葛洲坝下游中华鲟（*Acipenser sinensis*）产卵场地形分析

张 辉[1,2]，危起伟[1,2,3,*]，杨德国[1,3]，杜 浩[1,3]，张慧杰[1,2]，陈细华[1,3]

（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，荆州 434000；
2. 华中农业大学水产学院，武汉 430070；3. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心，无锡 214081）

摘要：根据 1981 年葛洲坝截流至 1998 年对葛洲坝坝下河床研究的历史资料，结合 1999～2006 年间获得的中华鲟产卵场所在江段河床的 5 次地形数据，采用 ArcGIS 9.0 软件，对中华鲟产卵场河床的高程、坡度、坡向等地形因子进行了详细分析。结果表明：葛洲坝至磨基山江段中华鲟产卵场与历史产卵场相比具有极其相似的特征，临江溪至虎牙滩江段中华鲟自然繁殖频率不高可能主要是因为地形不符合要求，从而造成相关的水文因子也不能满足需要。中华鲟自然繁殖前期的迁徙分布和产卵后受精卵的散播与河床地形都有一定的关系，葛洲坝水利枢纽下游河势调整工程较大地改变了葛洲坝至庙咀江段河床的地形，地形复杂度的增加可能对中华鲟自然繁殖前期的栖息有利，而河床坡度、底质的改变则可能会对中华鲟受精卵的散播和发育产生不利影响。有必要结合中华鲟历史产卵场精确的地形数据，对“中华鲟产卵场功能分区模型假说”进行验证，并针对产卵场地形对中华鲟自然繁殖的影响，做出进一步探讨。

关键词：中华鲟；产卵场；地形

文章编号：1000-0933（2007）10-3945-11 **中图分类号**：Q178.1，Q958.12 **文献标识码**：A

Topography research on spawning grounds of *Acipenser sinensis* below Gezhouba Dam

ZHANG Hui[1,2], WEI Qi-Wei[1,2,3,*], YANG De-Guo[1,3], DU Hao[1,3], ZHANG Hui-Jie[1,2], CHEN Xi-Hua[1,3]

1 *The Key Laboratory of Freshwater Fish Germplasm Resources and Biotechnology, Ministry of Agriculture, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Jingzhou* 434000, *China*

2 *College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*

3 *Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fisheries Science, Wuxi* 214081, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(0): 3945～3955.**

Abstract: Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* Gray, an anadromous fish, mainly distributes in the mainstream of Yangtze River, the continental shelf of East China Sea and Yellow Sea. Historical spawning grounds of *A. sinensis* were in the upper Yangtze and the lower Jingsha River, covering a stretch of at least 600 km of river length. After the damming of Yangtze River by the Gezhouba Dam in January 1981, the spawning grounds for *A. sinensis* were no longer accessible and fish

基金项目：国家自然科学基金重大资助项目（30490231）；国家社会公益研究专项资助项目（2000DIB50177，2004DIB3J099）；国家基础性工作重点专项（2002DEA1004）；湖北省水产办资助项目（20060102）

收稿日期：2006-08-18；**修订日期**：2007-02-12

作者简介：张辉（1982～），男，湖北荆门人，博士生，主要从事生态 GIS 研究. E-mail：dingo-zh@163.com

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

Foundation item: The project was financially supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (No. 30490231), the National Special Research Foundation for the Commonweal of Society of China (No. 2000DIB50177, 2004DIB3J099), the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (No. 2002DEA1004) and the Foundation of Fishery Office of Hubei Province (No. 20060102)

Received date: 2006-08-18; **Accepted date**: 2007-02-12

Biography: ZHANG Hui, Ph. D. candidate, mainly engaged in ecology and GIS. E-mail: dingo-zh@163.com

alternatively spawned within a 30 km section below the Gezhouba Dam. Moreover, only one regular spawning ground has been found in the downstream area of the Dam. It is in a narrow portion within a 7 km length, just below the dam. A minor spawning ground was also found at Huyatan, around 15 km below the dam. The present attempts to estimate stock size of *A. sinensis* suggest that the major source of recruitment from a complementary colony is still obtained through natural reproduction. *A. sinensis* requires a certain water temperature, moderate bottom velocity, and special riverbed topography to spawn successfully. Due to the restriction of experimental instruments and methods, the research on the topography of spawning grounds is a first attempt to tentatively characterize the area in terms of fine-scale bottom profile and structure.

Based on measurements taken during five surveys between 1999 and 2006, we analyzed the river bed morphology by assessing the elevation, slopes, and the bottom "roughness" of the spawning grounds by ArcGIS 9.0. The terrain of the riverbed was simulated by Inverse Distance Weighted scheme with an 8.0 m of grid size. The results showed that the roughness in regularly used alternative spawning site directly at the dam and the minor spawning ground further downstream are 1.74×10^{-3} and 0.36×10^{-3}, respectively. Moreover, the slope of area between Gezhouba Dam and Moji Hill is much bigger than that between the Linjiang Stream and Huyatan. The average and standard deviation of length of elevations at the upstream and downstream spawning sites are 32.35 ± 2.18 m and 30.14 ± 3.85 m, respectively. Taking the average water level for spawning between 1983 and 2002 as a standard, the average water depth on the upstream and downstream spawning sites were 11.66 m and 13.87 m, respectively. These depths may be the optimal water depth for *A. sinensis* to spawn under the given hydrodynamic regime in the Yangtze River.

Four views are considered in this article. (1) The topographical characteristics of the spawning ground which locates in the reaches between the Gezhouba Dam and the Shilihong are very similar to those on the historical spawning grounds. The natural reproduction of *A. sinensis* rarely occurs in the reach between the Linjiang Stream and Huyatan, and it is postulated that the major reason is to be found in the unsuitable terrain, which makes the hydrological regime and hydraulic conditions not suitable to trigger spawning activity. (2) The topography of the spawning ground below the Gezhouba Dam has been changed drastically during recent decades because of the River Regime Regulating Work. The increased complexity of the topography may yield some benefit for *A. sinensis* to attract fish to inhabit before the natural reproduction stage is reached, but the destruction of slopes on the spawning grounds perhaps goes against the dispersion of fertilized eggs and embryonic development. (3) The results provide further support for the hypothesis of "Dividing Function of the Spawning Ground of *A. sinensis*" in the area below the Dam at the present time. The turning of riverway and adverse slope of riverbed may be the absolutely necessary requirement for a suitable spawning ground of *A. sinensis*. Although the data are limted for such a working hypothesis, further studies should combine the accurate terrain data from historical spawning grounds of *A. sinensis* with thos from the new grounds to verify this potentially valid hypothesis. (4) The substrate, hydrological and hydraulis conditions are affected by the topography of the riverbed to a certain extent. It is necessary to make further investigation on the influence of riverbed terrain on the natural reproduction of *A. sinensis*, especially when considering the changes that may be anticipated with the full functioning of the Three Gorges Dam which must have also an effect on the hydrodynamics downstream even beyond the Gezhouba Dam.

Key Words: Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*); spawning grounds; topography

中华鲟 (*Acipenser sinensis* Gray) 是一种典型的溯河洄游性鱼类,主要分布于中国的长江干流和东海、黄海大陆架海域[1]。20 世纪后期,由于水利工程建设、过度捕捞、水体污染、航运等诸多因素,其野生种群资源量不断下降,虽然国家连续采取了一系列的保护措施[2],但从 1981 年至 1999 年的 19a 间,中华鲟幼鲟补充群体和亲鲟补充群体仍然分别减少了 80 % 和 90 % 左右[3,4]。中华鲟历史产卵场分布于牛栏江以下的金沙江下游和重庆以上的长江上游江段,已经报道过的产卵场多于 16 处[1]。1981 年葛洲坝水利枢纽工程的截流阻断

了中华鲟的产卵洄游通道,其产卵场从长江上游 600 km 的江段缩减至葛洲坝至古老背长约 30 km 的江段,且产卵规模也大为缩小,其中葛洲坝至十里红长约 7 km 的江段为较稳定产卵场,每年都可监测到中华鲟的自然繁殖;临江溪至虎牙滩江段为偶发性产卵场,仅某些年份可以监测到中华鲟的自然繁殖[5,6]。据标志-重捕法估算,1996 ~ 2001 年宜昌江段中华鲟繁殖群体数量年波动仅在 292 ~ 473 尾之间,而对长江口幼鱼的资源评估还表明,中华鲟幼鲟补充群体仍然主要来源于自然繁殖[5,7]①。在此形势之下,保证中华鲟繁殖群体在产卵场顺利进行自然繁殖,对于中华鲟自然种群的延续显得尤为重要。

由于长期自然进化的结果,在生理、生态上则表现为性腺发育、自然受精和受精卵散播的需要,多数鲟鱼类对产卵场河床形态和河床底质有特定的需求[8],对产卵地点具有选择性。显然,河流特殊的河床形态决定了特殊的水力学特征,产生了特殊的微生境,这可能是鲟鱼类产卵场条件的决定性因素。故对中华鲟产卵场地形的研究,对维持、改良或人工建造自然产卵场具有重要意义。国内文献中,关于鲟鱼产卵所需求的河床形态只有一般性描述,这在中华鲟历史产卵场和葛洲坝下新形成产卵场的调查资料中都可以发现[1,9~11]。如四川省长江水产资源调查组认为构成中华鲟产卵场的地形条件是:上有深水急滩,中有深洼的洄水沱,下为宽阔石砾或卵石碛坝浅滩;产卵场必在河流转弯或转向的外侧,必须具有使河流转向的峡谷、巨石或矶头石梁延伸于江中[1]。胡德高等首先对葛洲坝下游新形成的中华鲟产卵场进行了描述,认为其与长江上游中华鲟产卵场有相似的特征[9~11]。而在国外,由于多数鲟鱼产卵的河流较小未见进行相关地形研究[2]。危起伟提出了中华鲟产卵场的功能分区模型假说②。为进一步探明中华鲟产卵场的地形特征,本文基于 DEM (Digital Elevation Model)对葛洲坝下游现有产卵场的地形进行详细分析[3]。

1　材料与方法

1.1　数据来源

1981 年葛洲坝截流至 1998 年坝下河床的地形资料来源于相关文献报道[4~16]。1999 ~ 2006 年期间,从葛洲坝下游中华鲟产卵场所在江段共获得 5 次地形数据。水利部长江水利委员会(长江委)三峡水文水资源勘测局提供了"1999 年 12 月葛洲坝至虎牙滩江段 1:5000 水下地形图"和"2003 年 10 ~ 12 月坝轴线至磨基山 1:10000 数字地图"(1993 年版图式;1954 年北京坐标系;1985 国家高程基准,等高距为 1.0 m)。2005 年 11 月的地形数据系采用美国 BioSonics 公司 DT-X 系列数字科学回声仪(Digital Scientific Echosounders)自行测得。2006 年 5 月和 11 月的地形数据系采用 NAVCOM 公司 SF-2050G 型 GPS (Global Positioning System),中海达 HD-17A 型测深仪自行测得。自行测量所采用的导航软件为南方测绘公司的水上测量导航软件 2004 版,测线间距为 50 m。

1.2　数据分析

纸制地图首先利用 ArcScan 9.0 分图层进行矢量数字化,DWG 格式的数字地图直接用 ArcCatalog 9.0 进行处理,将各实体类信息转化为相应的图层后用 ArcMap 9.0 进行修饰。数字科学回声仪所测数据,首先用其专用软件 Visual Bottom Typer 1.9 进行分析,得到含有河床高程信息的(X,Y,Z)型数据文件,然后利用 ArcCatalog 9.0 将其转化为相应的图层。测深仪所测得到的(X,Y,Z)型数据直接利用 ArcCatalog 9.0 将其转化为相应的图层。以上方法得到的含有河床高程信息的图层最后都利用 ArcScene 9.0 中的反距离权重(Inverse Distance Weighted)插值算法生成河床 DEM (GRID 格式),并利用其 3D Analyst 模块进行深入的空间分析[7]。

2　结果与分析

2.1　葛洲坝下江段河床地形变迁

为了表述的方便,将调查江段纵向依次分为Ⅰ、Ⅱ、…、Ⅷ 8 个区,每个区从河道右岸至左岸(以顺流方向

① 常剑波. 长江中华鲟产卵群体结构和资源变动. 武汉:中国科学院水生生物研究所,博士学位论文. 1999

② 危起伟. 长江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,博士学位论文. 2003

为正)又依次分为 A、B、C、D 4 个或 A、B、C 3 个区。所得到的每个分区,如Ⅱ-B 区,再由上游向下游分为 1、2、3,从右岸向左岸分为 a、b、c,由此每个区可得到九个子小区,如Ⅱ1-Ba 等 图 1)。实际操作时,以 GPS 测量值和地面参照物对照确定。

葛洲坝水利枢纽 1981 年 1 月 4 日大江截流,水库运行后,下泻水沙数量改变了坝下游河道原有的来水来沙状况,河道原有的相对平衡状态被破坏[4,15]。1981 年大洪水 (流量大于 72 000 m^3/s)使得坝下河床发生了显著变化,二江河床在Ⅱ2 ~ 3-Bc ~ Db 区形成了一个深坑,Ⅲ B 区出现了一道深槽[8]。根据调查结果,宜昌河段 1981 ~ 1986 年以冲刷为主;1987 ~ 1994 年各年冲淤相间,冲略大于淤;1995 年以后有所淤积。其中 1998 年长江遇大洪水,宜昌江段发生较大淤积,1999 年又出现较大洪水,宜昌河段冲刷较剧烈,1998 年淤积物大部分被冲走,2000 年又发生淤积。1998 年大水后的几年,该河段的冲淤变化较大,大冲大淤交替发生[6]。

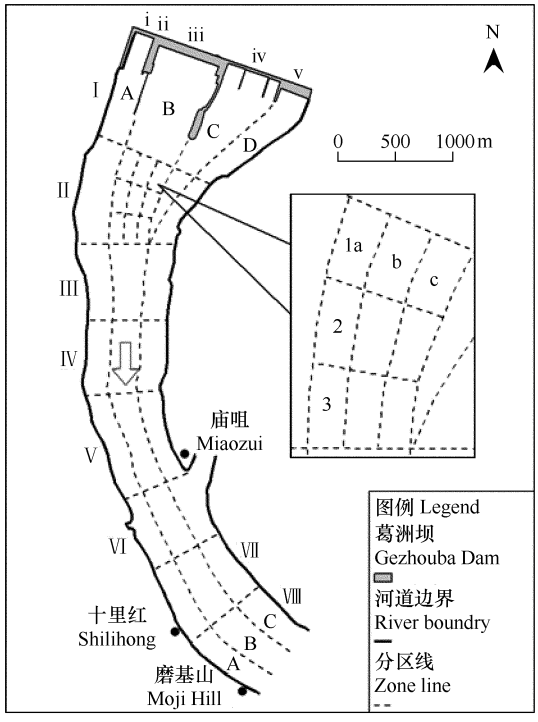

图 1 葛洲坝至磨基山江段河床分区示意图

Fig. 1 Sketch map of subareas in river reach between Gezhouba Dam and Moji Hill

i 为冲沙闸 Flushing sluice;ii 为 1 号船闸 No. 1 ship lock;iii 为大江电厂 Dajiang power plant;iv 为二江泄水闸 Erjiang water relief sluice;v 为二江电厂 Erjiang power plant;图中大写罗马数字Ⅰ ~ Ⅷ,字母 A ~ D、a ~ c 和阿拉伯数字 1 ~ 3 皆为分区编号 Capital Roman numerals (Ⅰ-Ⅷ), letters (A-D, a-c) and Arabic numerals are serial numbers of subareas;箭头表示水流方向 Arrow means the direction of water current

2.2 葛洲坝至虎牙滩江段河床地形

葛洲坝至虎牙滩江段是长江从山区性河流转向冲积性河流的过渡段,从图 2 可以看出,整个江段河道走势比较顺直,略呈“S”形。在 1 号船闸水位线 38.3 m 时,葛洲坝至虎牙滩江段河道最宽处 (胭脂坝处,包括胭脂坝)约为 1670 m,最窄处 (大江庙咀处)约为 598 m,整个江段平均宽度约为 950 m。葛洲坝至虎牙滩江段共有 6 处高程值较小的区域形成的深洼,但胭脂坝处常年露出水面,最大高程值为 50.1 m,面积约为 2.13 km^2。葛洲坝至虎牙滩整个江段河床高程平均值和标准差 ($\bar{X} \pm S.D.$)为 30.88 m ± 4.81 m (栅格大小 53.8 m),变异系数 (CV)15.58 %,以 1983 ~ 2002 年中华鲟产卵当日平均水位 44.01 m 计算,平均水深为 13.13 m。

2.3 葛洲坝至磨基山江段河床地形

从图 3 可以看出,中华鲟主要产卵场所在的葛洲坝至十里红江段,河道走势呈弧形,由西南方向逐渐转入东南方向。修建葛洲坝时的废石料在大江和二江电厂出水口前 (即Ⅰ2-Bb 和Ⅰ2-Cb 区)分别形成一个较平坦急滩,平均高程值分别为 32.7 m 和 34.1 m,产卵期间平均水深约为 8.7 m 和 7.3 m。急滩过后河床高程急剧下降形成一个陡坎,河床坡度值逐渐增大 (Ⅰ3-Bc ~ Ca 区),再加上受到大江电厂和二江电厂水流的强烈冲击,使此处的流态十分复杂,根据 2005 年 11 月 10 日 (中华鲟产卵发生日)声学多普勒剖面流速仪 (Acoustic Doppler Current Profiler,ADCP)测验结果,此处流速流向变幅均较大,是中华鲟产卵前最主要的栖息地。

Ⅰ3-Bc ~ Ca 区前方是一个长条形的卵石堆,其河床平均高程约为 35.5 m,高程值最大处可达 36.6 m 以上,冬季低水位时经常有卵石堆露出水面,卵石直径约为 15 ~ 30 cm。卵石堆中部的左方 (Ⅱ2 ~ 3-Bc ~ Db 区)是一个由二江泄洪闸泄洪时冲刷形成的深潭,面积约为 4.4 km^2,河床高程值最小处约为 2.5 m,中华鲟产卵期间水深可达 35 m 以上。从上述卵石堆尾部 (Ⅱ3-B 区)开始,河床高程值略呈一定程度地波动 (Ⅲ1 ~ Ⅳ2-B),但总体上呈上升趋势,并逐渐向南转向进入Ⅳ3-B 区。Ⅳ3-B 区河床逐渐升高并形成一个较平坦的卵石滩,但随后Ⅴ1-B 区河床高程陡降,从此向下游发生了河床结构的急剧变化,并形成一个较大的洄水沱 (Ⅴ2 ~

Ⅵ1-B 区)。此后,河床向下逐渐形成一个弯道,且弯道右侧区由于受到水流的冲刷高程值较低,至十里红江段逐渐形成较宽阔的江面,江宽约为 845 m,根据以往的调查,底质以卵石为主的江段到此处结束。

根据 1983 ~2002 年中华鲟产卵当日的平均水位 44.01 m 来推算,葛洲坝至磨基山整个江段中华鲟自然繁殖期间的平均水深应为 14.55 m 左右(删格大小 8.0 m),而上产卵区和下产卵区的平均水深则分别为 11.66m 和 13.87m,这可能就是中华鲟产卵所需要的最适水深。河床坡度值主要在深潭(Ⅱ2 ~3-Bc ~Db 区)和弯道(Ⅴ2 ~ Ⅵ1-B 区)处较大,分别达到和 27.9°和 23.2°。而此江段坡向的分布则较为均匀,由于受河道形状的影响,88°和 267°左右相对集中。

根据危起伟等根据产卵亲鲟的遥测追踪和江底直接捞卵得出的研究结果①,"上产卵区"上界距葛洲坝大江电厂坝体约 870 m,位于电厂尾水下游约 150 m,面积约为 0.1 km^2,"下产卵区"位于下游河槽正中央,面积稍大,约为 0.3 km^2。从图 3 可以看出,此江段河床的走向和高程变化,在"上产卵区"和"下产卵区"分布范围内有部分相似的特征。从总体上看,该江段上有深水急滩,中有深洼的洄水沱,江面由宽变窄,并具有河道转向的特征,与中华鲟历史产卵场的地形特征相比较为相似。

2.4　河势调整工程对葛洲坝至庙咀江段河床地形的影响

为了改善大流量时葛洲坝下游大江航道的通航条件,相关部门于 2004 年 12 月启动了葛洲坝水利枢纽下游河势调整工程,工程内容主要包括修建长 900 m 的江心堤工程和以二江下槽开挖为主的共约 1.17×10^6 m^3 的河床开挖工程,其中二江下槽最大开挖水深 13.3 m,最小开挖水深 1 ~4 m [8,19]。江心堤部分位于上产卵区内,而二江下槽的开挖则与Ⅲ ~ Ⅳ-B 区的负坡地形相关,由此可见,工程不可避免地将对中华鲟产卵场造成一定程度的影响。

从施工期间 3 次地形实测结果来看(图 4),2005 年 11 月工程刚刚进行不久时,河床地形变化主要表现为大江电厂下约 470 m(图 4 ①中Ⅰ3 ~ Ⅱ2-Bb 区)处出现了一个长约 920 m,宽约 60 m,高程约 41.3 m 的堤坝,和Ⅰ3-Bc、Ⅲ2-Cb ~ c 区被挖低。2006 年 5 月工程即将竣工时再次测量,堤坝所在的位置已经修建成江心堤(图 4 ② 中Ⅰ3 ~ Ⅱ2-Bb 区),堤顶高程为 52.0 m,并且Ⅲ3 ~ Ⅳ3-Ca ~ b 区被挖低。河势调整整个现场施工于 2006 年 7 月 31 日结束。2006 年 11 月中华鲟自然期间测量结果表明(图 4 ③),Ⅲ3 ~ Ⅳ3-Ca ~ b 区由于开挖河床高程变得更低,但Ⅴ3-Ba ~ c 区作为弃渣区高程有所升高。综合图 3 和图 4 可以看出,该工程使得葛洲坝下游河道成为双槽"W"体型河床,河床地形发生了较大的变化。河床地形的这种变化会导致Ⅳ区水流从河道右侧转移至河道两侧,Ⅳ区中部的流速降低,特别是底层流速发生较大变化,从而对中华鲟受精卵的散播产生较大影响。

2.5　临江溪至虎牙滩江段河床地形

根据以往的调查,1986、1987 和 1994 年还在临江溪至虎牙滩江段发现了中华鲟的自然繁殖[5,6]。从图 5 可以看出,该江段河床地形的变化较为平缓,河床高程最小值为 19.05 m,最大值为 37.28 m,根据 1983 ~2002 年中华鲟产卵当日的平均水位 44.01 m 来推算,中华鲟自然繁殖期间的平均水深应为 13.64 m 左右(删格大小 8.0 m)。从高程、坡度和坡向等地形因子分布图可以看出,临江溪至虎牙滩江段地形变化远不及葛洲坝至磨基山江段的地形复杂,与长江上游中华鲟历史产卵场的地形特征相比,也仅有部分相似的特征,这可能就是中华鲟为何不能每年在此产卵的重要原因。

2.6　产卵场地形因子对比分析

对产卵场及产卵区江段地形空间分析的结果表明(表 1),临江溪至虎牙滩江段河床高程的变异系数比葛洲坝至磨基山江段要小,平均坡度值和粗糙度则要小得多。从河道主槽纵向高程变化来看(图 6),临江溪至虎牙滩负坡的坡度要远小于葛洲坝至庙咀江段。从整体上看,临江溪至虎牙滩江段河床地形复杂度较葛洲坝至磨基山江段要小。上产卵区和下产卵区内的平均高程和坡度相差不大,但下产卵区内高程的变异系数约为

① 危起伟. 长江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,博士学位论文. 2003

接彩图 2,3

接彩图 4,5

上产卵区的 1.89 倍。由于受河道形状的影响,下产卵区内的平均坡向值较大,约为上产卵区的 1.29 倍。但上产卵区粗糙度较大,约为下产卵区的 1.66 倍。但从总体上看,上产卵区和下产卵区内地形复杂度都较高。

表 1 产卵场地形因子空间分析结果

Table 1 Topographical factors of spawning grounds by spatial analyst

区域 District	高程 Elevation		坡度 Slope		坡向 Aspect		粗糙度 Roughness ($\times 10^{-3}$)
	$\bar{X}$ ± S.D. (m)	CV	$\bar{X}$ ± S.D. (m)	CV	$\bar{X}$ ± S.D. (m)	CV	
葛洲坝至磨基山 Gezhouba Dam to Miaozui	29.46 ± 4.47	15.17	2.15 ± 2.23	103.72	177.48 ± 102.90	57.98	1.74
上产卵区 Upstream spawning site	32.35 ± 2.18	6.74	2.77 ± 2.02	72.92	180.68 ± 104.26	57.70	2.14
下产卵区 Downstream spawning site	30.14 ± 3.85	12.77	2.13 ± 1.67	78.40	232.87 ± 105.75	45.41	1.29
临江溪至虎牙滩 Linjiangxi to Huyatan	30.37 ± 2.61	8.59	0.98 ± 1.01	103.06	172.54 ± 102.16	59.21	0.36

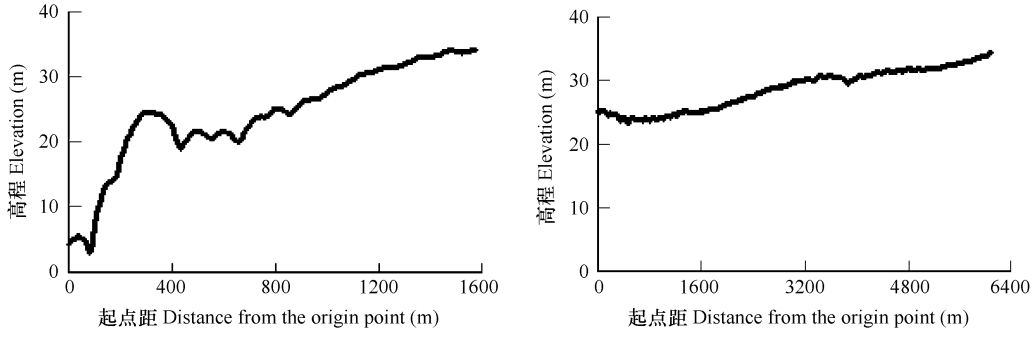

图 6 葛洲坝至庙咀和临江溪至虎牙滩河道纵断面剖面高程变化

Fig. 6 The lengthways profile graph of riverway between Gezhouba Dam and Miaozui, Linjian Stream and Huyatan, respectively

剖面线分别见图 3 和图 5 profile lines were showed in Fig. 3 and Fig. 5, respectively

3 讨论

3.1 产卵场地形对中华鲟自然繁殖的影响

对于鲟鱼类的自然繁殖,不同种类具有不同的限制性因素[10]。中华鲟产卵繁殖是产卵场环境及水文条件共同作用的结果,根据目前的研究,认为河床地形、底质、流速、水温、水位、流量、含沙量等都是影响中华鲟产卵的相关因素。四川省长江水产资源调查组着重强调了水位的重要作用[],常剑波等则认为河床底质对中华鲟的自然繁殖具有重要作用,并建议采用人工模拟底质和其它条件的方法为其提供更多适宜的繁殖场所[11],危起伟则认为影响中华鲟自然繁殖的主要因素是产卵场条件,各种水文条件均有个阈值范围①。综上所述,作者认为河床地形是决定产卵场条件和水文条件的首要因素,因为河床形态决定了流速场特征,影响着流速,并在某种程度上决定水流对河床的冲刷进而影响底质的组成。

葛洲坝水利工程未修建以前,在宜昌江段并未发现中华鲟的产卵场,而葛洲坝截流以后,在坝下即形成了新的中华鲟产卵场。虽然新产卵场可能是中华鲟无奈之下的一种次选择,但不可否认的是新产卵场的形成主要是产卵场江段地形和水流共同作用的结果。如果在葛洲坝下游再修建一座大坝,不排除在新大坝下重新形成产卵场的可能。因此,河床地形对中华鲟自然繁殖的影响及其程度,有必要作出进一步地探讨。

3.2 中华鲟自然繁殖期间的迁移和分布与河床地形的关系

根据 1996 ~ 1998 年采用超声波标记对自然繁殖期间中华鲟产卵亲鲟的追踪结果[12]②,整个自然繁殖期

① 危起伟. 长江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,博士学位论文. 2003

② 危起伟. 长江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,博士学位论文. 2003

间,中华鲟主要在Ⅰ~Ⅱ-B 区(图3)一带活动,但不同年份间略有差异。其中1996 和1997 年亲鲟的分布情况非常相似,出现定位次数较多的3 个区域依次为ⅠB、ⅡB 和ⅢB,而1998 年的分布情况有所变化,亲鲟出现较多的3 个区域依次为ⅠB、ⅣB 和ⅤA[2]。这是否与1998 年大洪水坝下河床发生较大淤积有关,值得深入研究。产卵行为发生时中华鲟主要集中至"上产卵区"和"下产卵区"所在的位置,年际间有微小变动,这是否与河床地形年际间的变动有关,有必要作进一步的研究。

从图3 可以看出,中华鲟产卵前栖息的位置一般位于河床高程值较大,地势比较复杂,流速较紊乱的位置,这些位置特殊的流态可能是刺激中华鲟性腺发育成熟的主要因素。而产卵行为发生时,则主要停留在下游江段存在负坡地形的位置,以利于受精和受精卵的黏附。关于中华鲟自然繁殖各个阶段对河床地形的详细需求,还有待于进一步地研究。

3.3　受精卵散播与河床地形的关系

根据1996~2003 年江底直接采卵结果,中华鲟受精卵主要分布于Ⅲ~Ⅴ-B 区江段(图3),年际间有微小变动①。Ⅲ~Ⅳ-B 区域由于受到负坡地形的影响,所以黏附的受精卵较多,ⅤB 区域黏附的受精卵较多,则主要可能是因为下游河道转向水流减缓的结果。播卵位置的年际变动则可能与河床地形的年际变化有一定的关系。根据2005 和2006 年的捞卵结果②,2006 年主要播卵位置为Ⅳ~Ⅴ-B 区,相对于2005 年的Ⅲ~Ⅳ-B 区,有向下游移动的趋势,这可能与二江下槽的开挖有较大的关系。另外,中华鲟产卵期间对河床底质的选择对其受精卵的散播位置可能也具有较大的影响。

3.4　关于中华鲟产卵场功能分区模型假说

危起伟等根据对中华鲟产卵亲鱼的遥测追踪和江底直接捞卵结果[3,24],定位了葛洲坝下中华鲟的产卵位置和产卵场范围,并结合原来金沙江下游和长江上游的中华鲟产卵场,提出了中华鲟的产卵场模型③。模型认为一个完整的中华鲟产卵场是由3 个功能不同但又相互联系的区域组成,分别称之为产卵交配区、播卵区和着卵孵化区,这三个区域分别行使产卵、播卵和孵化功能,中华鲟产卵场必须同时具备这3 个功能区的存在。通过对葛洲坝下游中华鲟产卵场的地形进行分析,发现河道形状和河床高程变化均与这一理论较符合。而河道转向结构和河床负坡地形可能是提供这3 个功能区的必备条件之一。如果能够获得中华鲟历史产卵场地形的精确数据,就能进一步验证该模型,从而为葛洲坝下现有产卵场的改良和以后人工建设产卵场提供科学依据。

3.5　河势调整工程对中华鲟自然繁殖的影响

历史上黑板湾和腊子窝是有名的产卵场,但由于河滩疏理使河床结构、水位、流态和流速均发生了变化,特别是腊子窝变化更大,葛洲坝尚未截流前就已几乎消失[1]。葛洲坝下游河势调整工程总体上使得产卵场江段河床地形复杂度增大,从而使得流速空间复杂度也增大,这可能对中华鲟自然繁殖前期的栖息有利,然而施工期间河床的挖填、底质的重新分配,使得原有的播卵区和着卵孵化区(Ⅲ~Ⅴ-B 区)发生了一定程度的改变,这可能会对中华鲟胚胎的正常发育产生不利影响。另外,施工期间的机械操作和噪音,对中华鲟的繁殖群体也是极为不利的,如2006 年4~5 月施工期间,在葛洲坝下江段就发现2 尾机械伤害致死的中华鲟。从长远看,该工程对中华鲟自然繁殖所造成的影响还有待于进一步研究。

3.6　数据的时空精度问题

文中所涉及到的5 次地形数据,精度略有差异,如GPS 和各种测深仪器精度的不同,对研究结果都有一定程度的影响。文中将1999 年12 月所测地形数据作为基准来研究,主要是考虑到这一时期各方面的调查数据都较为充分,2003 年的数据由于比例尺太小,在研究中只能参考使用,2005 和2006 年有关中华鲟自然繁殖生态的调查资料较为薄弱,不利于分析。另外,中华鲟自然繁殖期间的迁移和分布主要采用的是1996~1998

① 危起伟. 长江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, 博士学位论文. 2003

② 见危起伟,等

③ 危起伟. 长江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, 博士学位论文. 2003

年的跟踪数据,江底直接采卵则主要采用的是 1996 ~ 2003 年的数据,其间由于受到河道冲淤的影响,其地形情况可能无法与 1999 年 12 月所测数据完全对应。

References:

[1] The Yangtze Aquatic Resources Survey Group Sichuan Province. The Biology of the Sturgeons and Paddlefish in Yangtze and their Artificial Propagation. Chengdu: Sichuan Scientific and Technical Publishing House, 1988.

[2] Yang D G, Wei Q W, Wang K, *et al*. Downstream migration of tag-released juvenile Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*) in the Yangtze River. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29 (): 26 - 30.

[3] Ke F E, Wei Q W, Luo J D, *et al*. A study on conservation and remediation of precious and rare aquatic wildlife in Yangtze River. Proceedings of The First Conference on National Parks and Protected Areas of East Asia. Beijing: China Environmental Science Press, 1994. 780 - 785.

[4] Ke F E. A study on conservation and exploitation of Chinese Sturgeon. Freshwater Fisheries, 1999, 29 (): 4 - 7.

[5] Wei Q W, Yang D G, Ke F E. Strategy of conservation of sturgeons and paddlefish in the Yangtze River. The 21 Century's Ecological Environment and Conservation in Large Hydroelectric Projects on the Yangtze River. Beijing: The Chinese Environment Press, 1998. 208 - 216.

[6] Wei Q W, Ke F E, Zhang J M, *et al*. Biology, fisheries, and conservation of sturgeons and paddlefish in China. Environmental Biology of Fishes, 1997, 48: 241 - 255.

[7] Wei Q W, Chen X H, Yang D G, *et al*. Variations in spawning stock structure of *Acipenser sinensis* within 24 years since damming of Gezhouba Dam. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12 (): 452 - 457.

[8] Billard R, Lecointre G. Biology and conservation of sturgeon and paddlefish. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2001, 10 (): 355 - 392.

[9] Hu D G, Ke F E, Zhang G L. Primary survey on spawning of Chinese Sturgeon below Gezhouba Dam. Freshwater Fisheries, 1983, 13 (): 15 - 18.

[10] Hu D G, Ke F E, Zhang G L, *et al*. The second survey on the spawning ground of Chinese Sturgeon below Gezhouba Dam. Freshwater Fisheries, 1985, 15 (): 22 - 24, 33.

[11] Hu D G, Ke F E, Zhang G L, *et al*. Investigation on the spawning ground of Chinese Sturgeon down Gezhouba Dam. Freshwater Fisheries, 1992, 22 (): 6 - 10.

[12] Johnson J H, LaPan S R, Klindt R M, *et al*. Lake sturgeon spawning on artificial habitat in the St Lawrence River. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22 (): 465 - 470.

[13] Li Z L, Zhu Q. Digital Elevation Model. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.

[14] Shi Z, Long C P. Analysis on fluvial process of down strean reaches of Gezhouba Project. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17 (): 13 - 16.

[15] Tang C S, Song S J, Wang W G, *et al*. Monitoring and analysis on downstream river channel impacted by Gezhouba hydroproject. Yangtze River, 2001, 32 (1): 11 - 13, 56.

[16] Dai H C, He W S, Yuan J, *et al*. Analysis on scour and deposit variation characteristic of sediment after the operation of Gezhouba hydro project. Advance in Water Science, 2005, 16 (): 691 - 695.

[17] Dang A R, Jia H F, Yi S Z, *et al*. GIS application guide of ArcGIS 8.0 desktop. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[18] Wang C, Xu G, Xiang Y G. River Regime Regulating Works at lower reach of Gezhouba Hydroproject. Hubei Water Power, 2006, (): 36 - 39.

[19] Wang G H, Ma H. The design and function of the current regulated project below Gezhouba Dam. Express Water Resources & Hydropower Information, 2006, 27 (): 4 - 6.

[20] Dettlaff T A, Ginsburg A S, Schmalhausen O I. Sturgeon Fishes: Developmental Biology and Aquaculture. Berlin: Springer-Verlag, 1993.

[21] Yi J F, Chang J B, Tang D M, *et al*. Present status of spawning stock of Chinese Sturgeon, *Acipenser sinensis*, in the Yangtze River. Acta Hydrobiologica Sinica, 1999, 23 (): 554 - 559.

[22] Yang D G, Kynard B, Wei Q W, *et al*. Distribution and movement of Chinese Sturgeon, Acipenser sinensis, in spawning ground located below the Gezhouba Dam during spawning seasons. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22 (Supplement 1): 145 - 151.

[23] Wei Q W, Yang D G, Ke F E, *et al*. Technique of ultrasonic telemetry for Chinese Sturgeon, *Acipenser sinensis*, in Yangtze River. Journal of Fisheries of China, 1998, 22 (): 211 - 217.

[24] Kynard B, Wei Q W, Ke F E. Use of ultrasonic telemetry to locate the spawning area of Chinese Sturgeon. Chinese Science Bulletin, 1995, 40 (): 668 - 671.

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.

[2] 杨德国,危起伟,王凯,等. 人工标志放流中华鲟幼鱼的降河洄游. 水生生物学报,2005,29(1):26~30.
[3] 柯福恩,危起伟,罗俊德,等. 论长江珍稀水生野生动物的保护与补救. 第一届东亚地区国家公园与自然保护区文集. 北京:中国环境科学出版社,1994. 780~785.
[4] 柯福恩. 论中华鲟的保护与开发. 淡水渔业,1999,29(9):4~7.
[5] 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. 北京:中国环境科学出版社,1998. 208~216.
[7] 危起伟,陈细华,杨德国,等. 葛洲坝截流 24 年来中华鲟产卵群体结构的变化. 中国水产科学,2005,12(4):452~457.
[9] 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,1983,13(6):15~18.
[10] 胡德高,柯福恩,张国良,等. 葛洲坝下中华鲟产卵场的第二次调查. 淡水渔业,1985,15(6):22~24,33.
[11] 胡德高,柯福恩,张国良,等. 葛洲坝下中华鲟产卵场的调查研究. 淡水渔业,1992,22(6):6~10.
[13] 李志林,朱庆. 数字高程模型. 武汉:武汉大学出版社,2003.
[14] 师哲,龙超平. 葛洲坝枢纽下游河段河床演变分析. 长江科学院院报,2000,17(6):13~16.
[15] 唐从胜,宋世杰,王维国,等. 葛洲坝枢纽运行对下游河段影响的监测研究. 人民长江,2001,32(1):11~13,56.
[16] 戴会超,何文社,袁杰,等. 葛洲坝水利枢纽运行后泥沙冲淤变化分析. 水科学进展,2005,16(5):691~695.
[17] 党安荣,贾海峰,易善桢,等. ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南. 北京:清华大学出版社,2003.
[18] 王程,徐刚,向友国. 长江葛洲坝水利枢纽下游河势调整工程. 湖北水力发电,2006,(6):36~39.
[19] 王改会,马虹. 葛洲坝下游河势调整方案设计及其作用. 水利水电快报,2006,27(12):4~6.
[21] 易继舫,常剑波,唐大明,等. 长江中华鲟繁殖群体资源现状的初步研究. 水生生物学报,1999,23(6):554~559.
[23] 危起伟,杨德国,柯福恩,等. 长江中华鲟超声波遥测技术. 水产学报,1998,22(6):211~217.

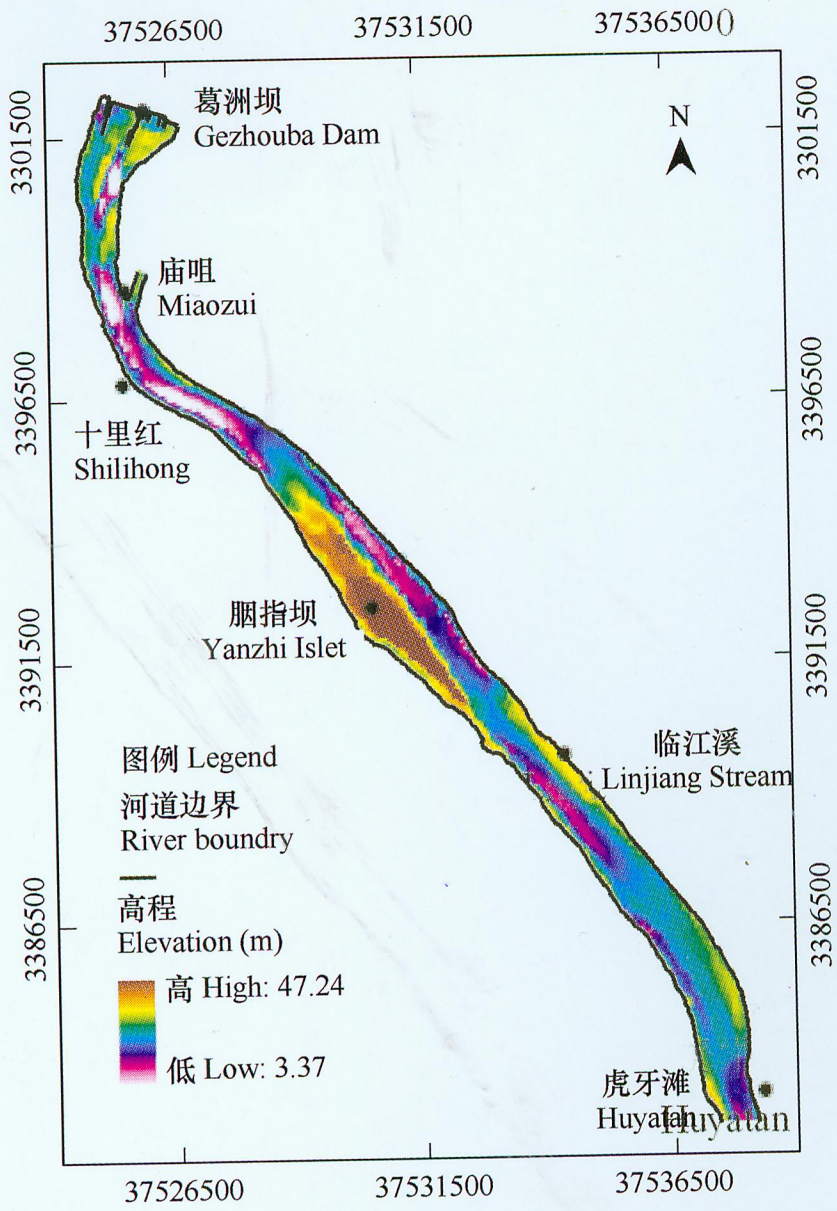

图 2　1999 年 12 月中华鲟产卵场所在江段（葛洲坝至虎牙滩）河床高程（1954 年北京坐标系，1985 国家高程基准）

Fig.2　The elevation of riverbed between Gezhouba Dam and Huyatan where the spawning grounds of A. sinensis locate in Dec., 1999 (Beijing Geodetic Coordinate System 1954, National Elevation Datum 1985)

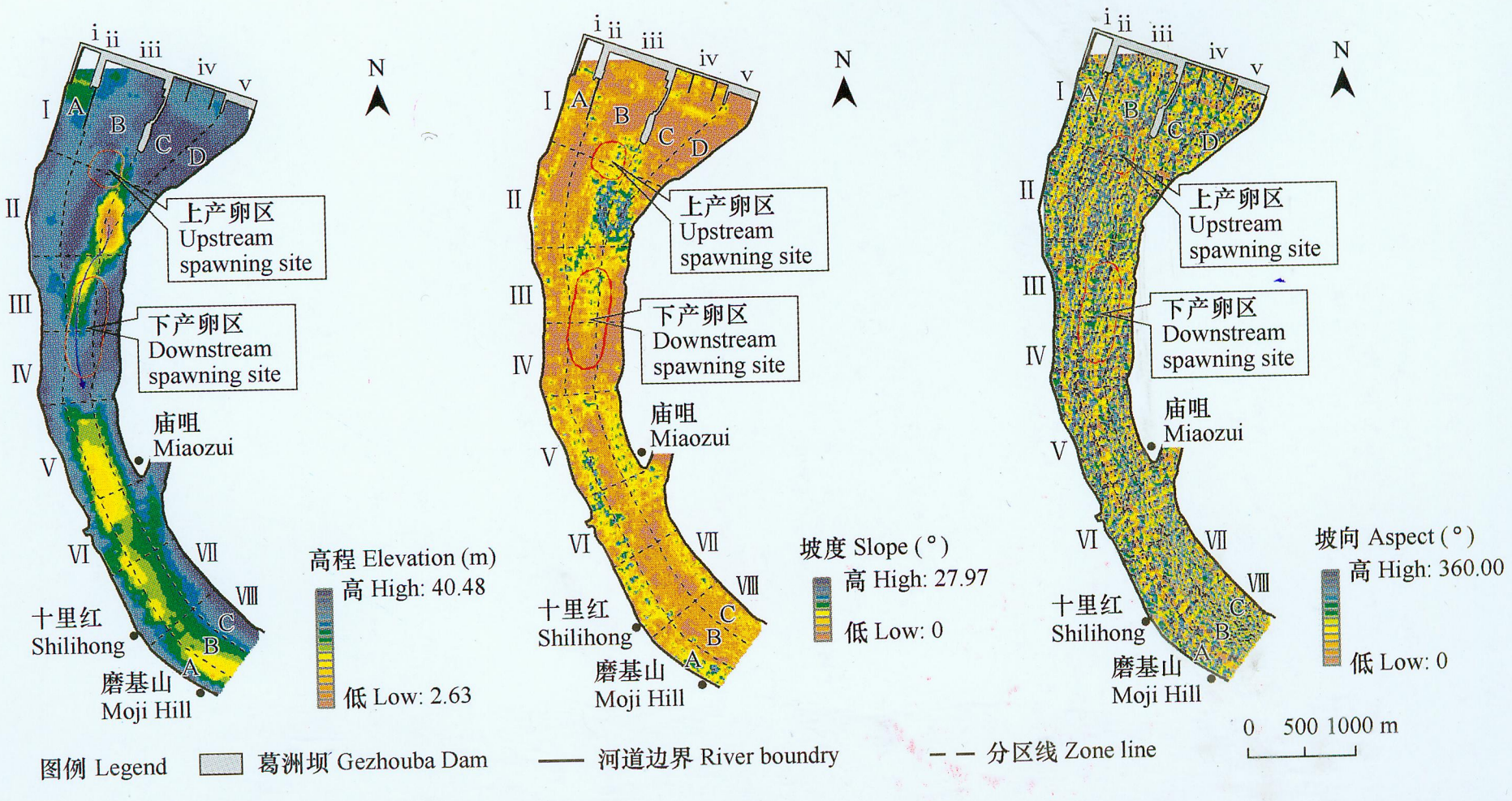

图 3　1999 年 12 葛洲坝至磨基山江段河床高程、坡度、坡向(1985 国家高程基准)

Fig.3　The elevation, slope and aspect of the riverbed between Gezhouba Dam and Moji Hill in Dec., 1999 (National Elevation Datum 1985)

i 为冲沙闸 Flushing sluice；ii 为 1 号船闸 No.1 ship lock；iii为大江电厂 Dajiang power plant；iv为二江泄水闸 Erjiang water relief sluice；v 为二江电厂 Erjiang power plant；图中大写罗马数字Ⅰ～Ⅷ，字母 A～D 皆为分区编号 Capital Roman numerals (Ⅰ－Ⅷ), letters (A-D) are serial numbers of subareas；高程图Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ区中所示蓝色箭头线为图 6 中所分析的地形断面剖面线 The blue arrowheaded line in subareas Ⅱ,Ⅲ and Ⅳ

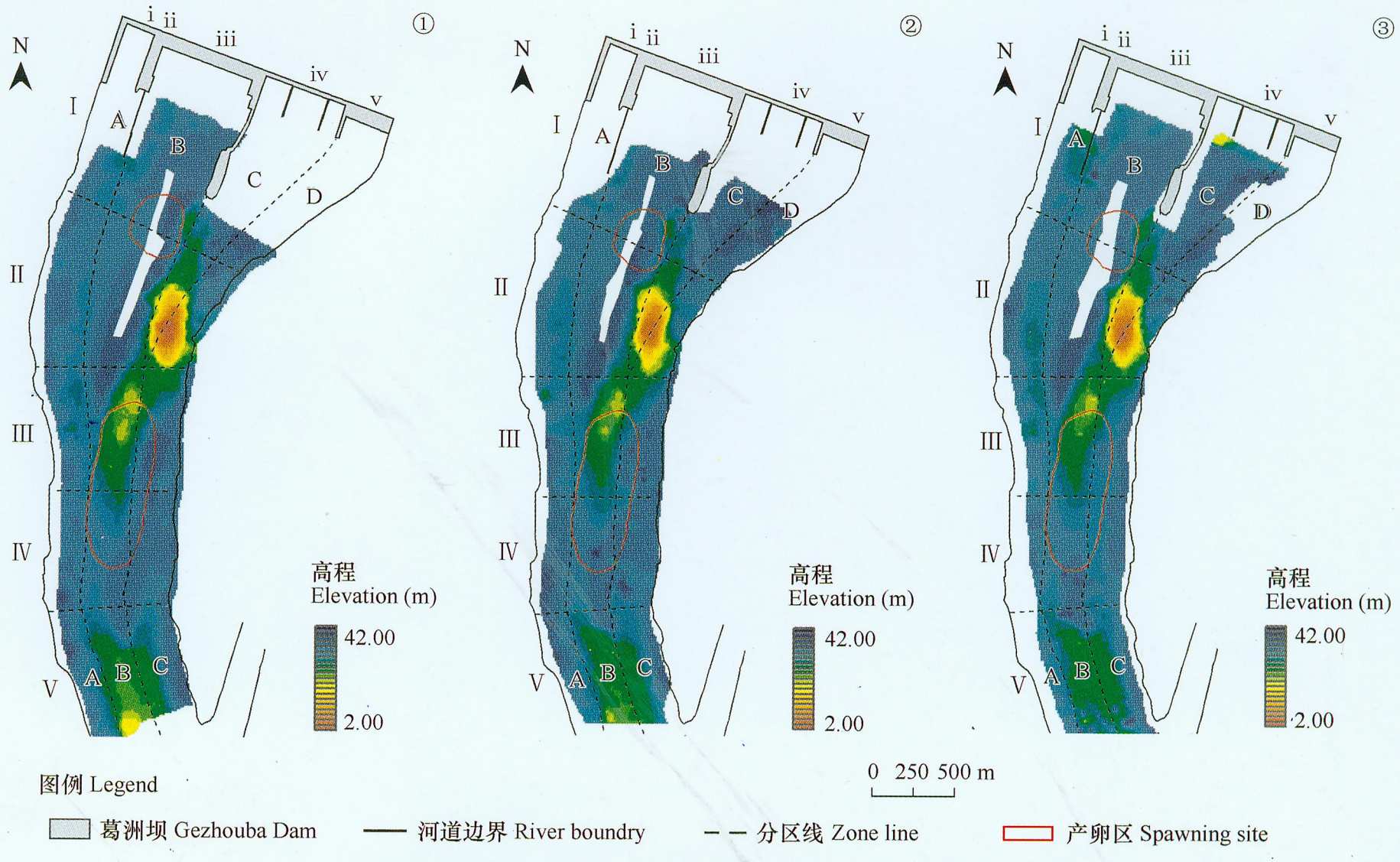

图 4　葛洲坝至庙咀江段实测地形（1954 年北京坐标系，1985 国家高程基准）

Fig.4 The topography of riverbed between Gezhouba Dam and Miaozui (Beijing Geodetic Coordinate System 1954, National Elevation Datum 1985)

① 2005 年 11 月 Nov., 2005; ② 2006 年 5 月 May, 2005; ③ 2006 年 11 月 Nov., 2006

ⅰ为冲沙闸 Flushing sluice；ⅱ为 1 号船闸 No.1 ship lock；ⅲ为大江电厂 Dajiang power plant；ⅳ为二江泄水闸 Erjiang water relief sluice；ⅴ为二江电厂 Erjiang power plant；图中大写罗马数字Ⅰ～Ⅷ，字母 A～D 皆为分区编号 Capital Roman numerals (Ⅰ－Ⅷ), letters (A-D) are serial numbers of subareas

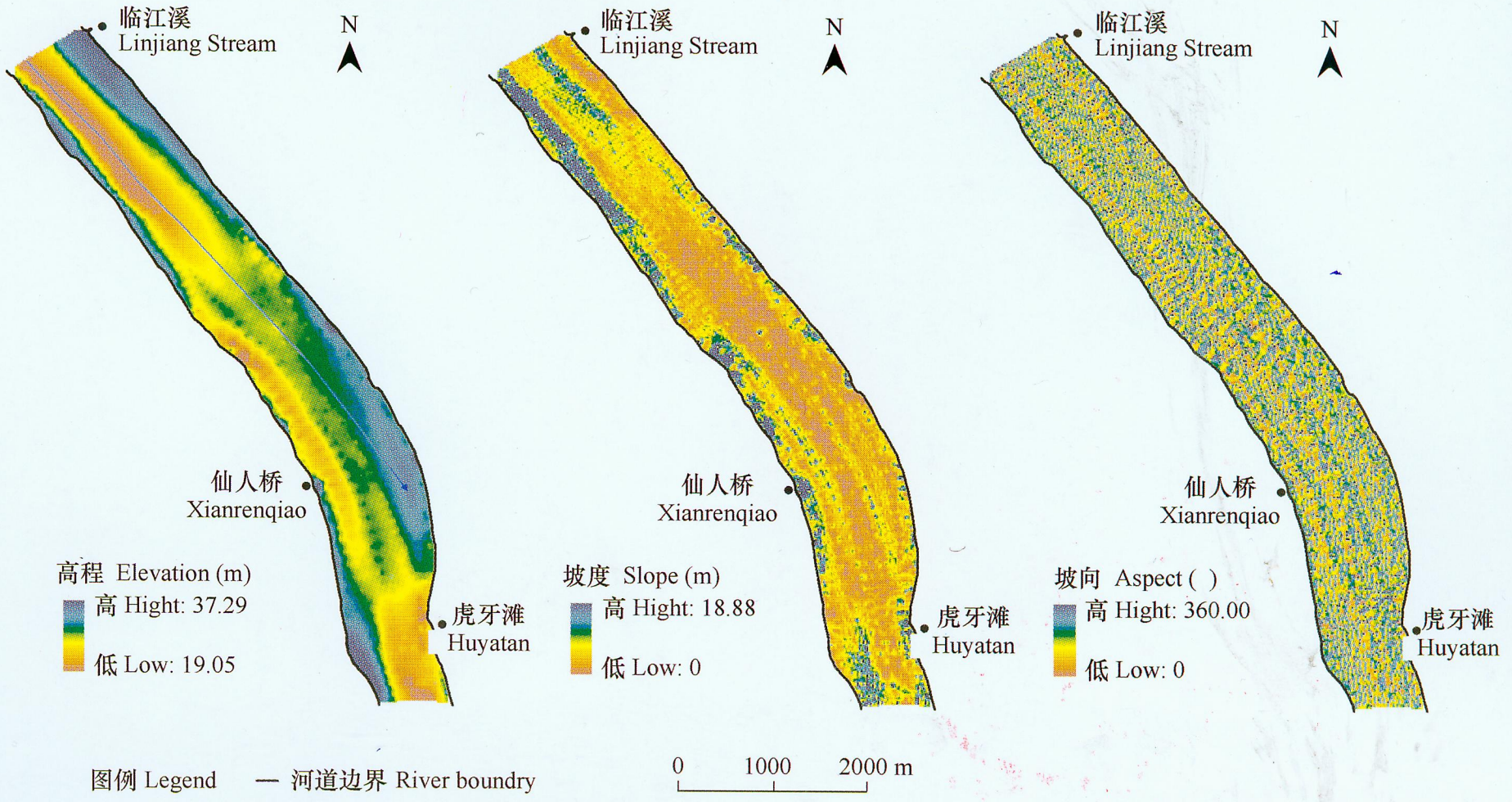

图 5　1999 年 12 月临江溪至虎牙滩江段河床高程、坡度、坡向（1985 国家高程基准）

Fig.5 The elevation, slope and aspect of the riverbed between Linjiang Stream and Huyatan in Dec., 1999 (National Elevation Datum 1985)

高程图中所示蓝色箭头线为图 6 中所分析的地形断面剖面线 The blue arrowheaded line in elevation figure shows the profile line discussed in Figure 6