

中华鲟产卵栖息地与流量关系的数值模拟研究

英晓明¹, 杨宇², 贾后磊¹, 谢健¹

(1. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广东 广州 510300; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:长江葛洲坝和三峡水利枢纽兴建后, 中华鲟无法洄游到金沙江产卵栖息地, 其繁殖受到较大影响。实地调查发现, 中华鲟在葛洲坝下游建立了两个新的产卵繁殖地。为了研究适于中华鲟产卵繁殖的水深、流速、底质等条件, 利用中华鲟繁殖期上下游水文站的实测水文和河道地形资料建立了河道水力模拟模型, 并利用所建立的模型分析了中华鲟产卵地的水力条件, 确定了产卵繁殖地水力条件与上游水利工程下泄流量之间的量化关系。中华鲟的产卵繁殖时间正好与三峡工程汛末蓄水时间一致, 因此, 研究成果为三峡水库蓄水和中华鲟的保护提供了科学依据。

关键词:中华鲟; 产卵栖息地; 产卵水流条件; 数值模拟; 三峡水利工程

中图法分类号: X171 **文献标志码:** A

中华鲟是我国特有的珍贵鱼类, 为典型的溯河产卵洄游鱼类, 始于中生代白垩纪^[1], 距今已有1.4亿a的历史, 被誉为“活化石”, 中华鲟在我国近海生长, 而产卵场主要分布在长江上游, 珠江也有少数中华鲟产卵。长江葛洲坝水利枢纽在1981年截流, 1988年建成后, 中华鲟的繁殖洄游通道被阻断, 加之人为捕捞, 中华鲟的数量曾一度下降。在没有实行禁捕制度的1972~1980年间, 长江中华鲟成体的年捕捞量在394~636尾之间(平均每年517尾)^[2]。1994年以来, 在中华鲟产卵繁殖期间(10~11月份), 在同样的捕捞强度下, 葛洲坝水利枢纽坝下至古老背江段, 出现了长达15~20d捕捉不到中华鲟的“断层期”^[3]。按常剑波估计, 1981~1990年期间, 中华鲟繁殖群体年补充量为822~1650尾^[4]; 而采用水声学方法估计1998年中华鲟自然繁殖前, 长江葛洲坝下至古老背约20km江段中的中华鲟亲体资源量为1028尾, 到达葛洲坝水利枢纽坝下的数量仅约为葛洲坝截流初期的50%^[5]。为拯救中华鲟, 人们开始探索研究各种水利

工程挽救中华鲟的措施, 如人工繁殖放流、网捕亲鱼过坝以及在某些地方实行禁捕等^[3]。目前较有成功的措施是人工繁殖放流。这种方法虽然使中华鲟资源得到补偿, 维持了相对稳定的自然种群, 但也存在物种遗传多样性降低的问题。人工增殖如果没有一定比重的自然繁殖种群为基础, 经过若干代繁殖后, 整个物种将会崩溃。这种情况在美国大西洋鲑等物种资源保护和增殖过程中发生过^[6]。然而, 中华鲟也有很强的适应自然的能力, 它们已经在葛洲坝水利枢纽坝下游寻找到了新的产卵场。危起伟等已经研究确定了中华鲟产卵场的大致位置, 即葛洲坝大江电厂以下至西坝庙嘴约4km的大江江段中的两个产卵场: 上产卵场和下产卵场(图1)。上产卵场部分年份有中华鲟产卵, 下产卵场则是每年都有中华鲟成功产卵。

长江三峡工程建成后, 不仅加剧了对中华鲟的阻隔作用, 而且改变了长江的水文情势。三峡水库1~5月份为防洪腾空库容泄水, 10~11月份蓄水。枯水年1~5月, 水库流量下泄将使河口流量增加1000~

收稿日期: 2013-01-21

基金项目: 国家海洋局南海分局局长基金项目(1302); 国家海洋局海洋公益性项目(201105024); 国家自然科学基金青年项目(50909064)

作者简介: 英晓明, 男, 博士, 主要研究方向为水动力生态环境。E-mail: xmying2005@yahoo.com.cn。

通讯作者: 谢健, 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为水动力生态环境。E-mail: 9114234222@qq.com

2 000 m³/s;10~11月,水库蓄水,大通水文站流量将减少5 400~8 400m³/s;按比例计算,大通水文站流量枯水年减少32.4%,平水年减少20.3%,丰水年减少16.9%^[7]。葛洲坝水利枢纽坝下中华鲟的产卵繁殖期为10~11月份^[5],与三峡工程调节流量时间一致,中华鲟的产卵时间和产卵规模将受到一定的影响。三峡下泄清水使河道受到冲刷,河床粗化,可能使中华鲟产卵场延长扩大,但流量减小,又有可能使中华鲟产卵场的面积缩小。确保中华鲟高效、自然繁殖是增加中华鲟的数量和质量的必要措施。扩大中华鲟产卵场面积可为中华鲟产卵提供优越的环境。量化中华鲟的产卵栖息地与下泄流量之间的关系,在中华鲟产卵时间适当调节水库泄水水量,对于保护中华鲟产卵场具有重要意义和实际价值。本文试图建立中华鲟产卵场与流量之间的定量关系,为增加中华鲟产卵场面积提供依据。

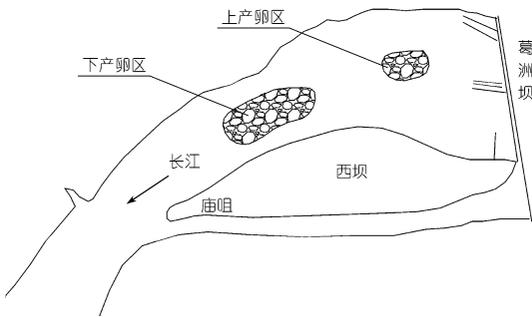


图1 宜昌中华鲟产卵场示意

1 研究方法

本文采用河道内流量增量方法(IFIM)研究中华鲟产卵场与流量之间的定量关系。IFIM方法始于20世纪70年代末^[8],由美国鱼类和生物服务调查中心(US Fish and Wildlife Service)设计和开发。该方法由水力模型和生物信息模型及各类方法组成,通过建立流量和鱼类适宜栖息地之间的定量关系,为水资源规划提供科学依据。在美国、法国、德国和英国等许多国家得到广泛应用。在IFIM理论框架内,包括许多栖息地模拟模型,如PHABSIM、RHABSIM、EHVA、RHYHABSIM^[9]和River_2D等模型。这些模型主要包含两个模块:栖息地模型模块和水力模型模块。

栖息地模型将鱼种的数量和微生境影响因子(水深、流速、底质和遮蔽物)关联,用0~1之间的数值表示影响因子对鱼种的影响,对于最适宜鱼种生存的影响因子情况,赋予数值为1,最适宜鱼种生存的,赋予数值为0。栖息地适宜性指标主要表示方法有:二元格式、单变量格式、双变量格式^[10]和多变量格

式^[11]。栖息地适宜性指标的确定主要有3种方式:专家意见或文献资料、栖息地利用曲线和栖息地偏好曲线。

在上述模型中,River_2D模型为二维水力模型,其他为一维水力模型。二维水力模型,能够更加精确地模拟研究河段的水位和流速,更准确地描述栖息地可利用面积(WUA)与流量变化的关系。本文利用River_2D模型模拟中华鲟产卵场和流量之间的定量关系。

River_2D模型的水力模拟控制方程如下。

连续方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

X方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial H^2}{\partial y} = \\ gH(S_{ox} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) \right] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Y方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial H^2}{\partial y} = \\ gH(S_{oy} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) \right] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, H 为水深, U 、 V 分别为 x 、 y 方向水深上的平均流速; q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向与流速相关的流量强度, $q_x = HU$, $q_y = HV$; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; S_{ox} 、 S_{oy} 分别为 x 、 y 方向上的河床坡度; S_{fx} 、 S_{fy} 分别为 x 、 y 方向上的阻力坡度; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 分别为水平方向上的紊动应力张量。

模型有如下假定:①沿水深垂向,压力符合静压分布规律;②水深方向上的水平流速为常数;③忽略科氏力和风应力。模型采用流线迎风伽辽金加权残差隐格式有限元方法求解。这种方法可以保证在缓流、急流和临界流等所有的流动情况下求解的稳定性。完全守恒形式的离散,能够确保在模拟的区域没有流动质量损失或多余质量。模型实际上是非稳态的,但可用于瞬变分析或者得到一个稳态解。采用有限元方法能够灵活地处理边界条件复杂的河段。

研究区域的边界条件为:进口边界条件为流量过程,出口为边界条件为水位过程,河岸边界为动边界方式。

2 研究区位置

研究地段处于葛洲坝下游附近至十三码头。江中

的西坝将长江分割为南、北两支,南支称大江和二江,北支称三江,南北两支在下游 4.0 km 的庙咀(西坝的下游终点)汇合,下游为宜昌港。南支为葛洲坝水利枢纽下游主水道,北支主要为通航水道。庙咀以上江底地形起伏大,流态十分复杂,主河道河床底基本为岩石和卵石组成的硬质河床。1991~2000 年间,中华鲟产卵时宜昌江段日平均流量在 $7\ 170\sim 23\ 800\text{ m}^3/\text{s}$ 之间变动^[5]。由于葛洲坝船闸闸室只在船舶过坝时才打开,因此在模拟时可以不考虑闸室过流。下游模拟断面为宜昌水文站。同时,12 号模拟断面附近有水文站,因此,选其作为上游模拟断面(图 2)。该模拟河段包括了上产卵区和下产卵区。研究河段河床地形见图 3。研究河段区域面积约为 4.67 km^2 ,河段长约 5 km,最大河宽 1.42 km,最小 0.82 km。

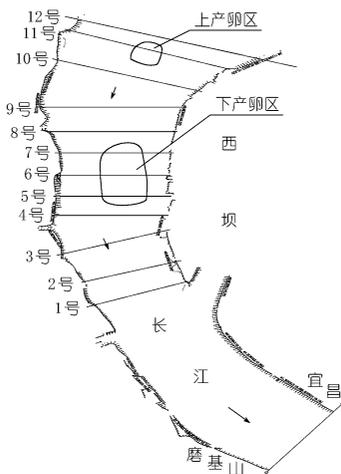


图 2 数值模拟河段部分

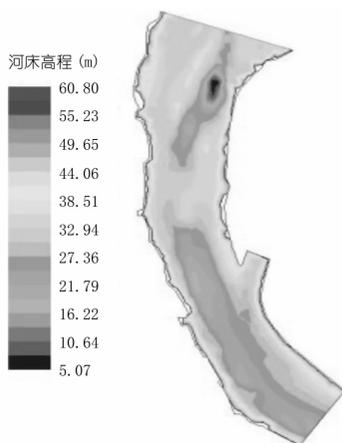


图 3 模拟河段地形

3 模型率定和检验

研究河段共划分为 12 个断面(图 2),断面间最小距离 160 m,最大距离 360 m。中科院水生所分别在流

量为 $11\ 000, 10\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $7\ 990\text{ m}^3/\text{s}$ 的 3 个工况下,测量了各断面沿河宽方向的水深和流速。工况 1 测量成果用于水力数值模拟参数率定,工况 2 用于数值模拟成果验证。采用三角形网格进行数值模拟分析,网格间距为 25 m,共设置了 9 328 个节点,18 024 个网格。河道粗糙高度 K_s 取为 0.2 m。上游为流量边界,下游为水位边界。模拟中时间步长自动调整,最大时间步长 $\Delta t = 100\text{ s}$ 。图 4~5 为其中 4 个横断面模型率定结果,图 6~9 为 4 个横断面的模型检验结果。

从图 4~5,可以看出,在所选参数下,水深和流速数值模拟值与实测值吻合较好,说明所选参数合理。图 6~7 说明,在参数不变情况下,在另一组工况下,水深数值模拟值与实测值吻合较好,流速模拟值与实测值个别点差异较大,但基本符合要求,从而证明模型所选参数是合理的。

4 中华鲟产卵栖息地适宜性指标分析

2004 年 11 月 11 日夜,中科院水生所观测到中华鲟在上、下两个产卵区产卵。根据宜昌水文站观测资料,当时葛洲坝水电站坝下出流为 $10\ 800\text{ m}^3/\text{s}$ 。通过 River_2D 软件模拟,得到当时的水深和流速分布情况,见图 8。两个产卵区内水深和流速范围见表 1。由于没有水温和泥沙资料,本文只考虑 3 个影响因素:水深、流速和河道指标。由表 1 可知,产卵区内的水深范围为 4.50~20.54 m,流速范围为 0.84~2.32 m/s。据分析,中华鲟产卵期间河床底层流速为 0.64~2.36 m/s^[5]。本文假设两个产卵场内的水深、流速和底质均是中华鲟产卵的最适宜条件,将 2 个产卵区的水深和流速适宜性定为 1,其余为 0;将上、下产卵区的底质编号确定为 6 和 8,其余为 1;编号 5~9 的适宜性指标定为 1,其余为 0。最后得到中华鲟产卵栖息地二元格式适宜性曲线,见图 9。

表 1 两个产卵区内水深和流速范围

产卵区	最大水深/ m	最小水深/ m	最大流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最小流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
上产卵区	14.23	4.50	1.40	0.84
下产卵区	20.54	5.23	2.32	1.29

危起伟研究得到了繁殖季节中华鲟分布的水域深度分布(图 10)^[5]。从图 10 可以看出,3 a 中,中华鲟产卵最佳水深范围并不相同,本文将 6~12 m 的水深适宜性值定为 1,其它按相应比例取值,经适当处理,得到中华鲟产卵水深单变量适宜性曲线(见图 11)。

5 中华鲟产卵栖息地模拟

得到中华鲟产卵栖息地指标适宜性曲线以后,利

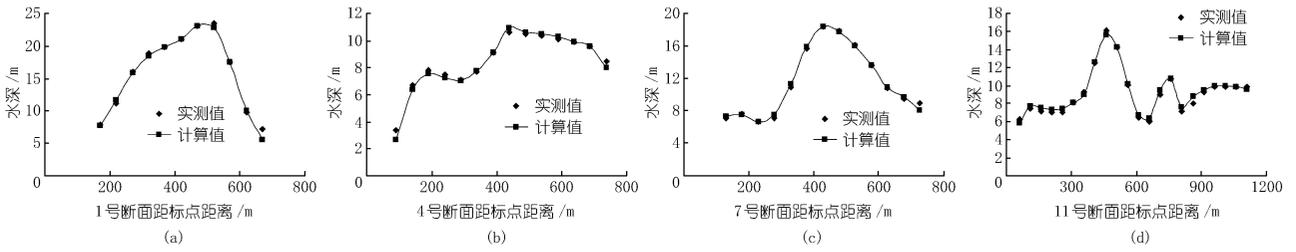


图 4 工况 1 计算水深与实测水深沿断面分布比较

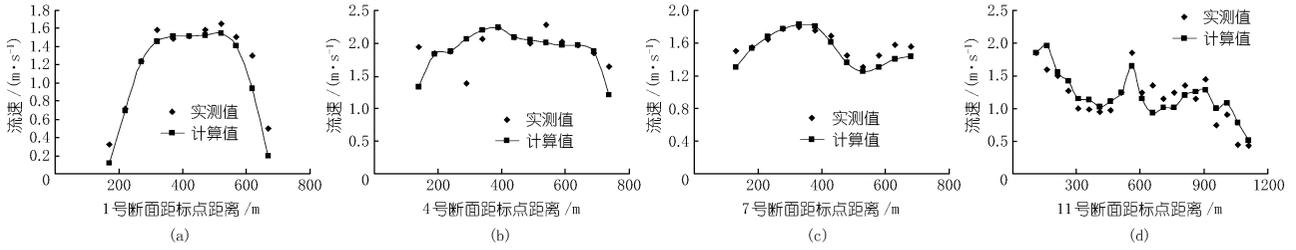


图 5 工况 1 计算流速与实测流速沿断面分布比较

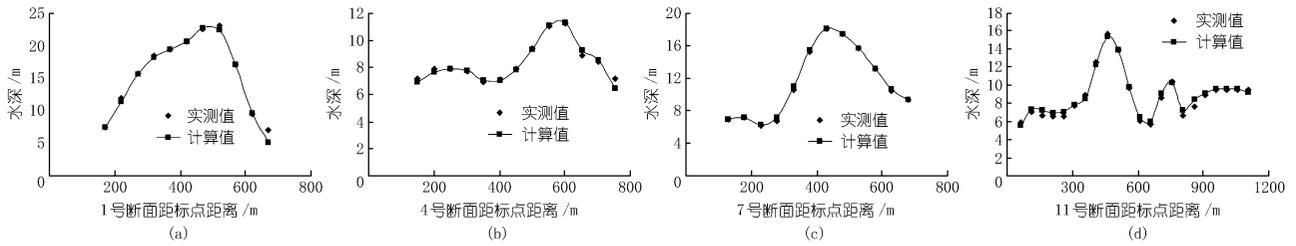


图 6 工况 2 计算水深与实测水深沿断面分布比较

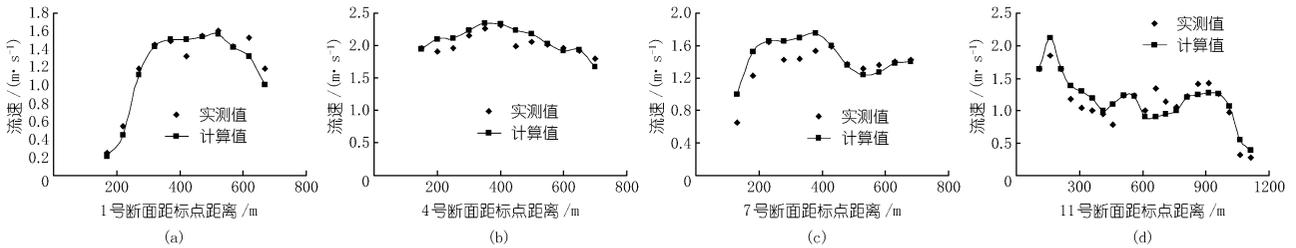


图 7 工况 2 计算流速与实测流速沿断面分布比较

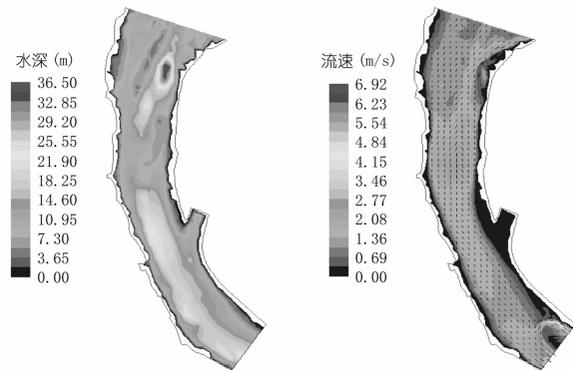


图 8 在流量 10 800 m³/s 下, 研究河段模拟的水深和流速分布

$$WUA = \sum_{i=1}^n CSF(V_i, D_i, C_i) \times A_i \quad (4)$$

式中, WUA 为研究河段的微生境适宜性值; $CSF(V_i, D_i, C_i)$ 为各单元影响因子的组合适宜性值; D_i 为水深; V_i 为流速; C_i 为河道指标, 包括了底质和遮蔽物; A_i 为单元水平面积。栖息地组合适宜性值确定有 3 种公式

$$CSF_i = V_i \times D_i \times C_i \quad (5)$$

$$CSF_i = (V_i \times D_i \times C_i)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$CSF_i = \min(V_i, D_i, C_i) \quad (7)$$

本文采用式(5)计算栖息地组合适宜性值, 分别用两种水深适宜性曲线, 在给定几个流量条件下, 获得相应的栖息地可用面积 WUA 。根据计算结果, 绘制 WUA 和流量关系曲线(图12(a)); 为减少模拟过程中

用 River_2D 软件可以方便地计算出给定流量下中华鲟产卵栖息地的可用面积 WUA 。栖息地加权可用面积 WUA 计算公式为

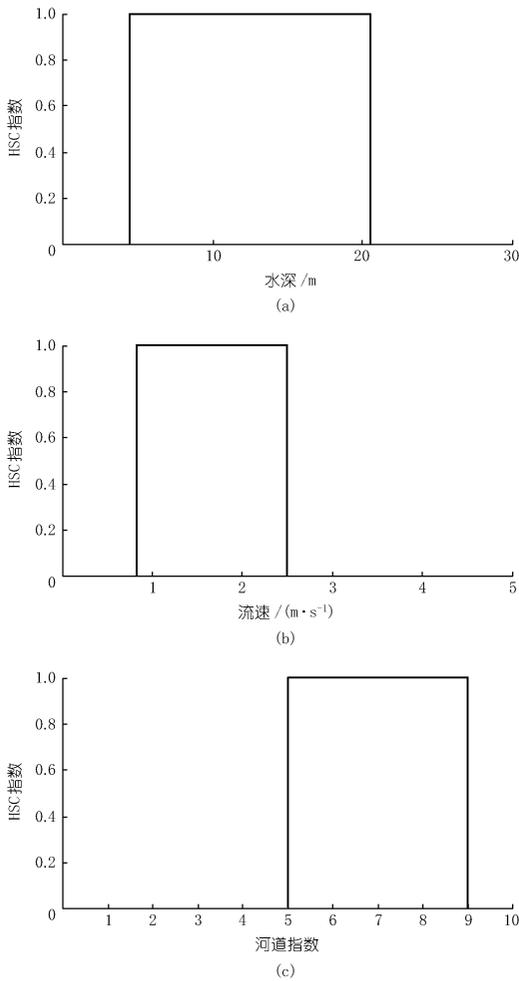


图9 中华鲟产卵水深、流速和河道指标二元格式适宜性曲线

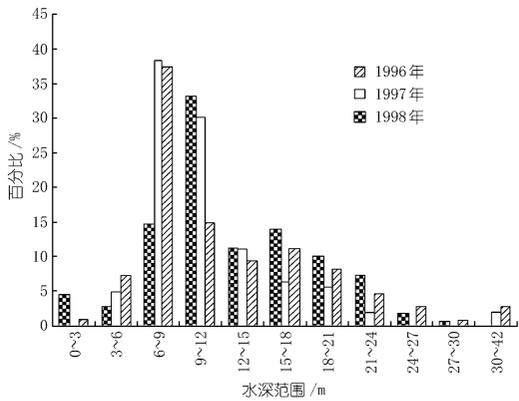


图10 繁殖季节中华鲟分布的水域深度分布(1996~1998年)的误差和方便对两种结果的比较,对WUA进行正则化处理,得到正则化后的WUA与流量关系曲线(图12(b))。

由图12(b)可以看出,中华鲟产卵栖息地与流量之间的关系存在一个峰值区,两种水深适宜性曲线得到的中华鲟产卵栖息地WUA和流量之间的关系曲线比较接近,但也存在差异。差异在于:对水深单变量曲线,当水深小于6m时,适宜性值小于0.3,而对二元

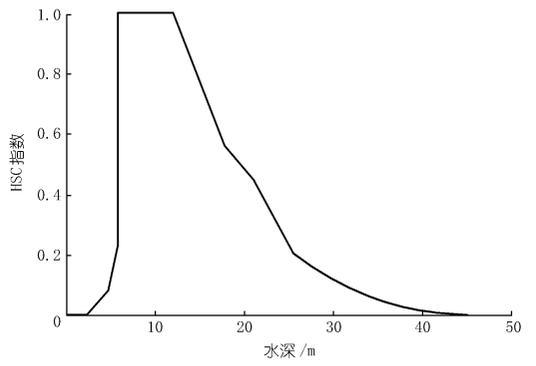
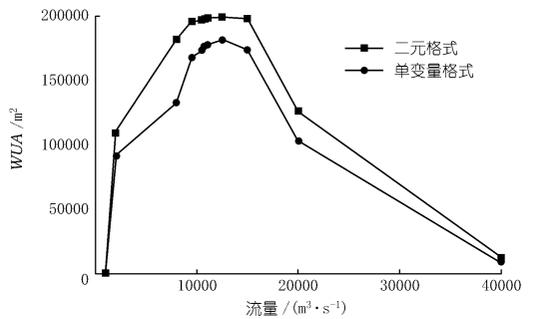
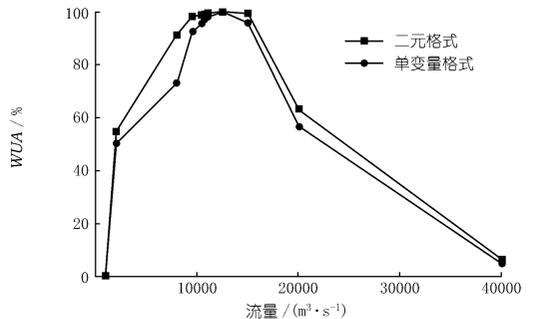


图11 中华鲟产卵水深单变量适宜性曲线



(a) 中华鲟产卵栖息地和流量的关系



(b) 正则化的中华鲟产卵栖息地和流量的关系

图12 中华鲟产卵栖息地和流量关系

格式,当水深为5~6m时,适宜性值为1。因此,用水深单变量曲线得到的栖息地面积小于用水深二元格式得到的面积。两种栖息地与流量的关系曲线接近,即使假定水深大于12m时适宜性值为1,模拟的栖息地面积也没有显著变化,说明水深并不是中华鲟产卵的最重要的限制因子。两种方法得到的最适宜中华鲟产卵的峰值流量均是12500 m³/s,此时中华鲟产卵的可用面积WUA最大。当流量介于10000~15000 m³/s之间时,中华鲟产卵的可用面积WUA比较接近,其值所占最佳栖息地均在90%以上。在其它流量范围,WUA随流量变化而迅速变化。对照危起伟的研究结论,中华鲟产卵时的平均流量为14052 m³/s^[5],可以认为本文得到的中华鲟产卵栖息地和流量的关系较为合理。中华鲟产卵时,正值三峡水库蓄水,可以根据中华鲟产卵的需要下泄一定的水量,尽可能满足中华鲟

产卵的需求,提高中华鲟自然繁殖率。

6 结语

本文参考相关文献,利用 River_2D 模型,研究了中华鲟产卵栖息地的适宜性指标,初步确立了中华鲟产卵栖息地可用面积和流量之间的定量关系。可以作为利用三峡水库调节下泄流量,提高中华鲟产卵栖息地的面积和质量的依据。本文用一组数据建立的中华鲟产卵栖息地的适宜性指标的精确性有待进一步研究,栖息地适宜性指标的精确度是 IFIM 方法的生态学基础,今后,有必要观测中华鲟不同年份产卵的位置、水文要素和环境要素,提高栖息地适宜性指标的模拟精度。水温对中华鲟产卵栖息地也有较大的影响,利用三峡水库调节下泄流量时,要同时考虑水温的影响。提高中华鲟的自然繁殖率,不仅要考虑流量,还要考虑流量变化的影响。

参考文献:

- [1] 危起伟,班璇,李大美. 葛洲坝下游中华鲟产卵场的水文学模型[J]. 湖北水力发电,2007,(2):4-6.
- [2] 柯福恩,胡德高. 葛洲坝水利枢纽对中华鲟的影响-数量变动调查报告[J]. 淡水渔业,1984,(3):16-19.
- [3] 危起伟,杨德国,柯福恩. 长江鲟鱼类的保护对策,21世纪长江大型水利工程中的生态与环境保护[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998.
- [4] 常剑波,曹文宣. 中华鲟物种保护的历史和前景[J]. 水生生物学

报,1999,23(6):712-720.

- [5] 危起伟. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估[D]. 北京:中国科学院研究生院,2003.
- [6] Frontier S. Applications of fractals theory to ecology. In: Legendre P & Legendre L. (Eds), Developments in Numerical Ecology[M]. Springer-Verlag, Berlin; HeideLberg, 1987.
- [7] Xu X. Y. . Impacts of the South - to - North Water (East Route) Diversion Projects on the Ecosystem and Environment of the Yangtze Estuary. Adpted from: Chen J. Y. . Impacts and countermeasures of the South - to - North Water (East Route) Diversion Projects on the Ecosystem and Environment of the Yangtze Estuary[M]. East China Normal University Press, 2003.
- [8] Wu F C, Wang C F. Effect of flow - related substrate alteration on physical habitat: a case study of the endemic river loach *Sigogastromyzon puliensis* (cypriniformes, homalopteridae) downstream of Chi - Chi diversion weir, Chou - Shui creek, Taiwan[J]. River Research and Applications, 2002, (18):155-169.
- [9] Lamouroux N, Jowett I G. Generalized instream habitat models[J]. Can J. Fish. Aquat. Sci, 2005, 62:7-14.
- [10] Vismara, R., Azzellino, A., Bosi, R., et al. Habitat suitability curves for Brown Trout (*Salmo Trutta Fario L.*) in the River Adda, Northern Italy: comparing univariate and multivariate approaches[J]. Regulated Rivers: Research and Management, 2001, 17:37-50.
- [11] Jorde, k., Schneider, M., Peter, A., et al. Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment[C]// Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics Copyright, 2001, ISEH.

(编辑:常汉生)

Numerical simulation research on relation between spawning habitat of Chinese Sturgeon and discharge in Yangtze River

YING Xiaoming¹, YANG Yu², JIA Houlei¹, XIE Jian¹

(1. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: After construction of Gezhouba and Three Gorges hydro - projects, the Chinese Sturgeon (*Acipenser Sinensis Gray*) can not migrate to its spawning habitat in upstream Jinsha River and its breeding is severely influenced. Field investigation discovered that the Chinese Sturgeon had established 2 new spawning and breeding zones in the downstream of Gezhouba hydro - project. In order to study the hydraulic condition suitable to the Chinese Sturgeon spawning and breeding, including water depth, flow velocity and bottom material etc. , a river channel hydraulic simulation model is established by the measured hydrological data of 2 hydrological stations in the upstream and downstream and bottom landform data. The hydraulic conditions at the spawning and breeding zones are analyzed by the model. The quantitative relation between the hydraulic condition of the spawning - breeding zones and discharge from the upstream projects is determined. Because the spawning and breeding time of Chinese Sturgeon is consistent with the impoundment time of Three Gorges Reservoir, so the study provides a scientific base for the reservoir impoundment and the Chinese Sturgeon protection.

Key words: Chinese Sturgeon; spawning habitat; spawning flow condition; numerical simulation; TGP