

基于栖息地模拟法的中华鲟自然繁殖适合生态流量分析

蔡玉鹏¹, 万力¹, 杨宇², 张晓敏¹, 李益进³

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 湖北 武汉 430079;
2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011)

摘要:以长江中华鲟作为目标物种,通过中华鲟自然繁殖期间产卵江段的的栖息地调查,确定了中华鲟的偏好水深、偏好流速及偏好底质。以河道内流量增量法(IFIM)为基础,采用二维水力学模型结合鱼类栖息地模型对中华鲟产卵场的栖息地条件进行了分析,计算了中华鲟自然繁殖期间流量与栖息地加权可利用面积的关系。结果表明,流量在13 000~15 000 m³/s时,栖息地加权可利用面积达到最大,约2.1 km²。
关键词:栖息地模拟法;中华鲟产卵场;栖息地加权可利用面积;生态流量
中图分类号:X143,S961.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2010)03-0001-06

生态流量计算方法中,具有生物学基础的栖息地模拟法约有58种,其中应用最普遍的是河道内流量增量法(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM),20世纪70年代末由美国渔业和野生动物委员会(USFWS)开发,经过不断的发展,在全球19个国家得到广泛应用(Bovee K D,1982;Bovee K D et al, 1998)。该法将水力学模型与特定水生生物不同阶段生活史相结合,定量描述河流流量和栖息地之间的关系,从而确定某一物种特殊生活史阶段的生态需水量,因而在濒危物种保护方面应用较多。近年来经过进一步改进还可用于分析其它各种生态系统要素(R E Tharme,2003;Y Souchon and H Capra, 2004)。

中华鲟是在长江上游繁殖的大型溯河洄游鱼类,历史上中华鲟的主要栖息地位于金沙江下游和重庆以上的长江上游。主要产卵场集中在屏山-合江江段,约有16处。20世纪80年代葛洲坝水利枢纽的修建阻隔了中华鲟的溯河洄游通道,繁殖群体被迫滞留于葛洲坝坝下江段,并形成了新的产卵场,分布范围在葛洲坝下至古老背约30 km江段。近年来的监测表明,中华鲟自然繁殖活动被压缩于葛洲坝至庙嘴约4 km的江段内,该产卵场是迄今发现的中华鲟唯一现存的产卵场,是中华鲟繁殖群体的主

要栖息地(常剑波,1999;危起伟,2003;陶江平等,2009)。

中华鲟自然繁殖除受水温限制以外,对水深、流速、底质等非生物环境因子也具有一定的选择性(QIAO Y et al,2006)。本文基于栖息地模拟的方法,结合水力学模拟和鱼类栖息地模拟,对不同流量条件下中华鲟产卵江段的水深、流速、底质适合情况进行分析,计算中华鲟自然繁殖流量与栖息地加权可利用面积的关系,推求中华鲟自然繁殖的生态流量需求。

1 材料与方法

1.1 数据来源

中华鲟产卵场地形数据采用葛洲坝下至古老背江段实测河道地形,长度约5 km,水域面积约5.11 km²,见图1。中华鲟产卵期水位和流量为宜昌水文站10、11、12月份实测逐日水文数据,水力模拟以2004年中华鲟产卵场实测的流速场为基础。中华鲟产卵期历年监测数据来自常剑波(1999)、危起伟(2003)等,部分监测数据来自谭细畅、陶江平等2005~2009年中华鲟实地监测(未公开)。

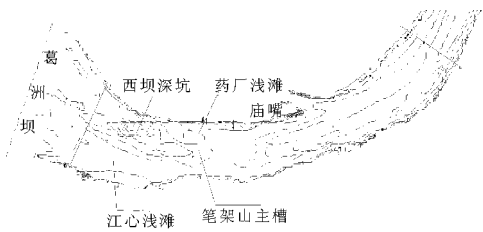


图1 中华鲟自然繁殖栖息地模拟区域
Fig.1 Study area: chinese sturgeon natural spawning ground

收稿日期:2009-11-30
基金项目:科技部水利部公益性行业科研专项(200701008),水利部公益性行业科研专项(200701029),水利部公益性行业科研专项(200801035)。
作者简介:蔡玉鹏,1977年生,男,河南孟津县人,助理研究员,主要从事生态水文及生态修复研究。E-mail: cyp@mail. ihe. ac. cn

1.2 栖息地适合度判别

中华鲟成鱼体型较大,通常体长可达 2 m 多,室内试验获得其栖息地流速和水深适合度非常困难,自然条件下可通过水下声纳探测鱼体位置来确定其水深适合度。根据 1998 年至 2008 年水声探测中华鲟的空间分布,统计历年中华鲟在不同位置的水深分布频率,出现频率最高的适合度为 1,采用单变量适合度曲线法绘制中华鲟栖息地水深适合度。由于缺乏中华鲟空间分布的长系列实测流速资料,以历年产卵日中华鲟出现处垂线平均流速作为频率分析。但中华鲟一般栖息在河流底层,以平均流速代替底层流速存在一定的误差,通过流速换算来改进流速适合度以消除产生的误差,分析中华鲟产卵江段的垂线流速分布规律,将垂线平均流速折算为相

对水深 0.8 位置流速,以减小流速适合度对栖息地计算产生的影响。同样采用单变量适合度曲线法得到中华鲟栖息地流速适合度。

产卵场的底质状况是影响中华鲟产卵和孵化的重要因素,分析产卵场的底质分布将提高栖息地模拟中的精度。选择具有代表性的卵石区、沙滩区进行取样,对于较大的卵石和砾石采用直接测定法;对于粒径较小的沙样则带回室内,烘干、称重后,绘制底质颗粒级配曲线。鱼类栖息地的模拟中,河床底质适合度通过河道指数来表示。河道指数是一个描述代码,不随水流的改变而改变。将各种底质类型按照粒径大小依次编号(表 1),每个单元的节点河道指数进行插值计算,得到中华鲟产卵场底质适合度指数。

表 1 底质类型及编码
Tab.1 Cover Types and codes

编码	1	2	3	4	5	6	7	8
底质类型/mm	水草	淤泥	<0.062	0.062~2	2~64	64~250	250~4 000	>4 000

1.3 栖息地模拟

以中华鲟作为目标物种,根据其生活史和行为生态学,分析中华鲟的栖息地非生物环境因子(如水深、流速、覆盖物、底质),然后模拟研究河段不同流量下的水深、流速、底质分布,结合鱼类栖息地适合度曲线,计算研究河段的栖息地加权可利用面积(Weighted Usable Area, WUA),评估栖息地和计算生态流量。

1.3.1 水力学模型 采用圣维南方程组计算二维水力学特征,研究假设在垂直方向上的符合静压分布,水平流速是连续的,科氏力和风力忽略不计。初始条件包括各计算节点的地形高程、坐标、河道粗糙高度及计算河段的设定等。边界条件包括入流初始水位、入流流量及水深、出流边界水位等,其中上边界为流量,下边界为水位,河岸边界采用动边界条件。

1.3.2 鱼类栖息地加权可利用面积计算 鱼类栖息地模型的核心是栖息地加权可利用面积(WUA)。WUA 是模拟河段中每一单元及相邻节点计算的复合适合度指数(Composite Suitability Index, CSI)的乘积(Peter Steffler et al, 2002),其值的范围在 0~1,计算公式为:

$$WUA_{Q,s} = \sum_{i=1}^n (a_i, Q) (csi_{i,Q,s}) \tag{1}$$

式中, a_i 为单元 i 水面面积, $csi_{i,Q,s}$ 为目标物种在流量 Q 条件下的单元 i 的复合适合度指数。对应每个栖息地单元的综合适合度指数的计算公式如

下: $csi = (si_d)(si_v)(si_{ci})$ (2)

式中, si_d 是单元 i 的水深适合度指数, si_v 是单元 i 的流速适合度指数, si_{ci} 是单元 i 的河道指数(通常是底质或覆盖物)。

上述栖息地适合度指数是流量的函数,和鱼类种群有一定的比例关系。假定河床地形在计算过程中保持不变,影响物种数量和分布的主要因素是计算河段水深、流速和底质的变化。

2 结果与分析

2.1 中华鲟栖息地适合度

2.1.1 水深选择 水深频率统计得到的中华鲟水深适合度曲线见图 2,结果显示中华鲟对水深的选择范围为 6~26 m,出现频率最高(适合度指数为 1)的水深为 9~15 m。

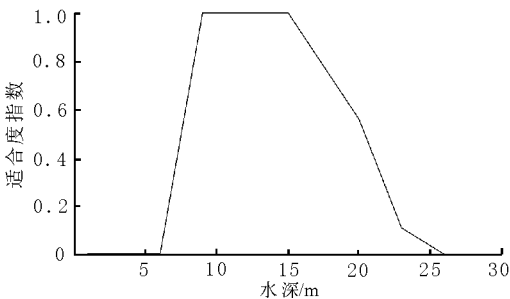


图 2 中华鲟水深适合度曲线
Fig.2 Curve of ralation between Depth and Suitability index

2.1.2 流速选择 以2004年中华鲟产卵场实测的流速场为基础,分析流速在垂向上的分布特征。结果表明流速沿垂线符合对数流速分布公式,而中华鲟主要栖息河流底层位于相对水深0.8位置附近,对于全部计算单元,求取流速比的均值,在不同流量下这个比值略有变化,其流速比均值为1.10,即中华鲟所在位置处的垂线平均流速为其所在位置流速的1.10倍。估算平均流速和相对水深0.8处流速比值求得改进的流速适合度曲线见图3。出现频率最高(适合度指数为1)的流速为1.0~1.4 m/s,改进后适合度指数为1的流速为0.91~1.27 m/s。

2.1.3 底质选择 通过颗粒级配曲线(图4)可以看出,中华鲟产卵场的底质组成主要是岩石、卵石和沙子。其中卵石的粒径各个取样点的颗粒级配曲线具有相似性,1~100 mm的卵石占30%~40%,大于100 mm的占40%~50%,最大的粒径不超过350 mm。其中卵石最大粒径在江心处,达到335 mm;中值粒径为130 mm,依次向河道两边递减。沙质也是同样规律,中值粒径在江心处为0.82 mm,而在靠岸

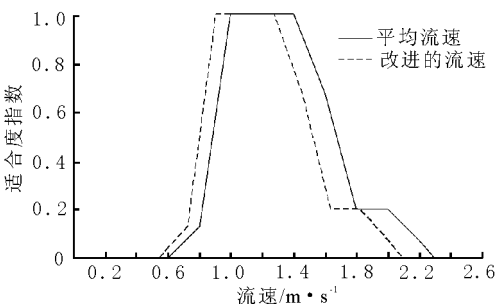


图3 中华鲟流速适合度曲线
Fig.3 Curve of ralation between velocity and Suitability index

边的地方小于江心处。颗粒级配曲线基本上覆盖了河床底质组成结构。从不同底质的分布来看,主流区为较大粒径卵石,沙质的粒径也比同一断面的大;在主河道与三江航道交汇处,河道微弯,是较大的回流区,由于水流的作用明显出现了一处沙滩,卵石较为少见。中华鲟核心产卵区处于大粒径卵石区和较小卵石区的结合部,并非单一的卵石结构,沙质、岩石都有分布。

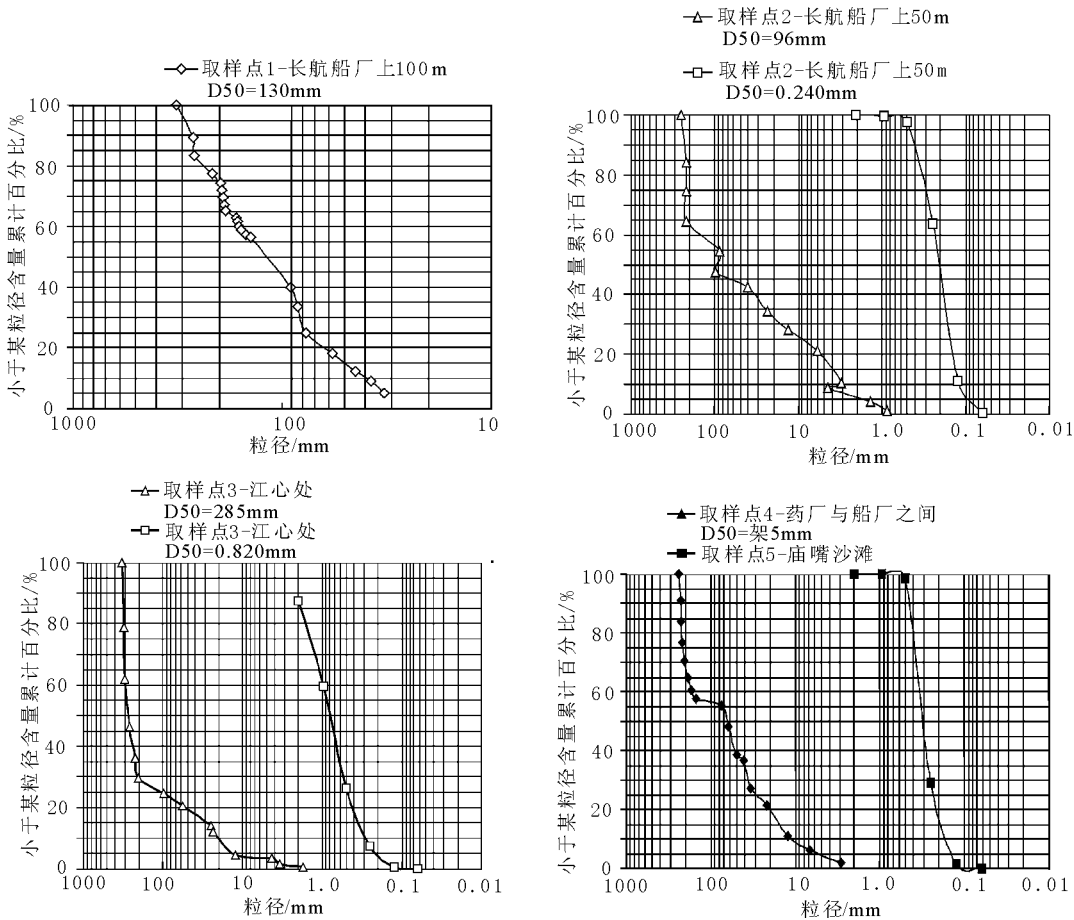


图4 中华鲟产卵场河床质颗粒级配曲线
Fig.4 Curve of particle size distribution on the chinese sturgeon spawning ground

2.2 不同流量下的栖息地可利用面积

采用2004年实测的中华鲟产卵场江段流速数据对水力学模型进行率定和验证,结合栖息地适合度曲线,其中包括改进和未改进的流速适合度,计算不同流量下的栖息地加权可利用面积。图5为起始模拟流量为 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、以 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 增量直至 $35\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的低、中、高流量3种等级下栖息地加权可利用面积变化趋势。

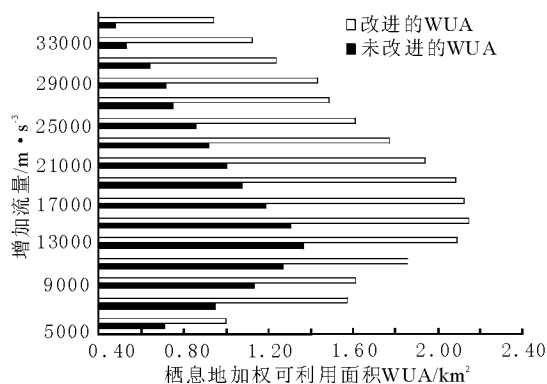


图5 中华鲟产卵流量与WUA关系

Fig. 5 Relation between flow of chinese sturgeon spawning and WUA

改进和未改进计算的WUA随流量变化关系非常相似:从低流量到中流量,栖息地面积随流量增加而迅速增加。未改进的流速适合度栖息地模拟在流量为 $13\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时栖息地面积达到最大,对应的面积为约 1.37 km^2 ;而改进的流速适合度栖息地模拟在流量为 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时栖息地面积达到最大,对应的栖息地面积为约 2.15 km^2 。

流量增加到高流量时,由于流速和水深越来越不适合中华鲟的栖息,因而随着流量的增加栖息地面积开始减少。当达到 $35\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时,栖息地面积减少到约 0.48 km^2 和 0.94 km^2 。当栖息地面积达到最大时,经过改进的比未改进的栖息地面积大56.9%,增加面积 0.78 km^2 ;当流量达到最大值 $35\,000\text{ m}^3/\text{s}$,改进的栖息地面积仅占研究区域面积的9.3%,栖息地面积减少到不足 1 km^2 。

2.3 中华鲟自然繁殖生态流量需求

不同流量下的中华鲟栖息地加权可利用面积(WUA)变化表明,在流量达到 $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地的面积最大。流量在 $13\,000\sim 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地面积大且稳定在较高水平,此流量范围可视为中华鲟自然繁殖的生态流量需求范围,也可以部分解释在历史监测中,流量在 $10\,000\sim 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时中华鲟产卵情况较多的现象。

3 讨论

3.1 中华鲟栖息地适合度计算

通过中华鲟产卵场的流场数值模拟,获取中华鲟探测位置的流速数据,即可分析中华鲟流速偏好曲线(杨宇等,2007)。对中华鲟栖息地主要生态因子的实测数据分析建立中华鲟栖息地适合度模型,计算中华鲟成鱼、产卵、孵化等不同生活史的适合范围,评价中华鲟的栖息地状况(易雨君等,2007)。在不同生活史阶段中华鲟栖息地适合度有所差别,目前中华鲟栖息地适合标准以历史资料和监测的数据为准,主要考虑的是中华鲟历年产卵时栖息地因子,未考虑葛洲坝下隔流堤建设、坝下河势调整对中华鲟栖息地的局部区域流速和底质造成的影响。另一方面,底质的取样面积较小,产卵场的整个底质分布考虑的不够全面,可能导致栖息地适合度出现误差。

3.2 生态流量与中华鲟产卵的关系

水文过程对洄游性水生生物产卵繁殖和迁徙具有特殊意义,在某种程度上起到了信号和指示的作用。水文周期变化对于聚集在河流周围的生物是一种特殊的信号,这些生物依据这种信号进行繁殖、产卵和迁徙,也就是说河流还肩负着传递生命信息的任务。生态流量对中华鲟的自然繁殖是很关键的,水体的流动塑造了河流栖息地的地貌、地形、底质等特征,栖息地的流速、水深、含沙量、底质等生境因子取决于河流流量的动态变化,栖息地的多样性为中华鲟提供了完成产卵、孵化的场所。因此,生态流量为中华鲟产卵提供了最佳的栖息地选择,但并不表明在生态流量范围之外不能产卵。从流量与WUA关系可知,流量在 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 情况下有将近 1 km^2 的栖息地可利用面积,本课题组2009年的中华鲟自然繁殖监测结果显示,流量低于 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 中华鲟仍能在栖息地自然繁殖。

由于影响中华鲟产卵的因素众多,在分析中华鲟的自然繁殖对生态流量需求时仅关注产卵阶段是不够的。分析中华鲟历年的产卵数量与汛期的月平均流量可发现,汛期7、8、9月份平均流量与中华鲟产卵数量具有较显著正相关性,相关系数 r 达0.85。随着洪水期洪水涨落的周期变化,中华鲟产卵量也随之变化。1998年长江流域发生大洪水,7、8、9月平均流量达到 $42\,000\text{ m}^3/\text{s}$,中华鲟产卵量估计值也达到历年监测值最高。计算中华鲟生态流量时还要考虑整个水文过程、种群数量、食卵鱼资源量等对中

中华鲟自然繁殖的影响。

3.3 三峡调度对中华鲟生态流量需求的影响

三峡水库已于2008年10月开始试验性蓄水,中华鲟产卵期正值蓄水期,三峡水库的下泄流量将减少,加上未考虑葛洲坝水利枢纽的调度等因素,中华鲟产卵场的水温、水质、流速、河床底质等存在变化,栖息地状况也会相应发生变化。分析复杂的、空间性明确的栖息地适合标准,引入更精确的三维水力学模型、大生境与微生境整合的栖息地建模方法,准确的计算中华鲟栖息地的适合度标准,评估中华鲟的生态流量需求,以地理信息系统为基础的空间显示平台显得尤为重要。这不仅为针对中华鲟的三峡水库生态调度提供数据支撑和调度依据,还对中华鲟的物种保护具有重要意义。

参考文献:

- 常剑波. 1999. 长江中华鲟繁殖群体结构特征和数量变动趋势研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所.
- 陶江平, 乔晔, 杨志, 常剑波, 等. 2009. 长江葛洲坝江段中华鲟繁殖群体数量与繁殖规模估算及变动趋势分析[J]. 水生态学杂志, 2(2): 37-43.
- 危起伟. 2003. 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所.
- 杨宇, 谭细畅, 常剑波, 等. 2007. 三维水动力学数值模拟获得中华鲟偏好流速曲线[J]. 水利学报, (增刊): 531-534.
- 易雨君, 王兆印, 陆永军. 2007. 长江中华鲟栖息地适合度模

型研究[J]. 水科学进展, (18)4: 538-543.

- Bovee K D. 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology[M]. Washington D C: Fish and Wildlife Service.
- Bovee K D, Lamb B L, Bartholow J M et al. 1998. Stream habitat analysis using the instreamflow incremental methodology [M]. U. S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD/ITR - 1998 ~ 0004.
- Peter Steffler, Julia Blackburn. 2002. Two - Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat; Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual[R]. University of Alberta.
- QIAO Y, TANG X C, CHANG J B et al. 2006. Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*) in the Yangtze River: a hydroacoustic assessment of fish location and abundance on the last spawning ground[J]. J Appl Ichthyol, 22 (Suppl. 1): 140-144.
- R E Tharme. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. River Research and Applications, 19(5): 397-441.
- Y Souchon and H Capra. 2004. Aquatic habitat modeling: biological validations of IFIM/Phabsim methodology and new perspectives[J]. Hydroécol Appl, 14(1): 9-25.

(责任编辑 张俊友)

Analysis on the Environmental Flow Requirements for Natural Reproduction of Chinese Sturgeon Based on Habitat Simulation Methods

CAI Yu-peng¹, WAN Li¹, YANG Yu², ZHANG Xiao-min¹, LI Yi-jin³

- (1. Institute of Hydroecology, Ministry Water Resources and Chinese Academy of Science, Wuhan 430079, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Nanjing Yangtze River Management Office, Nanjing 210011, China)

Abstract: This paper has taken the Chinese sturgeon as target species, by investigating the habitat of the chinese sturgeon natural spawning ground, the Habitat Suitability Criteria including to depth, improved flow velocities and cover types were made certain. Two – dimensional hydrodynamics simulation combines fish habitat model, with the basic framework of Instream Flow Incremental Methodology, The performance of habitat conditions on chinese sturgeon natural spawning ground was evaluated, and the relationship between environmental flow requirement of chinese sturgeon natural spawning and Weighted Usable Area was analysed in succession. It was evidenced that when the WUA reach to maximum 2.1 km^2 , the quantity range of environmental flow requirement is $13\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ to $15\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, This result also provided reference for ecological operation scheme of improving natural reproduction of Chinese sturgeon efficiency.

Key words: Habitat simulation methods; Chinese sturgeon spawning ground; Weighted usable area; Environmental flow requirement