

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

杨德国^{1 2}, 危起伟^{1 2,*}, 陈细华^{1 2}, 刘鉴毅^{1 2}, 朱永久¹, 王 凯¹

(1. 农业部淡水鱼类种质资源与生物技术重点开放实验室, 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北荆州 434000 ;

2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏无锡 214081)

摘要 国家一级保护动物中华鲟为江海溯河产卵的洄游性鱼类, 1981 年即葛洲坝截流前, 其产卵场分布在金沙江下游和长江上游的约 600km 江段。葛洲坝水电工程阻断了其产卵洄游通道, 调查发现自 1982 年以来, 中华鲟在葛洲坝下游江段的狭小范围成功产卵。对中华鲟繁殖季节葛洲坝下中华鲟产卵场的水温、流速、流量、含沙量和水位等水文数据进行了分析, 并对其与中华鲟产卵的关系进行了探讨。结果表明, 葛洲坝截流后, 宜昌中华鲟产卵场江段 10~11 月份的月平均流速及 11 月份的月平均含沙量发生明显变化 ($P < 0.001$), 而月平均水位、流量及水温的变化不明显。多年观察结果显示, 中华鲟产卵时, 5 种水文因子的参数均有一定的变动范围。1983~2004 年期间, 37 次中华鲟产卵时的日平均水温范围为 16.10~20.60℃, 平均为 18.63℃; 日平均水位范围为 40.69~47.32m (黄海高程), 平均为 43.91m; 日平均流量范围为 7170~26000 m³/s, 平均为 13908 m³/s; 1983~2000 年 31 次中华鲟产卵时的日平均含沙量范围为 0.10~1.32 kg/m³, 平均为 0.46kg/m³; 日平均流速为 0.81~1.98m/s, 平均为 1.30 m/s。分析得到较适宜中华鲟产卵的水温是 18.0~20.0℃, 流量是 14100 m³/s, 水位是 42.0~45.0m, 含沙量是 0.2~0.3 kg/m³, 底层流速是 1.0~1.7m/s。水温是中华鲟产卵的必备条件, 水温适宜的情况下, 水位、流速和含沙量出现逐渐从高位下降的趋势, 而且各水文要素值均达到其适宜范围时, 中华鲟即产卵繁殖。三峡工程运行后, 下游江段水温的变化可能会对中华鲟的性腺发育和产卵繁殖产生不利影响, 而江水含沙量下降对其产卵繁殖较有利。

关键词 中华鲟, 产卵, 水文条件, 水电站, 长江

文章编号: 1000-0933 (2007) 03-0862-08 中图分类号: Q178, X171 文献标识码: A

Hydrology status on the spawning ground of *Acipenser sinensis* below the Gezhouba Dam and its relation to the spawning run

YANG De-Guo^{1 2}, WEI Qi-Wei^{1 2,*}, CHEN Xi-Hua^{1 2}, LIU Jian-Yi^{1 2}, ZHU Yong-Jiu¹, WANG Kai¹

1 Key Laboratory of Freshwater Fish Germplasm Resources and Biotechnology, the Ministry of Agriculture of PRC, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Jinzhou 434000, China

2 Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 0862~0869.

Abstract : It was believed that the historical spawning grounds of the anadromous Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30490231); 中国长江三峡工程开发总公司三峡工程环境保护补偿经费科研类 (施工区外) 资助项目 (SX96-1/HB, SX971-25/HB); 国家科技部社会公益研究专项资助项目 (2000DIB50177)

收稿日期: 2006-02-06; 修订日期: 2006-11-25

作者简介: 杨德国 (1964~) 男, 湖北省公安县人, 研究员, 主要从事鱼类生态学和保护生物学研究. E-mail: yangdg@yfi.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

Foundation item : The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30490231); Key Project of Yangtze River Three Gorges Development Company of China (No. SX96-1/HB, SX971-25/HB); Special Fund of the Social Public Welfare of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2000DIB50177)

Received date 2006-02-06; **Accepted date** 2006-11-25

Biography : YANG De-Guo, Professor, mainly engaged in fish ecology and conservation biology. E-mail: yangdg@yfi.ac.cn

were located along an about 600 km long river section reaching from the lower reaches of the Jinshajiang River to the upper reaches of the Yangtze River. As a result of the construction of the Gezhouba Hydroelectric Dam was built in 1981 , the upstream spawning migration route was blocked by the Dam. Successful natural reproduction , however , has been observed in small areas below the dam since 1982. Some biologists held that there was a certain relationship between the spawning of Chinese sturgeon (CS) and the hydrology as well as the substrate types of the river bottom. In total , spawning runs of the CS were observed 37 times between 1983 and 2004. Five hydrological factors (water temperature , water level , flow discharge , silt content and current velocity) were monitored on a daily basis at the spawning ground between October and November for 22 years (1983 to 2004). The current velocity on the spawning ground at the river bottom was measured while CS were spawning during 4 years (1996 to 1999). The authors analyzed the relationship between five hydrological factors and the respective spawning runs. The results showed that mean current velocity during October and November and the resulting mean silt content in the sediment in November in the reach of spawning ground were significant differences ($P < 0.001$) from those immediately after the construction of the Gezhouba Dam. However , monthly mean water level , flow discharge and water temperature had no obvious effects on the bottom conditions. The 22-years of observations indicate that the daily mean values of all of the 5 hydrological factors fluctuated within a certain range while CS were spawning. It is concluded that the optimal values for the hydrological factors during the spawning run are 18.0 to 20.0℃ for temperature , 14100 m³/s discharge volume , a water level of 42.0 to 45.0m above sea level , and a silt content in the water of 0.2 to 0.3 kg/m³ while the current speed above the bottom to stimulate the fish to spawn should be between 1.0 to 1.7m/s. The optimal water temperature might provide an essential pre-condition for the other factors becoming a valid trigger for spawning. As water temperature arrive approaches the optimal values and most of the other parameters are at the brink to deviate from their optimal range values (water level , current velocity , silt content in the water) , CS would begin to spawn. By 2009 , when the Yangtze Three Gorges Project , which is located 45 km upstream the Gezhouba Dam , is completed and begins to operate normally , changes in the downstream water temperature are expected and these may have a negative effect on the gonad development and the stimulation of spawning of CS , however , the anticipated decline of silt content in the water may be considered as favourable for the performance of the spawning site.

Key Words : *Acipenser sinensis* spawning ; hydrological condition ; hydroelectric dam ; Yangtze River

中华鲟 (*Acipenser sinensis* Gray)是一种江海洄游的溯河产卵鱼类 ,葛洲坝水利枢纽截流前 ,中华鲟的产卵场分布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]。1981 年葛洲坝水利枢纽截流后 ,中华鲟的生殖洄游通道被隔断 ,生殖群体被大坝阻隔在坝下。1982 年 ,人们发现被阻隔在坝下的中华鲟能够进行自然繁殖 ,并初步确定其产卵场分布在葛洲坝坝下至古老背约 30km 的江段^[2~5]。1995 年以后 ,危起伟等采用超声波遥测追踪技术 ,进一步确定了葛洲坝下中华鲟产卵场位置 ,其具体范围从葛洲坝大江电厂距离大坝约 860m 开始至胭脂坝上游约 1.5km 处的长江主河道 ,长约 7km^[6~8]①。

鱼类的产卵活动与其特定产卵场的环境尤其水文状况有较密切的关系 ,如我国的青、草、鲢、鳙的自然繁殖就对水温、水流以及水位等有一定的要求^[9]。关于鲟鱼类如大西洋鲟、短吻鲟、湖鲟等种类自然产卵时的水文状况 ,国外也有报道^[10~12]。葛洲坝截流前 ,我国有学者曾对原金沙江三块石、偏岩子、金堆子等产卵场的水文状况进行过描述 ,并认为水温决定着中华鲟产卵季节的上限和下限 ,水位、含沙量及流速则决定产卵的具体日期^[1] ,但也有学者认为 ,刺激中华鲟产卵的外界因素不是水文条件的变化 ,而是产卵场河床的底质类型②。查清中华鲟产卵时的水文状况参数以及产卵与水文因子变化的关系 ,是今后加强中华鲟产卵场保护 ,

① 危起伟 2003 年 ,中华鲟繁殖行为生态学与资源评估 ,中国科学院研究生院博士论文
② 常剑波 ,1999 年 ,长江中华鲟繁殖群体结构特征和数量变动趋势研究 ,中国科学院研究生院博士论文

实施产卵场改良工程等中华鲟保护措施的必要基础。葛洲坝截流以后,作者每年都对葛洲坝下中华鲟的产卵活动进行了监测,在 1983 ~ 2004 年的 22a 间共监测到 37 批次中华鲟产卵活动,并记录了产卵发生的具体时间,在定位了产卵场的具体位置后(1996 年以后),部分年份在中华鲟产卵时还在其产卵交配的江段进行了现场流速测量。本文对中华鲟繁殖季节葛洲坝下中华鲟产卵场的水文状况及其变化情况进行了研究。

1 研究方法

研究的地点位于长江宜昌葛洲坝水利枢纽下游约 7km 的江段(图 1)。研究的水文因子包括水位、流速、流量、含沙量和水温。

研究使用的相关水文因子数据有两个来源。其中,各年 10 ~ 11 月(中华鲟繁殖期)逐日平均水位、流量、流速、含沙量和水温数据主要为长江水利委员会宜昌水文站历年的水文监测数据,由宜昌水文站提供,其具体监测断面位于长江宜昌磨基山江段,正处于中华鲟产卵场范围内(图 1 C 处)。产卵场底层流速数据则是 1996 ~ 1999 年中华鲟产卵时,在中华鲟交配区现场实时测量获得。具体测量方法是:每年中华鲟产卵前,采用声纳标志牌标志放流 10 尾左右成熟亲鲟并跟踪,同时解剖中华鲟敌害鱼类,监测中华鲟产卵情况。当发现中华鲟产卵时,即跟踪定位携带有声纳发射器的标志亲鲟位点,并在该位点测量流速,同时在该位点设置采卵网。测量仪器为 Marsh-McBirney 公司生产的 2000 型便携式

电子流速仪(附 30m 水下电缆,测量范围 $-0.15 \sim 6.0\text{m/s}$,稳定性 0.015m/sec ,精度为 2% 读数),测量时将电子感应头固定,由重 15 kg 的铅鱼用水文绞车降至水下,从水面以下 1m 开始读数,每隔 2m 测量记录一次,直至离底约 0.5m 结束,同时记录测量点地理坐标及水深。1996 ~ 1999 年期间共进行 5 批次产卵流速实时测量。

研究数据的统计和分析采用 SPSS12 版软件进行。

2 结果

2.1 葛洲坝截流前后中华鲟产卵季节产卵场江段的水文状况及其变化

葛洲坝水利枢纽于 1981 年 1 月 4 日实现大江截流,5 月 23 日关闸蓄水。根据宜昌水文站逐日水文数据,分别对 1977 ~ 1980 年和 1981 ~ 2000 年 10 ~ 11 月宜昌中华鲟产卵场江段的月平均水位、流速、含沙量、流量、水温分阶段进行了统计和分析(表 1)。

结果表明,葛洲坝截流后,宜昌中华鲟产卵场江段 10 ~ 11 月的月平均水位、流速和含沙量比截流前有下降,月平均流量有所增加,而月平均水温的变化不明显。但差异显著性检验结果表明,除了截流前后历年 10 ~ 11 月份的月平均流速和 11 月份的月平均含沙量差异极显著($P < 0.001$)外,其它各项差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 葛洲坝下中华鲟产卵时的水文状况

1983 ~ 2004 年期间,在宜昌中华鲟产卵场共监测到 37 批次中华鲟产卵活动,并实地测量或收集了产卵当日的水位、流速、流量、含沙量和水温数据(其中无 2001 ~ 2004 年 6 批次产卵时流速和含沙量数据),经统计分析得到中华鲟产卵时 5 种水文因子的变动范围和平均值(表 2)。

2.2.1 水温

中华鲟产卵时的水温变动在 $16.1 \sim 20.6^{\circ}\text{C}$ 之间,变化幅度为 4.5°C ,多次产卵平均水温为 18.6°C ,出现次

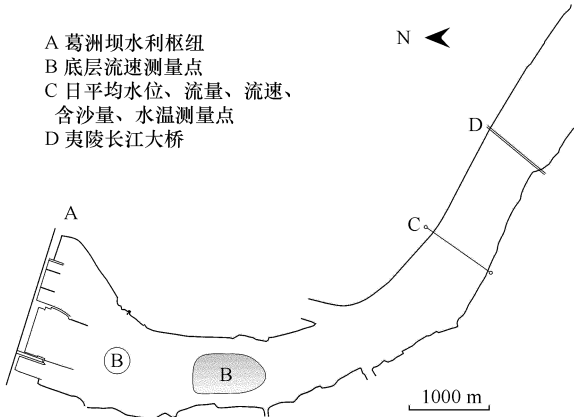


图 1 产卵场位置及测量点

Fig. 1 Spawning ground of Chinese sturgeon and sampling sites
A: Gezhouba Dam; B: Sampling sites of velocity of bottom; C: Sampling sites for average per day of hydrological factor; D: Yiling Yangtze River Bridge; B-D: The area of spawning ground of Chinese sturgeon

数最多 (众数)的水温是 18.0℃。中华鲟产卵时的水温变化范围相对较小 ,37 次产卵中有 32 次产卵时水温在 17.0 ~ 20.0℃ 的范围内 ,占了总次数的 86.5% ,仅有 5 次产卵水温溢出该范围 (2 次低于 17.0℃ ,3 次高于 20.0℃)。产卵水温在 18.0 ~ 20.0℃ 范围内的次数仍达 26 次 ,仍占总数的 70.3%。

表 1 葛洲坝截流前后宜昌中华鲟产卵场江段 10 ~ 11 月份水文状况

Table 1 Hydrological condition of spawning ground of Chinese Sturgeon in Yichang city before and after the closure of Gezhouba dam in October and November

因子 Factor	时期 * Time	10 月 October		11 月 Novembe		n
		范围 Range	平均值 ± 标准差 mean ± SD	范围 Range	平均值 ± 标准差 mean ± SD	
水位 (m)	截流前	44.57 ~ 48.30	46.28 ± 1.61	42.43 ~ 43.66	43.11 ± 0.52	4
Water level	截流后	43.37 ~ 46.77	45.38 ± 0.95	44.13 ~ 40.69	42.54 ± 0.84	20
流量 (m³/s)	截流前	8060 ~ 25400	14577 ± 7886	5130 ~ 10900	7893 ± 2980	4
Flow discharge	截流后	12816 ~ 32700	17981 ± 4949	7153 ~ 12766	9874 ± 1776	14
流速 (m/s)	截流前	1.69 ~ 2.11	1.89 ± 0.18	1.37 ~ 1.52	1.45 ± 0.07	4
Flow velocity	截流后	1.34 ~ 1.78	1.51 ± 0.13	0.83 ~ 1.31	1.05 ± 0.13	20
含沙量 (kg/m³)	截流前	0.49 ~ 0.89	0.66 ± 0.17	0.30 ~ 0.67	0.48 ± 0.15	4
Sediment concentration	截流后	0.33 ~ 0.92	0.61 ± 0.14	0.11 ~ 0.41	0.24 ± 0.09	20
温度 (℃)	截流前	19.30 ~ 20.20	19.75 ± 0.42	16.10 ~ 16.90	16.43 ± 0.39	4
Water temperature	截流后	18.85 ~ 20.13	19.31 ± 0.47	15.30 ~ 17.04	16.39 ± 0.62	10

* 截流前 Pre-closure of Gezhouba Dam ;截流后 Post closure of Gezhouba Dam

表 2 中华鲟产卵日产卵场江段主要水文因子参数

Table 2 Main hydrological factors of spawning ground during spawning of Chinese Sturgeon

项目 Item	水温 (℃) Water temperature	水位 (m) Water level	流量 (m³/s) Flow discharge	含沙量 (kg/m³) Sediment concentration	流速 (m/s) Flow velocity
变动范围 Rang	16.10 ~ 20.60	40.69 ~ 47.32	7170 ~ 26000	0.10 ~ 1.32	0.81 ~ 1.98
平均值 ± SD mean ± SD	18.63 ± 1.10	43.91 ± 1.72	13908 ± 4595	0.46 ± 0.30	1.30 ± 0.27
变异系数 (%) CV	5.9	3.9	33.0	65.2	20.8
N	37	37	37	31	31

在大多数年份 ,中华鲟每个繁殖季节会分两批次产卵 ,如 1983 ~ 2004 年的 22a 期间就有 15 个年份是两批次产卵。当有 2 次产卵活动时 ,第 1 次产卵时的水温明显高于第 2 次。其中第 1 次产卵时的水温变动在 17.2 ~ 20.6℃ 之间 ,平均值为 19.3℃ ;而第 2 次产卵时的水温变动幅度是 16.1 ~ 19.6℃ ,平均值为 17.9℃。

2.2.2 水位

1983 ~ 2002 年期间 ,在中华鲟自然产卵当日 ,长江宜昌江段的水位变动在 40.69 ~ 47.32m 之间 ,产卵最高水位和最低水位相差 6.63m ,水位的平均值为 44.01m ,中值为 44.00m ,众数值为 44.24m。

当一年出现两次产卵时 ,两次产卵的水位有显著差异 ,第 1 次产卵的水位明显高于第 2 次。根据调查期间 15 个出现 2 次产卵年份的数据 ,各次产卵的水位平均值分别为 44.78m 和 43.17m ,相差 1.61m ,而且各次产卵水位的变化幅度均较大 ,其中第 1 次产卵时水位变动在 42.00 ~ 47.32m ,第 2 次产卵时为 40.69 ~ 45.92m ,分别相差 5.32m 和 5.23m ,其差值较为接近。

2.2.3 流量

根据 1983 ~ 2004 年期间 37 次产卵记录的流量数据 ,中华鲟产卵时宜昌江段日平均流量为 13908 m³/s ,众数为 14100 m³/s ,变化幅度 7170 ~ 26000m³/s。对一年产卵 2 次时的流量数据统计结果为 ,第 1 次产卵的平均流量为 16507 m³/s ,众数值为 16087 m³/s ,变化幅度为 10125 ~ 26000 m³/s ,差值达 15875 m³/s ;第 2 次产卵

的平均流量为 11811 m³/s ,众数值为 12300 m³/s ,变化幅度为 7170 ~ 18100 m³/s ,差值为 10930 m³/s。

2.2.4 含沙量

中华鲟产卵时江水含沙量的平均值是 0.46 kg/m³ ,中值为 0.33 kg/m³ ,众数为 0.28 kg/m³ ,含沙量的变化范围为 0.10 ~ 1.32kg/m³。在一年产两次卵的年份 ,江水含沙量的平均值在第 1 次产卵时为 0.63 kg/m³ ,变化幅度 0.28 ~ 1.32 kg/m³ ,而第 2 次产卵时仅 0.30 kg/m³ ,变化幅度 0.10 ~ 0.65 kg/m³。根据 13 个年份 26 次产卵的统计结果 ,一年两次产卵时 ,第 1 次和第 2 次产卵时的江水含沙量差值变化幅度也较大 ,为 0 ~ 1.02 kg/m³。结果还显示 ,在 1983 ~ 2000 年记录的 31 次中华鲟产卵中 ,有 15 次产卵时的含沙量在 0.2 ~ 0.3 kg/m³ 范围内。

2.2.5 流速

根据 1983 ~ 2000 年宜昌水文站逐日流速资料和该期间记录的 31 次中华鲟产卵日期 ,统计得到中华鲟产卵当日该江段平均流速为 1.30m/s ,众数为 1.26m/s ,变动幅度为 0.81 ~ 1.98m/s ,其中中华鲟产卵时流速在 1.00 ~ 1.66m/s 之间的次数占了总数的 81%。

而根据 1996 ~ 1999 年期间 5 次中华鲟产卵流速实地测量共 48 组分层流速数据 ,中华鲟产卵时 ,产卵场江段水体表层的流速一般大于底层。总体来看 ,其平均流速水体表层为 2.00m/s ,底层为 1.42m/s ,流速的变化范围 ,表层为 0.66 ~ 3.20m/s ,底层为 0.64 ~ 2.36m/s。单独对每批产卵时测量的流速数据进行分析 ,也显示出相似的结果 ,即每次产卵 ,水体表层流速均大于底层流速。同时还发现 ,各批次表层流速平均值的变动幅度较大 ,在 1.37 ~ 2.98m/s 之间 ,而底层流速平均值变动幅度相对要小得多 ,在 1.07 ~ 1.65m/s 之间 (表 3)。

表 3 1996 ~ 1999 年中华鲟产卵流速实地测量值						
Table 3 Flow velocity of spawning ground of Chinese Sturgeon from 1996 to 1999						
项目 Item	表层流速 (m/s) Flow velocity of upper layer		底层流速 (m/s) Flow velocity of bottom layer		测量点水深 (m) Water depth	
	平均值 Mean	变幅 Range	平均值 Mean	变幅 Range	平均值 Mean	变幅 Range
1996 (I)	1.37	0.66 ~ 2.28	1.19	0.68 ~ 1.99	13.2	5 ~ 25
1996 (II)	2.98	2.73 ~ 3.20	1.53	1.11 ~ 2.03	11.5	5 ~ 20
1997	1.45	1.34 ~ 1.50	1.07	0.64 ~ 1.38	12.3	5 ~ 16
1998	1.93	1.64 ~ 2.84	1.65	1.16 ~ 2.25	9.5	7 ~ 16
1999	2.47	2.20 ~ 2.90	1.61	1.03 ~ 2.36	18.5	16 ~ 24

3 讨论和结论

3.1 葛洲坝下中华鲟自然产卵繁殖的适宜水文因子参数

1981 年葛洲坝水利枢纽截流 ,1982 年在葛洲坝下发现中华鲟的自然繁殖^[2] ,以后每年均在该江段监测到中华鲟的产卵活动 ,表明葛洲坝下存在满足中华鲟自然产卵所需要的环境和生态条件。根据本研究的结果 ,适宜于中华鲟产卵的几种主要水文因子可能都有一定的域值范围。其中水温的域值范围是 15.3 ~ 20.5℃ ,而较适宜的产卵水温是 17.0 ~ 20.0℃ ,尤其以 18.0 ~ 20.0℃ 为最佳。目前监测到的产卵流量变动范围是 7170 ~ 26000m³/s ,较适宜的流量是 14100 m³/s。中华鲟产卵时江水水位的变化幅度相对较小 ,为 40.7 ~ 47.3m。根据中华鲟产卵日前后江水水位的变化情况

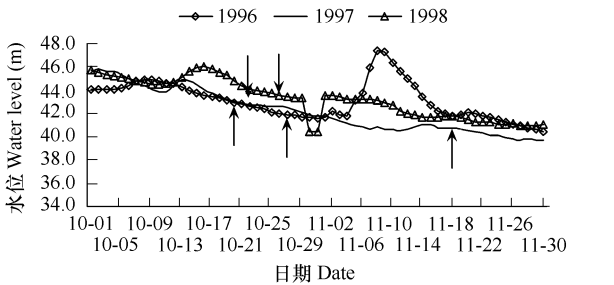


图 2 中华鲟产卵与水位的关系

Fig. 2 The relationship between spawning of Chinese sturgeon and water level

——> : 产卵日 Date of Chinese sturgeon spawning

(图 2) ,发现中华鲟产卵活动基本发生在水位逐渐下降 ,也即江水 “涨水 ”后的 “退水 ”阶段 ,而当水位处于

42.0 ~ 45.0 m 时产卵的机率较大。

虽然中华鲟产卵时江水含沙量的变化范围较大 ($0.10 \sim 1.32 \text{ kg/m}^3$), 但作者对那些同一产卵季节中发生两次产卵活动年份的含沙量数据, 分产卵批次 (第 1 次和第 2 次) 分别进行频次统计分析, 结果显示, 中华鲟首次产卵时江水含沙量值呈现出两个较集中的分布区段, 其具体数值分别在 0.25 kg/m^3 和 0.65 kg/m^3 附近; 而第 2 次产卵时江水的含沙量仅有 1 个集中分布, 其具体数值为 0.25 kg/m^3 , 统计结果还显示, 中华鲟首次产卵时和第 2 次产卵时江水含沙量的众数值相当吻合, 分别为 0.28 kg/m^3 和 0.22 kg/m^3 , 说明中华鲟更适应在较低的含沙量环境产卵, 目前得到的参数在 $0.2 \sim 0.3 \text{ kg/m}^3$ 之间。

根据在交配区实测的流速数据, 其底层流速变化范围是 $0.64 \sim 2.36 \text{ m/s}$, 各产卵批次底层平均流速为 $1.07 \sim 1.65 \text{ m/s}$, 而根据宜昌水文站的常年监测数据, 中华鲟产卵日产卵场江段的流速变动范围在 $0.81 \sim 1.98 \text{ m/s}$, 其中中华鲟产卵时流速在 $1.00 \sim 1.66 \text{ m/s}$ 之间的次数占了总数的 81%, 这一结果与实际测量的底层流速平均值变动幅度相当吻合, 说明此流速范围较适宜中华鲟产卵繁殖。

3.2 水文因子与中华鲟产卵繁殖的关系

许多鱼类的产卵活动与其产卵场水域的水文状况有密切的联系。如我国重要经济鱼类青、草、鲢、鳙产卵繁殖活动的发生就与一定的水温, 伴随涨水过程出现的水位升高、流量加大、流速加快、透明度减小以及流态紊乱等一系列水文要素有关^[9]。当水温达到 17°C 以上后, 涨水或退水也是长江铜鱼及园口铜鱼产卵发生的主要刺激因子^[13]。但影响鲟鱼类产卵繁殖的水文因子有哪些? 不同因子在鲟鱼产卵繁殖中的作用如何, 目前还存在较大争议。国外一些学者认为, 河床具有卵石或岩石底质以及水底一定的流速是影响鲟鱼产卵的 2 个最重要的物理因子^[11, 12]。对中华鲟自然产卵的生态条件, 我国学者也有不同看法, 有人认为水温决定了中华鲟产卵季节的时限, 水位、含沙量及流速决定产卵的具体日期^[1], 但也有学者认为河床底质类型是决定中华鲟产卵的主要因素^①。

本研究表明, 中华鲟自然产卵时江水的水温、水位、流量、流速和含沙量均有一定的变化幅度, 但根据各水文因子平均值的变异系数 (参见表 2), 不同因子的变化幅度有一定的差异, 其中水温和水位因子的变异系数相对较小, 即变化幅度较小, 而流量、流速和含沙量的变异系数较大, 变化幅度也较大。

中华鲟产卵繁殖需要一定的水温范围, 是其对自然环境长期适应和进化的结果。鱼类是变温动物, 自身没有调控体温的机制, 水温影响着其全部的生理过程, 因此鱼类的产卵繁殖都是在一定的温度范围内完成的。对鲟鱼类, 根据其种类、分布以及产卵季节的不同, 其产卵的水温以及变化范围也有较大的差异, 如西伯利亚鲟在 $9 \sim 18^\circ\text{C}$ 的水温时都可以产卵, 大西洋鲟在 St. Lawrence 河的产卵水温是 $14.5 \sim 23.4^\circ\text{C}$, 而在 Delaware 河的产卵水温则为 $13.3 \sim 17.8^\circ\text{C}$ ^[14]。在原长江上游和金沙江中华鲟产卵场的调查中, 记录了 18 次中华鲟产卵活动, 其中有 17 次产卵的水温变动在 $17.0 \sim 20.2^\circ\text{C}$ 之间, 另有 1 次产卵的水温为 15.2°C , 但产卵规模很小^[1]。本研究得到的葛洲坝截流后坝下中华鲟自然产卵时的水温范围是 $16.1 \sim 20.6^\circ\text{C}$, 结果相当吻合。迄今为止, 尚未发现中华鲟在水温低于 15.0°C 或高于 21.0°C 时自然产卵的记录, 相对于其它鲟鱼种类, 适宜产卵的温度范围较狭窄。因此, 具备适宜的水温是中华鲟产卵繁殖的先决条件。

对葛洲坝下中华鲟产卵场流速的测量及分析结果表明, 与其它鲟鱼类比较, 中华鲟产卵繁殖可能要求较高的底层流速^[10, 12, 15-17]。如湖鲟产卵的流速是 $0.35 \sim 0.73 \text{ m/s}$, 短吻鲟和匙吻鲟则是 $0.3 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 。Kynard 等^②通过试验获得的短吻鲟的最适宜产卵流速是 $0.5 \sim 0.7 \text{ m/s}$ 。而实测得到中华鲟产卵的底层流速变幅为 $0.64 \sim 2.36 \text{ m/s}$, 显示出其产卵时有较大的流速要求, 这可能与中华鲟特有的生殖生物学特点有关。与其它鲟鱼类比较, 中华鲟成熟卵的卵径最大, 达 $4.0 \sim 5.0 \text{ mm}$ 。中华鲟的卵为沉性, 具有较大的比重和黏性, 雌鲟

① 常剑波, 1999 年, 长江中华鲟繁殖群体结构特征和数量变动趋势研究, 中国科学院研究生院博士论文

② Boyd Kynard, Don Pugh, Micah Kieffer, et al.; 2003; Spawning of Shortnose Sturgeon in an Artificial Stream: Adult Behavior and Rearing and Dispersal of Early Life Stages; Submitted to American Fisheries Society Monograph on Connecticut River Shortnose Sturgeon. (personal communication)

产卵后,卵子进入水体时需要较高的水底流速才能将卵托起和冲散,有利于精子与卵子的混和和授精,提高受精率;同时较大的流速也有利于受精卵及时向下游卵石河床的散播,使受精卵在孵化场的分布相对分散和均匀,减少了受精卵相互粘结成团的机会,并有利于降低敌害鱼类摄食受精卵的几率,提高孵化率。

江水含沙量与中华鲟产卵的关系有两个特征:①中华鲟产卵的含沙量范围(根据现有监测数据是 $0.10 \sim 1.32 \text{ kg/m}^3$)较大,但较低的含沙量($0.2 \sim 0.3 \text{ kg/m}^3$)更适于中华鲟产卵;②根据作者对多年中华鲟繁殖期间(10~11月份)江水含沙量的逐日变化趋势分析结果,发现一般在每次中华鲟产卵发生前,江水含沙量均有一个较明显的下降过程,而亲鲟产卵基本都在江水含沙量较为稳定时才进行。

江、河水体的水位、流速、流量和含沙量等水文因子之间具有一定的内在联系。在这些因子中,起主导作用的应是上游的来水量即流量大小,而水位和流速的变化还与所在江段的过水断面大小有关。在某一特定江段,随着流量的加大,相应的就伴随着水位、含沙量的上升和流速的增加。中华鲟在流量、水位和含沙量逐渐下降时产卵的现象恰当的反映了它们的内在联系。在水温适宜的情况下,当产卵场江段的水位、流速和含沙量出现符合引发中华鲟产卵的变动趋势(从某一高位逐渐下降),而且各水文要素值均达到其适宜范围时,中华鲟即产卵繁殖。

4.3 水利工程建设引发水文因子变化可能对中华鲟产卵活动的影响

水利工程建设不可避免的将改变河流的水文状况及时空分布格局。如前所述,葛洲坝截流后,中华鲟繁殖季节宜昌产卵场江段的水文状况,除流速及11月份含沙量有较大变化外,其它水文因子变化不明显,这与葛洲坝枢纽属于径流式电站、蓄水量有限有关。虽然葛洲坝枢纽的运行对中华鲟产卵季节产卵场的流速和含沙量产生了一些影响,但由于影响的程度尚未超出中华鲟产卵的适宜范围,因此中华鲟仍然可以产卵,这已为葛洲坝截流以来逐年的监测结果所证实。三峡工程蓄水运行后,由于三峡水库巨大的调蓄作用,其下游的水文状况及时空分布节律都将发生较大的变化。其中江水含沙量下降可能对中华鲟的自然繁殖较为有利,而水温的变化及其对中华鲟自然繁殖的影响则较为复杂。对于长江这类大型河流,因其水体具有较强的流动性,水体的水温主要受流域气候变化及来水水温的影响,当没有外界(如气候变暖)及人为因素(如修建水库产生的水温变化)的干扰时,其水温一般随季节而呈规律性的变化。三峡工程运行后,由于水库水温的分层现象,将改变其下游一定江段范围的水温变化规律,即春季和夏季水温较运行前下降,而秋冬季水温则会有所上升。这种改变有可能从两个方面对中华鲟自然产卵产生影响:①积温变化对亲鲟的性腺发育产生影响,鱼类的性腺发育成熟一般需要较恒定的积温,中华鲟性腺发育的关键期,即性腺从III期至IV期的发育过程,进入长江以后才开始,在产卵前约1a内完成,葛洲坝截流后,该期间中华鲟亲鲟主要栖息在长江葛洲坝以下至湖北石首江段水域,正处于水温变化的影响区段。如果水温变化的幅度过大,则有可能导致中华鲟性腺发育期的积温超出其适宜范围,从而使中华鲟性腺发育进程减慢甚至不能发育成熟,对此需要进行长期的跟踪观察。②中华鲟产卵季节水温变化对产卵活动的直接影响;三峡工程运行后,有可能增加产卵适宜水温与其它水文因子如流速、水位(水深)以及性腺发育进程的匹配难度,中华鲟产卵需要的生物学、生态水力学条件难以同时满足,对此应给予高度关注。

References:

- [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] Yu Z T, Xu W X, Deng Z L. Study on reproductive ecology of Zhonghua Strugeon (*Acipenser sinensis* Gray) in the downstreams of Gezhouba hydroelectric project. Transactions of the Chinese ichthyological society. Beijing: Science Press, 1986. 1—14.
- [3] Hu D G, Ke F E, Zhang G L. Primary survey on spawning of Chinese Sturgeon in the downstreams of Gezhouba hydroelectric project. Freshwater Fisheries, 1983, (3): 15—18.
- [4] Hu D G, Ke F E, Zhang G L. The second survey on the spawning ground of Chinese Sturgeon in the downstreams of Gezhouba hydroelectric project. Freshwater Fisheries, 1985, (3): 22—24.
- [5] Hu D G, Ke F E, Zhang G L. Research on the spawning ground of Chinese Sturgeon in the downstreams of Gezhouba hydroelectric project.

Freshwater Fisheries , 1992 , (5) : 6 — 10.

[6] Wei Q W , Yang D G , Ke F E , Kynard B , Kieffer M. Technique of ultrasonic telemetry for Chinese Sturgeon , *Acipenser sinensis* , in Yangtze River. Journal of Fisheries of China , 1998 , 22 (3) : 211 — 217.

[7] 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.

[8] 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. Appl. Ichthyol. 2006 , 22 (suppl. 1) : 145 — 151.

[9] Liu L H , Wu G X C W X , *et al.* Studies on the ecological effect on spawning of the Black carp , the Grass carp , the Silver carp and the Bighead carp in the Changjiang river after the constructions of the Gezhouba hydroelectric project. Acta Hydrobiologica Sinica , 1986 , 10 (4) : 353 — 364.

[10] Buckley J , Kynard B. Habitat use and behavior of pre-spawning and spawning shortnose sturgeon , *Acipenser brevirostrum* , in the Connecticut River. In North American Sturgeon : biology and aquaculture potential , (eds Frederick P. Binkowski and S. I. Doroshov) , 1985. 111 — 117. Boston.

[11] Bemis W E , Kynard B. Sturgeon rivers : an introduction to acipenseriform biogeography and life history. Environmental Biology of Fishes , 1997 , 48 (1 — 4) : 167.

[12] Caswell N M , Peterson D L , Manny B A , *et al.* Spawning by lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) in the Detroit River. J. Appl. Ichthyol. , 2004 , 20 (1) : 1 — 6.

[13] Liu L H , Wu G X , Wang Z L. Reproduction ecology of *Coreius heterodon* and *Coreius guichenoti* in the mainstream of the Changjiang River after the constructions of Gezhouba Dam. Acta Hydrobiologica Sinica , 1990 , 14 (3) : 205 — 215.

[14] Vecsei P , Litvak M K , Noakes D L G , *et al.* A Noninvasive Technique for Determining Sex of Live Adult North American Sturgeons. Environmental Biology of Fishes 2003 , 68 (4) : 333.

[15] Kynard B , Suci R , Horgan M. Migration and habitats of diadromous Danube River sturgeon in Romania : 1998 — 2000. J. Appl. Ichthyol. , 2002 , 18 : 529 — 535.

[16] Kieffer M , Kynard B. Spawning of shortnose sturgeon in the Merrimack River , Massachusetts. Trans. Amer. Fish. Soc. , 1996 , 125 : 179 — 186.

[17] Curtis G L , Ramsey J S , Scarnecchia D L. Habitat use and movements of shovelnose sturgeon in Pool 13 of the upper Mississippi River during extreme low flow conditions. Environmental Biology of Fishes , 1997 , 50 (2) : 175.

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：四川省科学技术出版社，1988. 284.

[2] 余志堂，许蕴旰，邓中彝. 葛洲坝水利枢纽下游中华鲟繁殖生态的研究. 鱼类学论文集. 北京：科学出版社，1986. 1 ~ 14.

[3] 胡德高，柯福恩，张国良. 葛洲坝下中华鲟产卵情况初步调查及探讨. 淡水渔业，1983，(3) : 15 ~ 18.

[4] 胡德高，柯福恩，张国良，等. 葛洲坝下中华鲟产卵场第二次调查. 淡水渔业，1985，(3) : 22 ~ 24.

[5] 胡德高，柯福恩，张国良，等. 葛洲坝下中华鲟产卵场调查研究. 淡水渔业，1992，(5) : 6 ~ 10.

[6] 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.

[9] 刘乐和，吴国犀，曹维孝，等. 葛洲坝水利枢纽兴建后对青、草、鲢、鳙繁殖生态效应的研究. 水生生物学报，1986，10 (4) : 353 ~ 364.

[13] 刘乐和，吴国犀，王志玲. 葛洲坝水利枢纽兴建后长江干流铜鱼和园口铜鱼的繁殖生态. 水生生物学报，1990，14 (3) : 205 ~ 215.