼卵密集区的平面平均涡量为 $1.38 \times 10^{-3} \sim 1.64 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 说明中华鲟产卵对区域平面涡量强度有偏好选择, 这种选择具有生物学意义。可为今后保护中华鲟产卵场水力学环境提供理论支持和参考。

关键词:中华鲟; 产卵场; 模拟; 平面涡量

文章编号: 1000-0933 (2009) 01-0538-07 中图分类号: Q142, Q178, Q958 文献标识码: A

Chinese sturgeon spawning ground horizontal mean vorticity computation and analysis

WANG Yuan-Kun^{1,2,*}, XIA Zi-Qiang^{1,2}, WANG Gui-Hua^{1,2}, YANG Yu³

1 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

3 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0538 ~ 0544.

Abstract: Chinese sturgeon, a kind of migration or semi-migration fish growing up in coastal water and entering into rivers after sexual maturity, is one of Class I state protection animals. The construction of the Gezhouba dam blocked its migration route to the upstream of the Jinshajiang River, as a result, Chinese sturgeon established a new spawning ground in the less than 7 km long mainstream of the Yangtze River below the Gezhouba. The applicability of the Delft 3D-Flow model to simulation of the flow field of the spawning ground was verified by observed data. On the basis of the simulated flow field of the spawning ground, the computational method of the horizontal mean vorticity was proposed and then employed to compute its distribution throughout the spawning ground. The computed results indicated that horizontal mean vorticity varies between $1.184 \times 10^{-3} \sim 5.413 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ for the whole spawning ground and $1.38 \times 10^{-3} \sim 1.64 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ for the patches with a high density of Chinese sturgeon eggs. This revealed that the spawning of Chinese sturgeon has a preference for a specific range of vorticity, which could benefit the increase in fertilization rate of Chinese sturgeon eggs and the protection of its zygotes. This paper could provide references for protecting the hydraulic environment required by the spawning ground of Chinese sturgeon.

Key Words: Chinese sturgeon; spawning ground; numerical simulation; horizontal mean vorticity

中华鲟为江海溯河产卵的洄游性底栖鱼类, 是我国一级保护动物。葛洲坝截流前, 中华鲟的产卵场分布

基金项目: 国家自然科学基金重大项目资助课题资助项目 (30490235)

收稿日期: 2007-09-07; 修订日期: 2008-01-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuankunw@tom.com

在金沙江下游的老君滩以下至长江上游的合江县以上约 600km 江段^[1,2]。葛洲坝截流后,被阻隔于坝下的中华鲟在坝下形成了新的产卵场。新产卵场分布在葛洲坝下长约 7km 的主河道内^[3~5]。目前,一批专家学者针对中华鲟的保护已经进行了大量的研究工作。张辉等根据历史资料定性分析了水文要素与产卵量的关系,建立了产卵场生态水文学模型^[6,7],杨德国等探讨了中华鲟繁殖活动与水文状况的关系^[8]。张辉等对中华鲟自然繁殖期间产卵场河段的断面流速资料进行了测量^[9],并对产卵场地形进行了分析^[10]。王远坤等对产卵期产卵场流场进行了计算和分析^[11]。付小莉等对中

华鲟产卵场进行了三维数值模拟^[12,13],但同时在地形做了大量简化。杨宇选取动能梯度和动能梯度增率作为水力学特征量对中华鲟栖息地进行了研究^[14]。这些研究只是从水文角度、水力学角度进行定性分析和模拟,但对中华鲟产卵行为和产卵场的水力学环境特性目前还没有更深入的研究。随着三峡水库和葛洲坝水利枢纽联合调度的实施,中华鲟产卵场河段的地形和水流状态将发生改变,栖息地水力学环境也会受到影响,进而影响中华鲟自然繁殖活动。本文参考 Crowder^[15~17]方法对中华鲟产卵与水平面平均涡量(以下简称平面涡量)之间的响应关系进行分析研究。针对实测流速场分布资料较难获取的问题,采用试验模拟研究思路,利用 Delft3D-Flow 模型模拟获得产卵场河段平面涡量计算所需数据。中华鲟产卵行为与平面涡量的响应关系研究将为水文学、水力学环境变化条件下,保护中华鲟自然繁殖工作提供参考。

1 数学模型和计算方法

采用 DELFT3D 中的 FLOW 模块。计算区域南北跨度约 4km,东西跨度约 2km,大部分水域水深小于 30m,水深尺度远小于水平尺度,符合浅水方程要求。垂向的动量方程简化为静水压力关系,垂向加速度远小于重力加速度,可以忽略,不考虑地球曲率。在垂向上进行分层处理,可通过分层得到所需要的水层的流速。

1.1 DELFT3D-FLOW 基本方程

水平方向动量方程^[18]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fV = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - fU = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (2)$$

式中, M_x 和 M_y 表示外部源和汇的动量。水平方向的压力项 P_x 和 P_y 由下式给出 (Boussinesq 近似):

$$\frac{1}{\rho_0} P_x = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{h}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho_0} P_y = g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{h}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \quad (4)$$

式中, F_x 和 F_y 为水平雷诺应力项,根据涡粘性概念,对于大尺度范围的数值模拟, F_x 和 F_y 可简化为:

$$F_x = v_H \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

$$F_y = v_H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

U 表示 x 方向流速, V 表示 y 方向流速; v_v 表示垂直方向动力粘滞系数, v_H 表示水平方向动力粘滞系数; ρ_0, ρ 分别表示水的参考密度和水体实际密度(包括了盐度、温度与泥沙等); g 表示重力加速度; h 表示水深; ζ 表示水位; u, v, ω 分别表示 σ 坐标下的 x, y, z 方向速度; f 表示科氏力的影响。

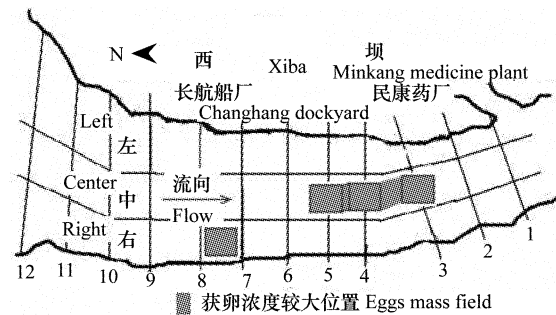


图1 研究区域及断面的布置

Fig. 1 Diagram of study field map and cross-sections

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [h\bar{U}]}{\partial x} + \frac{\partial [h\bar{V}]}{\partial y} = S \quad (7)$$

式中, S 表示单元面积流入或流出的水量。 $\bar{U}$, $\bar{V}$ 分别表示在 σ 坐标下某一层的垂向平均流速的 x , y 方向分量。

1.2 初始条件和边界条件

初始条件以零启动形式给出, 以零流速作为初始条件, 同时给出初始水位值。

固壁边界采用无滑动条件, 由实测值给出。对于固壁边界, 严格的讲应该采用无滑动边界条件, 即流速、紊动动能为零, 紊动耗散率为有限值。但在实际应用过程中该条件往往无法应用, 这是因为在固壁附近粘性层中, 速度梯度极为陡峻, 为了获得满意的模拟效果必须布置极为细密的网格。这样的计算费用非常昂贵。因此实用上常采用非穿透条件。本文只要求河道上下游边界已知, 采用流量-水位边界条件。上游采用流量边界条件, 下游为水位边界条件。上游进口边界流量 $Q = 12139 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 下游出口控制水位 $H = 40.6 \text{ m}$ 。

1.3 计算方法

水平平面采用正交四边形离散计算域, 并采用交错网格。考虑到中华鲟为底栖类动物, 产沉性粘性卵。本模拟目的是根据模拟出的底层流速场来计算平面平均涡量, 对网格大小的要求较高, 因此单个网格一般取 $9 \sim 12 \text{ m}$ 左右, 局部加密网格为 $2 \sim 5 \text{ m}$ 左右。垂向上采用分层方法, 共分 4 层, 其分配方式从上到下为 30%, 30%, 20%, 20%。

计算方法差分格式采用扩展的 ADI 方法。

1.4 模型验证

研究区域中河床质比较统一, 流场可选用相同的糙率。通过计算比较, 糙率值为 0.022 时所得流场与实测值最为吻合, 实测值于 2004 年 11 月 12 日利用 ADCP 测定, 共 12 个测量断面 (图 1)。率定后的流场模拟结果如图 2 所示, 与实测值比较见图 3, 受篇幅所限, 图中只给出了位于下产卵场 5、6、7、8 断面的对比。由图 3 可见, 研究区域各位置流速的计算值和实测值相当接近。由图可见除个别点差别较大, 绝大多数测点模拟流速与实测流速都比较接近。计算成果基本合理, 模拟结果可以采用。

2 水平面平均涡量计算方法

在河流中由于地形等的影响存在各种尺度和形式的涡。涡运动在水生生物的生命周期中具有重要作用。本文仅对水平面上的涡旋进行研究并称此类涡旋为水平涡, 如图 4 所示。由于在天然河流中, 直接测量涡量很困难, 本文通过流场模拟数据计算天然河流平面涡量, 并用这种方法获得葛洲坝下中华鲟产卵场的区域水平涡量分布。

如果一个区域中的单元涡量包含正负, 那么这些涡量会相互抵消。于是涡量值将不能反映这个区域中全部水流的复杂程度。本文将单元涡量取绝对值后再求和, 避免了计算过程中方向相反的涡量相互抵消。水平涡量定义为:

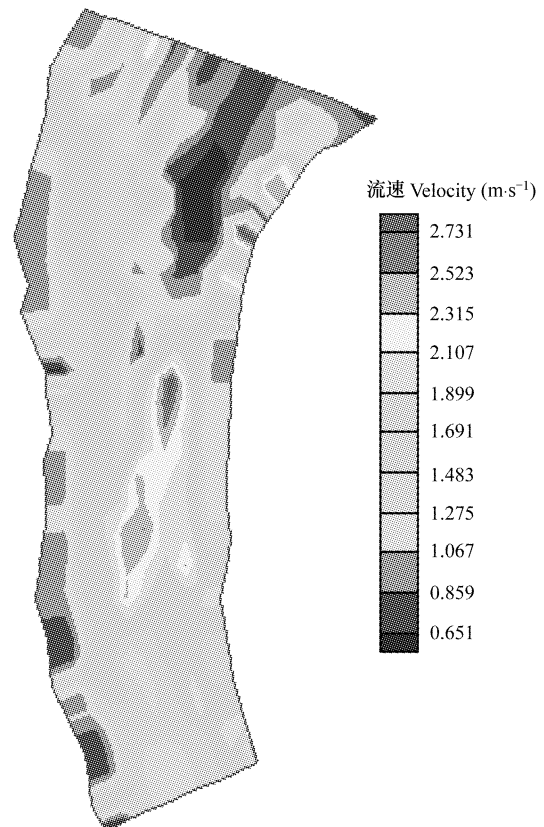


图2 流量 $Q = 12139 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 时流速场分布图

Fig.2 Computational velocity distribution at $12139 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

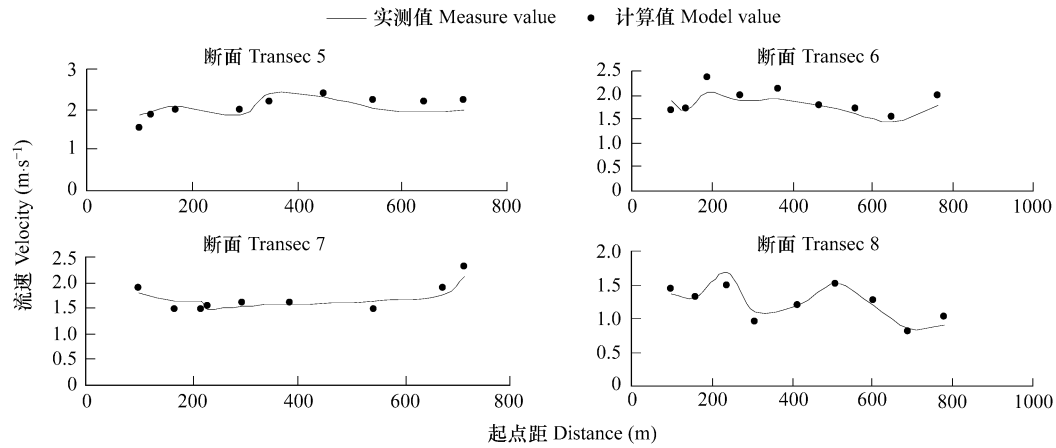


图3 5、6、7、8断面实测与计算垂向平均流速大小比较

Fig. 3 Comparison of computational and measured mean velocity at 5, 6, 7, 8 transects

$$\begin{aligned}\bar{\Omega}_{ABS} &= \frac{\Gamma_{ABS}}{A_{TOT}} = \frac{\iint_S |\Omega| \Delta A}{A_{TOT}} = \frac{\sum |\Omega| \Delta A}{A_{TOT}} \\ &= \frac{\sum \left| \left(\frac{\Delta u}{\Delta y} - \frac{\Delta v}{\Delta x} \right) \right| \Delta y \Delta x}{\sum \Delta y \Delta x}\end{aligned}\quad (8)$$

式中, A_{TOT} 为闭合曲线所包围的面积; Ω 为单元涡量。

计算在程序中实现, 根据图 5 可得:

$$\frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{y_{i,j+1} - y_{i,j}}, \frac{\Delta v}{\Delta x} = \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} \quad (9)$$

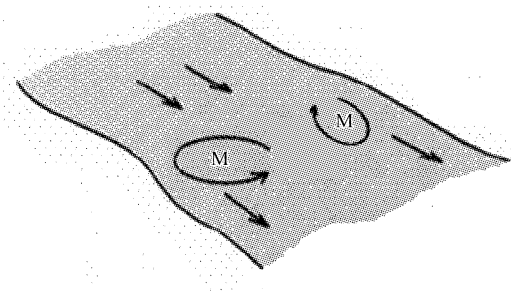


图4 河流水平面上涡分布

Fig. 4 Distribution of the vorticity in horizontal plane

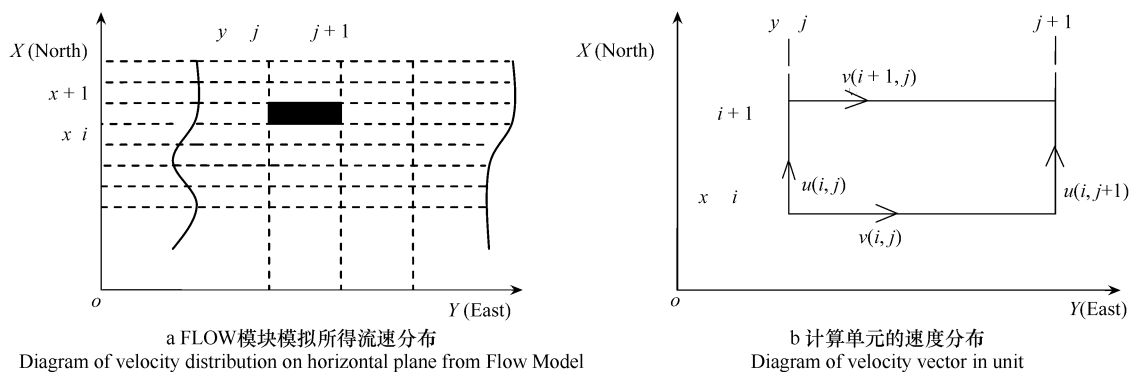


图5 根据平面流速分布计算平面涡量示意图

Fig. 5 Diagram of the vorticity strength computing

3 中华鲟产卵场平面平均涡量计算及分析

3.1 计算结果分析

采用流场模拟计算结果中的流速数据作为计算中华鲟产卵场水平涡量所需的基本数据。根据断面的布设, 在计算时把区域分为 11 个区间, 用断面编号定义区域, 如 1~2 区域, 2~3 区域。根据公式(8)、(9)编程计算各区域水平涡量。其 10~11 区域平均涡量最大, 其值为 $5.413 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。区域 6~7 平均涡量最小, 其值为 $1.184 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。为了更准确的描述各区域内水平涡强度的分布情况, 在计算过程中将各区域沿断面方

向等间距地分为 3 部分,按左、中、右分别计算局部平均涡量,结果如图 6。

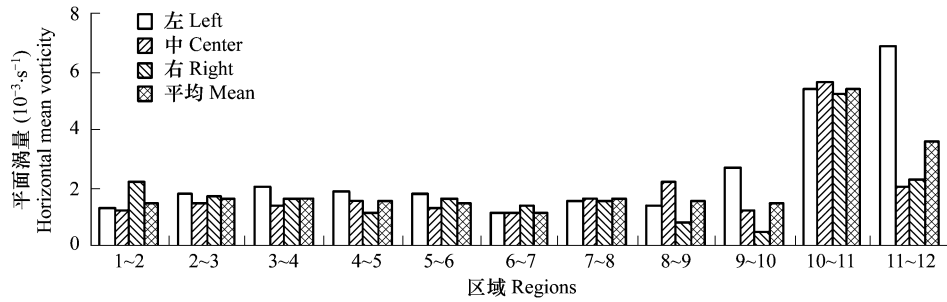


图6 各区域平面涡量分布
Fig. 6 Vorticity strength of 11 zones

在上游,左岸向右凸起的地形将二江电厂释放的发电尾水挑至断面 10 左侧位置,由于长期的冲刷,加上大江小面积浅滩、江心浅滩、西坝深槽、药厂浅滩等特殊地形的存在使得这一区域的中间部分涡量都较大,常年观测发现中华鲟很少使用这一地区作为产卵区。1~2 区域右岸庙嘴深槽的存在使得其涡量均值远大于中部和左岸,造成此处涡量值也较大。

3.2 中华鲟产卵与平面涡量间的关系

根据 1996 年至 2003 年观测,每年产卵期,中华鲟卵浓度分布不均匀,以 7、8 断面右侧、中部,断面 5 中部,断面 4 中部,和断面 3 中部附近比较集中(图 1,表 1)。本文采用 2002 年产卵数据,此次产卵分布具有代

表 1 中华鲟卵采样位置平面涡量、流速及单位面积卵浓度
Table 1 Vorticity strength and velocity in sample locations density

项目 Item	卵采样位置 Sample locations							
	7/8-右 Right	7/8-中 Middle	5-中 Middle	4-右 Right	4 中 Middle	3-右 Right	3-中 Middle	3-左 Left
区域平面涡量 Horizontal mean vorticity of regions(10^{-3} s^{-1})	1.581	1.641	1.419	1.211	1.487	1.697	1.377	1.825
流速 Velocity(ms^{-1})	1.58	1.43	2.14	2.07	2.10	1.74	1.99	2.01
单位面积的卵浓度 Eggs density of unit area (粒 $\cdot 10^{-3} \text{ m}^{-3} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.9	0.06	0.43	0.01	0.55	0.01	0.37	0.01

卵浓度原始数据和原始采样位置来自文献^[14,19] Original eggs data and sampling locations were consulted from reference^[14,19]

表性,产卵规模大。获卵量大小与上游存在的中华鲟产卵适宜水域面积有关,由于中华鲟产卵时所在位置水力学数据不足,上游适宜面积的计算有一定困难。中华鲟在产卵时最经常出现在水深 8~12m 位置^[14,19],计算时可简化为:采样点沿流线方向对应的上游区域,其中满足产卵日水深为 8~12 区域面积。计算方法如下:

(1)通过地形及水位计算各采样点上游满足 8~12m 水深的适宜水域面积;

(2)各采样点的卵浓度除以(1)所得相应的适宜水域面积,获得单位面积卵浓度。计算结果见表 1。

通过表 1 建立单位面积的卵浓度和水平涡量的关系如图 7。

由图 7 可见,单位面积的卵浓度与平面涡量之间有明显的相关趋势。单位面积上的卵浓度随着平面涡量的增加而增加,当涡强度达到一定时却随之下降。说明中华鲟的产卵对水平面平均涡量具有一定的选择性。从图中看出,当平面涡量值在 $1.38 \times 10^{-3} \sim 1.64 \times$

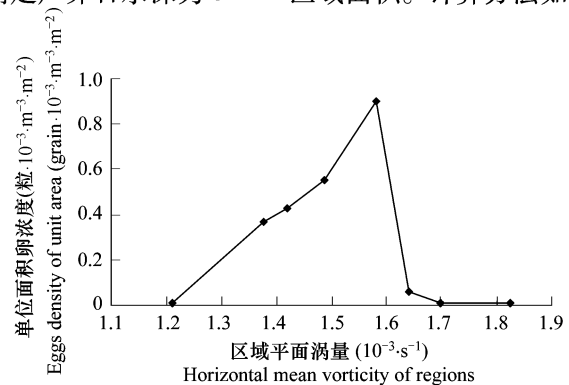


图7 单位面积卵浓度与平面涡量关系图
Fig. 7 Relationship of density per unit area and Ω_{ABS}

10^{-3} s^{-1} 范围时,单位面积的产卵量非常高。而在这范围之外,有很少卵捕获,采获的鱼卵主要来自产卵位置的鱼卵散布。从图中趋势可得,当涡强为 $1.581 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,单位面积获卵量最大,随着涡强增加单位面积获卵量急剧下降,由于数据较少,不能的获得中华鲟产卵最适宜的涡强范围。从以上分析可以得出,上游存在中华鲟适宜产卵位置时,中华鲟卵所在位置的平面平均涡量 $1.38 \times 10^{-3} \sim 1.64 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。中华鲟产沉性粘性卵,比重略大于 1。通常在产出后约 5min 产生粘性,最终黏附在河床的砾石上。在产出到黏附之间的一段时间与精液掺混受精。在这区域正是中华鲟精卵混合的关键位置,较高的涡量值反映流体中大量涡旋的存在,而这些涡旋提高了精卵的掺混强度,提高了受精率。而非常高的涡强容易使中华鲟卵被水流冲走或被其它鱼类吞食,不利于保护卵孵化。这种选择正是物种自然选择结果的表现。

在目前的研究中,还没有对三峡—葛洲坝联合调度和葛洲坝下河势调整工程后的地形及流场进行测量,但产卵场河段的水力学环境肯定由此将发生变化,这种变化对中华鲟繁殖活动的影响程度还需进一步研究。

Reference:

- [1] The Changjiang aquatic resources survey group, Sichuan province. The Biology of the sturgeons in Changjiang and their artificial production. Chengdu: Sichuan Scientific and Technical Publishing House, 1988. 284.
- [2] Zhao Y, Huang X, Yu Z T. Investigation Juvenile of *Acipenser sinensis*. Freshwater Fishery, 1986, (6):38—41.
- [3] Wei Q W, Yang D G, Ke F E, Kynard B, *et al.* Technique of ultrasonic telemetry for Chinese Sturgeon, *Acipenser sinensis*, in Yangtze River. Journal of Fisheries of China, 1998, 22 (3): 211—217.
- [4] Kynard B, Wei Q, Ke F E. Use of ultrasonic telemetry to locate the spawning area of Chinese sturgeons. Chinese Science Bulletin, 1995, 40 (8): 54—57.
- [5] Yang D, Wei Q, Chen X, *et al.* Distribution and movement of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, in spawning ground located below the Gezhouba Dam during spawning seasons. J. App l. Ichthyol., 2006, 22 (supp l. 1):145—151.
- [6] Ban X, Li D M. Multi-Parameter Ecological Hydrology Model for Spawning Grounds of *Acipenser Sinensis* Downstream of the Gezhouba Dam. China Rural Water and Hydropower, 2007, (6):8—12.
- [7] Ban X, Li D M. Ecological hydrological influence of large water conservancy projects on *Acipenser Sinensis* in Yangtze River. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(3): 10—13.
- [8] Yang D G, Wei Q W, Chen X H, *et al.* Hydrology status on the spawning ground of *Acipenser sinensis* below the Gezhouba Dam and its relation to the spawning run. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3):862—869.
- [9] Zhang H, Wei Q W, Yang D G, *et al.* An observation on water current profiles of spawning of *Acipenser sinensis* downward Gezhouba Dam. Journal of Fishery Sciences of China, 2007, 14 (2): 183—191.
- [10] Zhang H, Wei Q W, Yang D G, *et al.* Topography research on spawning grounds of *Acipenser sinensis* below Gezhouba Dam. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10):3945—3955.
- [11] Wang Y K, Xia Z Q, Cai Y P. Flow field simulation and analysis of chinese sturgeon spawning ground in Gezhouba Downstream. Water Resources and Power, 2007, (5):54—57.
- [12] Fu X L, Li D M, Jin G Y. Analysis of the flow field in Chinese Sturgeons' spawning sites at the downstream water near Gezhouba. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition) 2009, 34(9):111—113.
- [13] Fu X L, Li D M, Chen Y B. Flow field calculation and analysis of *Acipenser sinensis* spawning site in Gezhouba downstream. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 700—704.
- [14] Yang Y. Study on Hydraulic Characteristics of Chinese Sturgeon Habitat in Yangtze River. Nanjing: Hohai University, 2007. 60.
- [15] Crowder D W, Diplas P. Vorticity and circulation: spatial metrics for evaluating flow complexity in stream habitats. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002, 59 (4):633—645(13).
- [16] Crowder D W, Diplas P. Evaluating spatially explicit metrics of stream energy gradients using hydrodynamic model simulations. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57 (7):1497—1507.
- [17] Crowder D W, Diplas P. Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance. Journal of Hydrology, 2000, 230(3): 172

— 191.

- [18] W L, Delft Hydraulics, Delft3D-Flow manual, User manual, 2005. 229—231
- [19] Wei Q W. Reproductive behavioral ecology of Chinese sturgeon with its stock assessment. Institute of hydrobiology Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 2003. 119

参考文献:

- [1] 四川省长江水产资源调查组. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究. 成都:四川科学技术出版社,1988. 284
- [2] 赵燕,黄琇,余志堂. 中华鲟幼鱼现状调查. 水利渔业,1986,(6):38~41.
- [3] 危起伟,杨德国, Kynard B,等. 长江中华鲟超声波遥测追踪技术. 水产学报, 1998, 22(3): 211~217.
- [6] 班璇,李大明. 葛洲坝下游中华鲟产卵场的多参数生态水文学模型. 中国农村水利水电,2007,(6):8~12.
- [7] 班璇,李大明. 大型水利工程对中华鲟生态水文学特征的影响. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(3): 10~13.
- [8] 杨德国,危起伟,陈细华,等. 葛洲坝下游中华鲟产卵场的水文状况及其与繁殖活动的关系. 生态学报, 2007, 27(3):862~869.
- [9] 张辉,危起伟,杨德国,等. 葛洲坝下中华鲟自然繁殖流速场的初步观测. 中国水产科学, 2007, 14(2):183~191.
- [10] 张辉,危起伟,杨德国,等. 葛洲坝下游中华鲟(*Acipenser sinensis*)产卵场地形分析. 生态学报, 2007, 27(10):3945~3955
- [11] 王远坤,夏自强,蔡玉鹏. 葛洲坝下游中华鲟产卵场流场模拟与分析. 水电能源科学,2007,(5):54~57.
- [12] 付小莉,李大明,金国裕. 葛洲坝下游中华鲟产卵场流场计算和分析. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006,34(9):111~113.
- [13] 付小莉,李大明,陈永柏. 葛洲坝下游中华鲟产卵河段的流场计算与分析. 水科学进展, 2006, 17(5):700~704.
- [14] 杨宇. 中华鲟葛洲坝栖息地水力特性研究. 南京:河海大学,2007. 60.
- [19] 危起伟. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估. 武汉:中国科学院水生生物研究所,2003. 119