

# 葛洲坝下游中华鲟产卵河段的流场计算与分析

付小莉<sup>1</sup>, 李大美<sup>1</sup>, 陈永柏<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 由于葛洲坝工程的修建, 中华鲟的洄游路线被阻断了, 使中华鲟产卵场由过去的屏山至木洞 800 km 江段压缩至现在的葛洲坝下游不足 5 km 江段。中华鲟也由水产资源演变成一级保护动物。运用水动力学的 N-S 方程和  $k-\epsilon$  紊流数值模型, 结合计算水气两相流的方法 VOF(volume of fluid), 采用控制体积法离散计算区域, 对葛洲坝下游中华鲟产卵河段的流场进行了计算。并结合中华鲟的生态特性, 分析其产卵繁殖对流场特性的要求, 以期在三峡水库下游河道整治中注意保护其产卵场地。

**关键词:** 中华鲟; 控制体积法; VOF; 天然产卵场; 三维河道; 葛洲坝下游

**中图分类号:** O357.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2006)05-0700-05

中华鲟又称鲟鲨、大腊子, 属鲟科鲟属<sup>[1,3]</sup>, 为洄游性的底层鱼类。在葛洲坝兴建前每年 10~11 月成熟中华鲟由海入江, 洄游 3 000 多公里到江河上游产卵, 如长江上游屏山至木洞 800 km 江段有中华鲟天然产卵场达 16 处之多。它们一般把卵产在深潭和河床岩石壅积处。1981 年葛洲坝工程修建后, 阻断了中华鲟的洄游路线, 使中华鲟的繁衍和生存受到极大威胁, 资源量锐减。虽然现在中华鲟只能洄游 2 000 多公里, 但由于中华鲟顽强的生命力和对流场条件改变的敏感性、选择性和适应性<sup>[2]</sup>, 它们还是在葛洲坝下游 5 km 的江段找到了新的产卵场(见图 1, 图 2), 只是产卵量已不足过去的 20%。因此, 目前中华鲟已被列为濒危物种。更为严重的是, 新产卵场的河床结构随时都受到三峡工程泄洪和航道疏浚的威胁, 中华鲟的产卵繁殖环境十分脆弱。

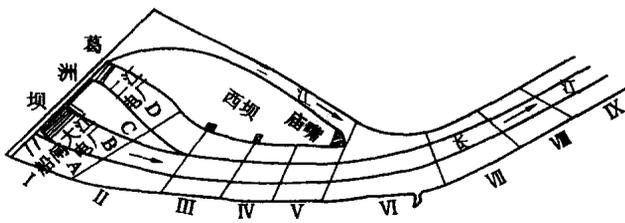


图 1 中华鲟产卵场平面分布

Fig. 1 Layout of Acipenser Sinensis's spawning site

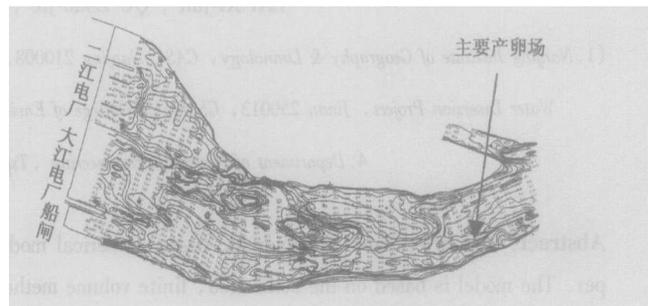


图 2 中华鲟产卵场地形图

Fig. 2 Map of Acipenser Sinensis's spawning site

## 1 研究现状<sup>[1,3]</sup>

我国现在有一些机构致力于中华鲟的保护工作, 如中国科学院水生生物研究所一直从事中华鲟的生物研究, 中国水产科学研究院长江水产研究所通过人工孵化来养殖中华鲟, 我国现在每年向长江里投放一定数量的中华鲟水花和规格在 20 cm 左右的种苗。

收稿日期: 2005-05-09; 修订日期: 2005-11-18

基金项目: 国家自然科学基金重大项目和三峡建设委员会重点项目联合资助 (30490231)

作者简介: 付小莉(1979-), 女, 江西赣州人, 博士研究生, 主要从事生态水力学研究。E-mail: xiaoli-f@sina.com.cn

## 2 中华鲟产卵场的分布

根据 1983 年以来对中华鲟产卵场的记载<sup>[9]</sup>，葛洲坝下游中华鲟产卵场的位置主要集中在葛洲坝坝下至胭脂坝约 10 km 的江段内，图 1 把这段江段划分为若干个区，根据对产卵亲鲟的超生波遥测定位及江底直接采捞中华鲟受精卵的结果，发现中华鲟卵主要集中在 A 区和 B 区，C 区、D 区、E 区、F 区、G 区、H 区、I 区、J 区、K 区、L 区、M 区、N 区、O 区、P 区、Q 区、R 区、S 区、T 区、U 区、V 区、W 区、X 区、Y 区、Z 区也有少量分布，其它区域极少发现鲟卵的分布。为了解中华鲟产卵的规律，本文试图模拟这一段天然产卵场河道的流动特性与流速分布。由于天然河道蜿蜒曲折，在三维数学模型中很难完全与实际情况一致，需进行概化，因此根据中华鲟产卵场地形图（图 2），建立了计算模型，如图 3 所示。

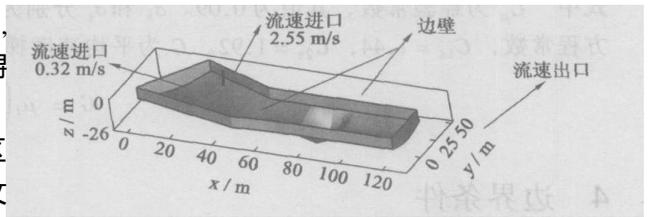


图 3 中华鲟产卵场边界条件示意图

Fig. 3 Boundary sketch of *Acipenser Sinensis* spawning site

## 3 数值模拟及计算方法

天然河道边界复杂，流动紊乱，具有很多不稳定因素，它的计算一直是热点与难点问题。自从 Launder 和 Spalding<sup>[4]</sup>提出  $k-\epsilon$  模型后，现在该模型已成为应用最为广泛的紊流模型，它成功地模拟了许多复杂水流问题。虽然雷诺应力模型或代数应力模型模拟各向异性较强的水流比它要更加精确，但在河道计算中引入水气两相流的 VOF 模型之后，由  $k-\epsilon$  模型计算出的结果要比雷诺应力模型的结果与实测值吻合得更好<sup>[10]</sup>。因此本文仍采用  $k-\epsilon$  紊流模型对整个流场进行数值模拟。在河道中，水流和气体有明显的分界面，因此可以用水气两相流的分层流模型来进行模拟。Hirt 和 Nichols<sup>[5]</sup>提出的流体体积分数 (VOF) 法是目前处理带自由表面分层流问题的较理想方法。它是通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积百分比来模拟两种或三种不能混合的流体，适用于模拟天然河道计算。VOF 公式依靠的是两种或多种流体 (或相) 没有互相穿插这一事实。对增加到模型里的每一附加相，就引进一个变量，即计算单元里的相的容积比率。在每个控制容积内，所有相的容积百分比之和为 1。所有变量及其属性的区域被各相共享并且代表了容积平均值，只要每一相的容积比率在每一位置是可知的。因此，除了连续方程，动量方程和  $k-\epsilon$  方程，还增加了一个容积比率方程。

容积比率方程 跟踪相之间的界面是通过求解一相或多相的容积比率的连续方程来完成的。对第  $q$  相，这个方程为

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \bar{v} \nabla \cdot \alpha_q = 0 \quad (1)$$

通常，容积比率方程不是为主相求解的，主相容积比率的计算基于如下的约束：

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

连续方程 
$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (3)$$

动量方程 
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (4)$$

$k$  方程 
$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G - \quad (5)$$

方程 
$$\frac{\partial (\quad)}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \quad)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right\} + C_1 \frac{G}{k} - C_2 \frac{\quad}{k} \quad (6)$$

式中  $t$  为时间;  $u_i$  和  $x_i$  分别为速度分量和坐标分量;  $\rho$  和  $\mu$  分别为密度和分子粘性系数;  $P$  为修正的压力;  $\mu_t$  为紊流粘性系数, 它表示为:

$$\mu_t = C_\mu k^2 \quad (7)$$

式中  $C_\mu$  为经验常数, 其值为 0.09。  $k$  和  $\epsilon$  分别为  $k$  和  $\epsilon$  的紊流普朗特数,  $k = 1.0$ ,  $\epsilon = 1.3$ 。  $C_1$  和  $C_2$  为方程常数,  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ 。  $G$  为平均速度梯度引起的紊流动能产生项, 它可由下式定义:

$$G = \mu_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

## 4 边界条件

### 4.1 入口边界

模型的进口条件为只有二江电厂发电而大江电厂和船闸均不开启, 即和中华鲟产卵期葛洲坝实际运行情况一致, 如图 1, 图 2。根据实测资料(由中国科学院水生生物研究所提供): 模型入口设在葛洲坝发电站出口前方(即测量船最多能到达的地方), 二江电厂位置的入口流速为  $2.55 \text{ m/s}$ , 大江电厂和船闸处的流速为  $0.32 \text{ m/s}$ , 模型进口出水深为  $8 \text{ m}$ , 入口处的  $k$  和  $\epsilon$  按经验公式给出。

### 4.2 出口边界

所有变量的法向变量的法向梯度为零, 即第二类边界条件:  $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$

### 4.3 自由水面

自由水面按压力边界处理, 压力边界上的压力值  $p = 0$

### 4.4 壁面边界条件

采用标准壁函数

### 4.5 网格的划分

本文采用对复杂计算区域适应性很强的非结构网格与有限体积法相结合来对计算区域进行离散。非结构网格与有限单元类似, 它是用节点和单元的联系来标记单元和节点的位置以及相邻单元之间的连接<sup>[6~8]</sup>。对于三维问题可以采用四面体, 三棱柱, 六面体等灵活的空间形状离散计算区域。在一些不太规则的区域可以使用四面体或三棱柱单元, 较规则的区域可采用六面体单元。对计算区域的表面网格划分见图 4。

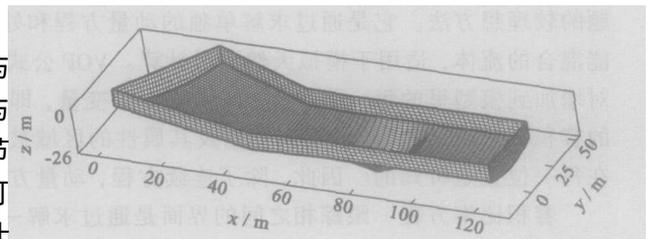


图 4 网格划分示意图

Fig. 4 Calculation grids

## 5 计算结果分析

三维流场具有从不同侧面分析模型的特点, 我们可以截取河道不同断面来获得流速分布信息。图 5 ~ 图 11 分别为截取各个断面所得的流场和流线图。

由地形图可以观察到, 自葛洲坝建成后, 由于大江、二江电厂的常年泄洪冲刷, 在河道转弯处形成一较大的“深坑”, 中华鲟的产卵密集处恰好位于此深坑附近, 这也是中华鲟产卵场地形的一个最大的特征。因此, 在计算中, 深槽附近的流场是本文密切关注的。

图 5 为深槽的中心过水断面流速图, 可以很明显的看到水和空气的分界线, 水的流动比较紊乱, 在壁面附近有小旋涡, 整个流域有大的旋涡; 而图 6 为用 ADCP 实测得到的河道断面水下流速分布, 可以看出两图中的

速度分布基本相近。

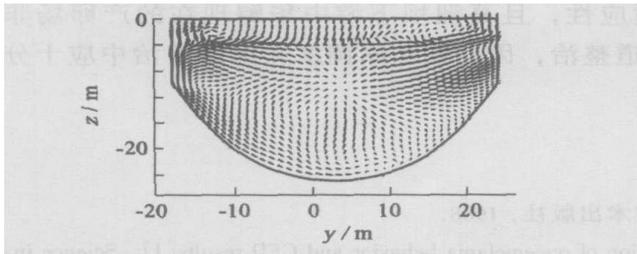


图 5  $x = 85 \text{ m}$  过水断面流速图  
Fig.5 Velocity at section  $x = 85 \text{ m}$

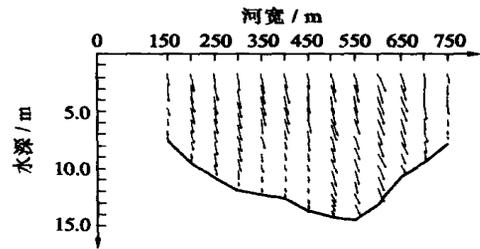


图 6 实测断面水下流速分布  
Fig.6 Measured underwater velocity distribution of section

图 7~图 9 用来观察河道水平方向的流向，在仅有二江电厂发电的情况下，大江电厂和船闸门口形成较强的回流区，同时，在河道转弯处也有一较小的回流区，且越靠近河道底部，回流区越小，流态也越稳定；在深坑处形成卷流，流态较复杂。此外，从图 8 实测中可以看到，计算和所测水下断面流速分布趋势也是基本吻合的。

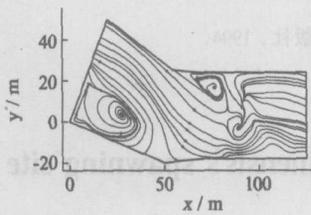


图 7  $z = -8 \text{ m}$  流线图  
Fig.7 Streamline at section  $z = -8 \text{ m}$

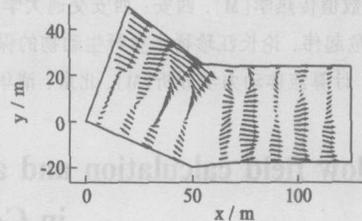


图 8 计算断面流速分布  
Fig.8 Calculated section velocity

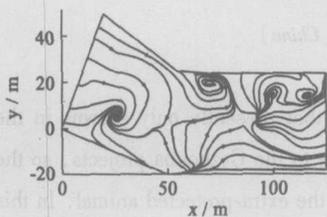


图 9  $z = -4 \text{ m}$  流线图  
Fig.9 Streamline at section  $z = -4 \text{ m}$

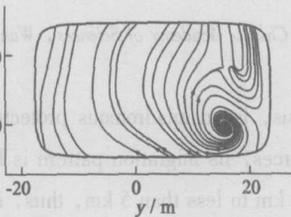


图 10  $z = -1.5 \text{ m}$  流线图  
Fig.10 Streamline at section  $z = -1.5 \text{ m}$

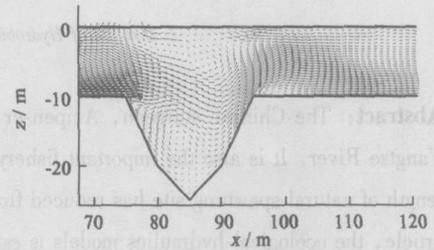


图 11  $y = 3 \text{ m}$  断面流速图  
Fig.11 Velocity at section  $y = 3 \text{ m}$

图 10 是剖切深槽底部水平面所得，在中心发现了旋涡；图 11 为深槽处的纵断面流速图；当主流通过模拟河道的深坑时，槽底与主流的上部和下部均形成旋涡，且方向相反（底部为顺时针，上部为逆时针），上层的空气受水流的影响，亦很混乱。

## 6 结 论

(1) 计算流场分布和现场实测资料对比，流场分布较一致。

(2) 通过对葛洲坝下游中华鲟产卵场的流场模拟计算发现，产卵场的流态非常复杂。特别是只有二江发电时，表面主流的速度较大，但水流通过深坑时，深坑底部的漩涡流场十分有利于鲟卵的沉降，同时由于中华鲟的卵有很强的粘性，有助于它们附着在江底的壅积岩石缝隙而不被水流冲走或被其它鱼类吞食，使鲟卵孵化得到有效保护。根据实测和计算表明，中华鲟喜欢在表面流速大而河床底部流速较小，流态相对平稳的深坑的岩

石壅积处产卵,这也是适合中华鲟产卵的水力学特性。

(3) 为中华鲟对流场环境改变具有敏感性、选择性和适应性,且葛洲坝下游中华鲟现在的产卵场非常脆弱,随时都有可能消失。其中最主要的影响因素是泄洪和航道整治,因此在水库调度和河道整治中应十分注意保护其产卵场。

#### 参考文献:

- [1] 四川省长江水产资源调查组. 鲟鱼和中华鲟[M]. 成都:四川科学技术出版社, 1988.
- [2] Li Damei. Study of water intakes for oncemelania control based on information of oncemelania behavior and CFD results[J]. Science in china, Ser E, 2001, 44(5):522 - 530.
- [3] 王玉堂. 鲟鱼资源现状[J]. 中国水产, 1999(9):17 - 19.
- [4] Lauder BE, Spalding DB. Lectures in Mathematics Models of Turbulent[M]. London: Academics Press, England, 1972.
- [5] Hirt CW, Nichols BD. Volume of Fluid(VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries[J]. J Comput Phys, 1981, 39:201 - 225.
- [6] 谭维炎. 计算浅水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [7] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型[M]. 南京:河海大学出版社, 1989.
- [8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1989.
- [9] 柯福恩,危起伟. 论长江珍稀水生野生动物的保护与补救[M]. 北京:环境科学出版社, 1994.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

## Flow field calculation and analysis of *Acipenser Sinensis*'s spawning site in Gezhouba downstream<sup>\*</sup>

FU Xiao-li<sup>1</sup>, LI Da-mei<sup>1</sup>, CHEN Yong-bo<sup>2</sup>

(1. School of Water Resource and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, is an anadromous protected species that presently only spawns in the Yangtze River. It is also the important fishery resources. Its migration pattern is blocked due to the Gezhouba projects, so the length of natural spawning site has reduced from 800 km to less than 5 km, thus, it becomes the extra-protected animal. In this article, the ecological-hydraulics models is established to simulate and analyze the 3-D flow character by using the N-S and the  $k - \epsilon$  formulas, the method of volume of fluid is also used to simulate the two phase flow, and the finite volume method is used to disperse the calculated area, which aims to provide technical parameters for the optimizing regulation of Three Gorges reservoir.

**Key words:** Chinese sturgeon; finite volume method; volume of fluid; natural spawning site; 3-D channel; Gezhouba downstream

<sup>\*</sup> The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30490231).