

小浪底水库运行对黄河鲤鱼栖息地的影响

蒋晓辉^{1,*}, 赵卫华², 张文鸽¹

(1. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要:通过历史文献和实地生态调查,了解黄河鲤鱼生态习性及其与径流组分响应关系,在此基础上,通过分析水库对径流组分影响,建立栖息地模拟模型,研究小浪底水库运行对黄河鲤鱼生存繁衍的影响。研究表明:(1)径流的流量组分与黄河鲤鱼的生态习性有密切的相关关系,小浪底水库的运行显著改变了流量脉冲、小洪水及大洪水,流量脉冲消失或减少使得黄河鲤鱼产卵缺乏足够的产卵栖息地;小洪水减少使黄河鲤鱼的食物来源和栖息地减少;漫滩洪水减少和消失使黄河鲤鱼失去从河滩地获得食物和栖息地机会。(2)通过建立 River2D 模型,得到了不同流量下黄河鲤鱼在不同生命阶段栖息地面积的变化情况,研究表明,建库后大于 1400 m³/s 流量的显著减少,影响了黄河鲤鱼的产卵;建库后花园口低限流量变化不明显,建库对成鱼和幼鱼生存的影响不大。

关键词:影响;栖息地;黄河鲤鱼;小浪底水库

The impact of Xiaolangdi Dam operation on the habitat of Yellow River Carp (*Cyprinus (Cyprinus) carpio haematopterus Temminck et Schlegel*)

JIANG Xiaohui^{1,*}, ZHAO Weihua², ZHANG Wenge¹

1 Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China

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

Abstract: Xiaolangdi Reservoir is located on the lower end of the middle reaches of the Yellow River, downstream of the major water and sediment source areas of the basin. At this point the catchment area is 92.3% of the basin total, runoff is 91.5% of the basin total, and sediment load is 98% of the basin total. Xiaolangdi Reservoir has a total capacity of 12.6 × 10⁹ m³ and a capacity to trap 7.5 × 10⁹ m³ of sediment. Thus, the reservoir is effective in regulating water and sediment regimes. This regulation has a major impact on channel morphology, sediment transport processes, and flow regime, with consequences for biota that are dependent on these river processes. Changes to flow and sediment regimes affect all trophic levels, with some direct and some indirect impacts on fish. The Yellow River Carp (*Cyprinus (Cyprinus) carpio haematopterus* Temminck et Schlegel) is an iconic fish in the lower Yellow River, and a suitable ecological indicator of river health impacts from flow regulation. Although operation of Xiaolangdi Dam is thought to have affected the breeding habitat of the Yellow River Carp, this paper quantifies the impact. The habitat and flow requirements of the Yellow River Carp are defined through reference to historical information and field ecological surveys. The paper also determines suitable eco-hydrological indicators of the impacts of regulation, with a focus on the reach downstream from the Yellow River Bridge in Huayuankou from 200 m downstream to 1 km downstream.

A Yellow River Carp habitat simulation model was established, based on the known habitat and flow component requirements. Then, the impact of operation of the Xiaolangdi Dam on the ability of Yellow River Carp to survive and multiply was determined by running the simulation model for pre- and post-reservoir scenarios. The study showed that: (1) The flow components identified in the unregulated river regime are closely correlated with the known ecological habitat requirements of the Yellow River Carp. The operation of Xiaolangdi Dam significantly altered the pattern of flow pulses,

基金项目:水利部公益性行业专项(2007SHZ1-19)

收稿日期:2009-12-05; 修订日期:2010-04-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Jxh3412@163.com

small floods and large floods. Elimination or reduction in the frequency of flow pulses compromised the availability of spawning habitat for the Yellow River Carp. Declining frequency of small floods reduced the availability of food sources and rearing habitat for the Yellow River Carp. Elimination of floodplain inundation events caused loss of access to food and habitat opportunities on the floodplain. (2) A River2D hydraulic model was used to predict the area of suitable hydraulic habitat available to Yellow River Carp over the range of flows known to be relevant to the important life stages of the fish. The model showed that, following construction of Xiaolangdi Dam, significant reduction in frequency and duration of flows exceeding $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ had a negative effect on Yellow River carp eggs. The pattern of low flows did not change significantly after Xiaolangdi Dam construction, but this range of flows was found to be less important in terms of habitat provision for juvenile and adult fish compared to flow pulses and floods. (3) In order to restore the habitat for Yellow River Carp, it will be necessary to operate the flow and sediment releases from Xiaolangdi Dam to be sympathetic to the ecological requirements of the fish.

Key Words: impact; habitat; *Cyprinus (Cyprinus) carpio haematopterus Temminck et Schlegel*; Xiaolangdi Dam

小浪底水利枢纽位于黄河中游最后一个河段峡谷出口,控制了黄河流域面积的 92.3%、径流量的 91.5%、输沙量的 98%。小浪底水利枢纽工程是控制黄河下游水沙过程的关键工程,具有“以防洪、防凌、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,综合利用,除害兴利”的功能^[1],它的建成并投入运用,在黄河治理开发中具有十分重要的战略意义。小浪底水库 126 亿 m^3 的总库容和 75 亿 m^3 的淤沙库容可以对出库水沙进行有效的调节,显著改善下游河道的来水来沙过程,对下游地区防洪和工农业生产产生了积极的影响。

然而,兴建水利水电工程通常会产生诸多的生态环境问题,水库的修建往往会造成下游流域水文过程深刻而剧烈的变化,改变水流的自然循环,对河流水生态系统产生重要影响。鱼类做为水生态系统中的顶级生物群落,在生态系统中起着重要作用,水生态环境的各种变化最后都会在鱼类上得到响应。黄河鲤鱼是黄河最重要的鱼类资源,色艳味美,久负盛名,也是黄河下游的关键物种^[2]。黄河郑州段是黄河鲤鱼国家级水产种质资源保护区,其中黄河花园口河段是其重要的产卵场之一^[3]。小浪底水库对下游径流形势和河道形态的改变必然会对黄河下游的生态环境造成重要影响,从而也影响黄河鲤鱼的栖息繁衍。本文通过文献查阅和实地生态调查,了解黄河鲤鱼生态习性及与径流组分响应关系,分析水库对生态水文指标的影响,并选择黄河花园口黄河大桥下游 200m 处至下游约 1km 的河段为研究区域,建立黄河鲤鱼栖息地模拟模型,研究不同径流条件下黄河鲤鱼栖息地的变化及对黄河鲤鱼生存繁衍的影响,为黄河鲤鱼的保护及小浪底水库生态调度提供技术依据。

1 黄河鲤鱼的生态习性

黄河鲤鱼[*Cyprinus (Cyprinus) carpio haematopterus Temminck et Schlegel*]属鲤形目(*Cypriniformes*)。俗名鲤拐子。黄河鲤鱼多生于水的下层,适应性强,杂食性,以软体动物、水生昆虫、高等植物的种子和碎片为食。黄河鲤鱼成熟年龄雌性最早为 2 冬龄,一般为 3 冬龄;雄性最早为 1 冬龄,一般为 2 冬龄。黄河鲤鱼在各种水体中都能产卵,但喜产于多水草的缓流或静水中。表 1 是黄河鲤鱼在不同生命阶段的栖息地需求情况^[3-5]。

黄河鲤鱼生存繁衍受到黄河径流变化的影响,不同的径流组分对应着其不同的生命阶段,每一个流量组分对黄河鲤鱼栖息地环境及生态过程等都起着关键性作用。图 1 是 1952 年花园口站日径流过程线,从图可以看到,日径流过程线在年内可分为低流量、流量脉冲、高流量及洪水不同组分。低流量有 11—3 月份冬季低流量和 4—6 月份春季低流量,流量脉冲分别有 4 月初前后冰雪融水引起的流量及降雨引起的流量脉冲。不同流量组分的对鱼类有不同的生态意义:低流量(11—3 月份)保持河道持续的水流条件,维持河流低洼处一定水深,有利于黄河鲤鱼等过冬;低流量(4—6 月份)保持河道持续的水流条件,为鱼类生存游提供栖息地和通道;流量脉冲(4 月初)有利于扩展河流栖息地面积和食物来源,利于鱼类产卵;高流量(7—10 月份)有利于扩展河流栖息地面积和食物来源;洪水(7—10 月份,指漫滩洪水)中的高含沙水流可能导致鱼类缺氧死亡,但

提供更广阔的栖息地和食物来源。

表 1 黄河鲤鱼不同生命阶段栖息地需求

Table 1 Habitat requirement for Yellow River in different life stages			
成鱼生存栖息地要求 Habitat requirements for adult fish survival		幼鱼生存栖息地要求 Habitat requirements for juvenile fish survival	
水深 Depth/m	>1.5	水深 Depth/m	1—2
流速 Velocity/(m/s)	0.1—0.8	流速 Velocity/(m/s)	0.1—0.6
基底 Substrate	软底		
基底覆盖 Cover	草		
产卵栖息地要求 Reproductive requirements			
水深 Depth/m	> 1.0	产卵时间 Spawning season	4—6 月份
流速 Velocity/(m/s)	< 0.3 的缓流或静水中	产卵刺激 Spawning cues	水温 18—25℃ 和合适的产卵地
基底 Substrate	泥或砂	产卵持续时间 Incubation duration	1—3 d
基底覆盖 Cover	水草	食物 Diet	杂食性

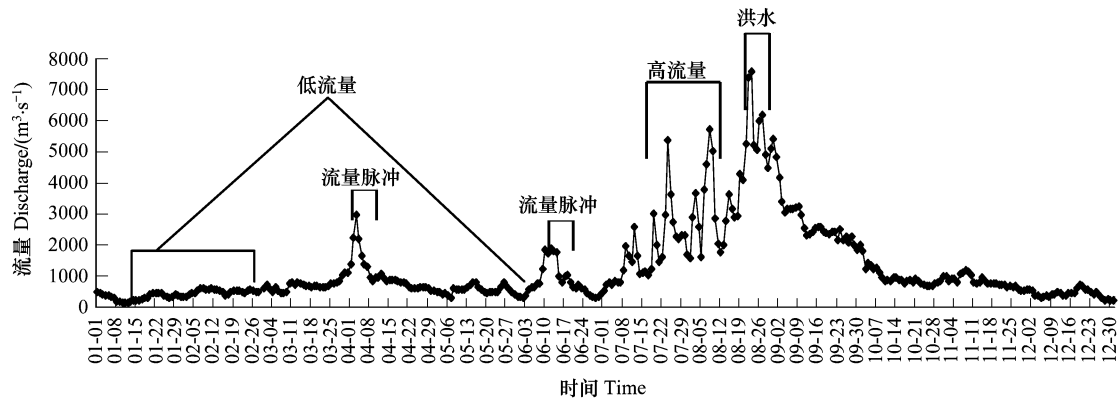


图 1 花园口站 1952 年日径流过程线
Fig. 1 Mean daily streamflow hydrograph in 1952 at Huayankou gauging station

2 小浪底水库运行对黄河干流水文要素的影响分析

2.1 表征径流变化的生态水文指标体系

水文过程相当复杂,涉及大量信息和数据,通过建立指标体系来研究复杂的生态水文过程是一种有效的分析手段。构建合理的黄河生态水文指标,就要了解黄河自身的特点。黄河的泥沙主要依靠洪水进行输送^[6-7],因此,要维持黄河通畅的河道,一定级别的洪水是不可或缺的;黄河属于资源性缺水地区,人类用水和生态用水之间矛盾比较突出,要维持黄河不算丰富但极具地方特色的水生生物,应该考虑它们越冬及生存需要的低限流量;黄河干流的鱼类在产卵季节,通常需要一定的流量脉冲来形成产卵栖息地,因此,适当的流量脉冲也是必需的,另外,农业用水占到黄河总用水量的 80% 以上,农业用水也有很强的季节性,也需要流量脉冲满足其用水需求。

根据黄河流域上述生态和经济用水特点,黄河生态水文指标应包括以下 5 个组成部分,即极低流量、低流量、脉冲流量、小洪水、大洪水,它们之间的关系如图 2 所示。表 2 阐述了各个生态水文指标的生态学意义。

2.2 小浪底水库对下游生态水文指标影响分析

图 3 是小浪底水库建设前 1987—1999 年和建库后 2000—2005 年平均日平均径流延时曲线,表 4—表 6 是

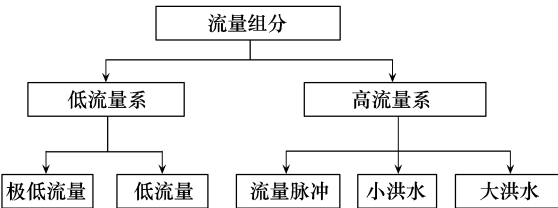


图 2 黄河下游生态水文指标
Fig. 2 Eco-hydrological indicators in the lower Yellow River

各项生态水文指标在 1987—1999 年和 2000—2005 年
建库前后两个不同阶段的变化。从图 3 可以看到,小浪
底水库建成以后,小于 10% 频率的洪水水量减少,同时
10%—30% 频率的小洪水或流量脉冲的水量也减少,大
于 80% 频率的平均低流量,基本上变化不大。从表 4—
表 6 可以看到,建库后最小 1、3、7d 的流量比建库前要
大,最小 1、3、7、30、90d 的流量建库后比建库前要小,但
减少的不是很显著;冬 5 月份低流量建库后比建库前也
有所减少;流量脉冲、小洪水和漫滩洪水减少明显,流量
脉冲从建库前年均 1.9 次减少到 0.8 次,小洪水从建库
前年均 5.5 次减少到 2.2 次,漫滩洪水从建库前年均
1.2 次减少到 0.2 次。

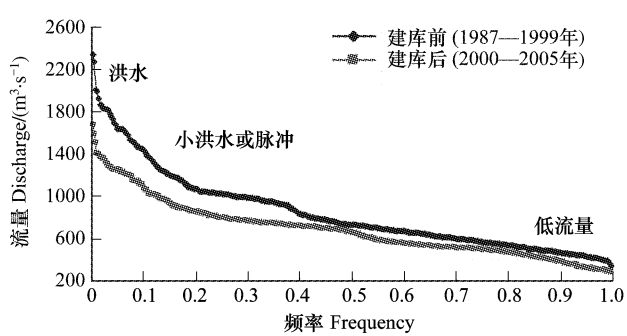


图3 小浪底水库建库前 1987—1999 年和建库后 2000—2005 年
日平均径流延时曲线

Fig. 3 Daily average runoff delay curve compare before (from
1987 to 1999) and after (from 2000 to 2005) construction of
Xiaolangdi dam

表 2 不同流量组分对河流生态系统的作用

Table 2 River ecosystem significance of different flow components

流量组分 Flow component	对水生生物的生态学意义 The ecological significance for aquatic organisms
极低流量 Extreme flows	保持河道持续的水流条件,为水生生物提供维持生存的必要栖息地和觅食空间
低流量 Low flows	保持河道持续的水流条件,维持河流低洼处一定水深,有利于鱼类等过冬
流量脉冲 Flow pulse	为鱼类的迁移和产卵提供必要的提示;为幼鱼的成长提供场所;决定河漫滩植物的分布及丰度;为水生动物提供食物;满足农业用水要求
小洪水 Small floods	小洪水不是漫滩洪水,有利于扩展河流水生生物栖息地面积和食物来源
大洪水 Large floods	漫滩洪水,有利于河道冲刷,高含沙水流可能导致鱼类缺氧死亡,但提供更广阔的栖息地和食物来源

表 4 花园口断面年极端流量随时间变化的结果

Table 4 Result about the extreme flows change with time/(m³/s)

年份 Year	最小 1d Minimum 1d	最小 3d Minimum 3d	最小 7d Minimum 7d	最小 30d Minimum 30d	最小 90d Minimum 90d	最大 1d Maximum 1d	最大 3d Maximum 3- day	最大 7d Maximum 7d	最大 30d Maximum 30d	最大 90d Maximum 90d
1987—1999	142.1	153.8	180.3	307.5	527.0	4397.7	3673.8	2990.7	2106.6	1541.9
2000—2005	181.3	194.8	205.1	231.4	362.1	2563.3	2433.5	2331.8	1757.7	1215.2

冬 5 月份低流量的减少,降低了河流低洼处的水
深,影响了鱼类过冬;4—6 月份流量脉冲消失或减
少,黄河鲤鱼产卵缺乏足够的产卵栖息地;7—10 月份
小洪水减少,食物来源和栖息地减少;7—10 月份漫滩
洪水减少和消失,黄河鲤鱼失去从河滩地获得食物和
栖息地机会,但高含沙洪水也会导致黄河鲤鱼死亡率
的增加。

3 小浪底建库后黄河鲤鱼栖息地面积变化的二维数 学模拟

本文运用 River2D 模型(河流水动力学和鱼类生

表 5 不同时期花园口断面冬 5 月低流量平均值

Table 5 Average low flow from Nov. to Mar. at Huayankou
station in different periods /(m³/s)

月份 Month	1987—1999	2000—2005
11	563.9	537.1
12	587	488.6
1	456.5	360.3
2	510.9	357.5
3	820	679.8

境的二维模型,是2002年以来加拿大 Alberta 大学研制开发的水力和鱼类栖息地模拟的应用软件)研究河流局部的流速和深度分布以及确定流量与鱼类可用栖息地的关系^[8]。River2D 河流模拟系统是由 R2D_Bed、R2D_Mesh、R2D_Ice 和 River2D 等4个子模块构成,每1个模块都有其特定的功能。R2D_Bed、R2D_Mesh 和 R2D_Ice 是前处理模块,River2D 程序是整个模拟系统的主体,它可以根据以上几个模块提供的生成文件来模拟稳态和瞬时状态下的流速分布,可以计算鱼类栖息地的可用面积,输出任意点的流速、水深、粗糙度、河道指数等值以及各种计算图件。本研究以黄河下游花园口断面为例说明模型对河道的水力特征的模拟。2009 年5月对研究河段黄河下游的花园口黄河大桥下游200m处至下游约1km的河段进行了河道地形的测量,共设置10个断面,1000多个测量点。

表6 花园口断面流量脉冲、小洪水和漫滩洪水在不同时期的变化

Table 6 The change of flow pulse, small flood and floodplain flood at Huayuankou station in different periods

生态水文指标 Eco-hydrological indicators	年份 Year	累计次数 Total Times	平均次数 Average times	平均历时 /d Average duration	平均峰值 /(m ³ /s) Average peak discharge	最长历时 /d Longest duration	最大峰值 /(m ³ /s) Maximum peak discharge
4—6 月份的流量脉冲 Flow pulse	1987—1999	25	1.9	10.68	1524.80	45	3110
	2000—2005	5	0.8	9.00	1598.00	15	2840
小洪水 Small flood	1987—1999	71	5.5	6.4	1964	51	5060
	2000—2005	13	2.2	11.3	2173	34	3100
漫滩洪水 Overbank flood	1987—1999	15	1.2	11	4215.3	42	7270
	2000—2005	1	0.2	14	3050.0	14	3050

本研究模拟了从100—4000 m³/s 共25种流量下流速、水深的分布,其中100—1000 m³/s 之间的间隔为100,1000—4000 m³/s 间隔为200。图4显示了流量为1000 m³/s 时的模拟结果。

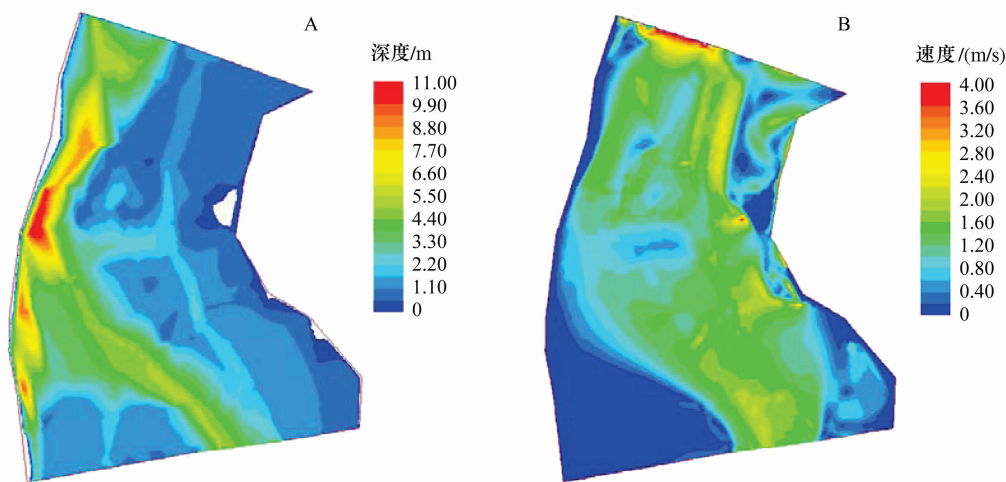


图4 流量为1000 m³/s 时水深、流速的模拟结果

Fig. 4 The simulation result for depth and velocity of 1000 m³/s discharge

不同流量下的模拟河段流速大小及分布和水深分布均与实际情况基本相符,但在流量低于100 m³/s 时,模拟结果与实际差别较大。总体来说,此模型基本能模拟出给定流量下的水流分布,在黄河下游应用具有较好的实用性。

从 River2D 中导出所计算的各种工况的水力结果(包括点坐标,水深,流速等信息),把它们导入 ArcGIS 中,然后每种栖息地类型根据水深、流速分别生成水深和流速的图层。最后图层叠加就可以生成既满足水深,

又满足流速条件的底栖动物栖息地面积和其分布范围。

按照黄河鲤鱼的生活习性把栖息地分为 3 部分来模拟,一是成鱼的栖息地;二是幼鱼的栖息地;三是产卵期间的栖息地。图 5 为流量为 1000 m³/s 时产卵期间的栖息地模拟过程。图 6 和图 7 分别为满足幼鱼和成鱼的栖息条件的栖息地分布。

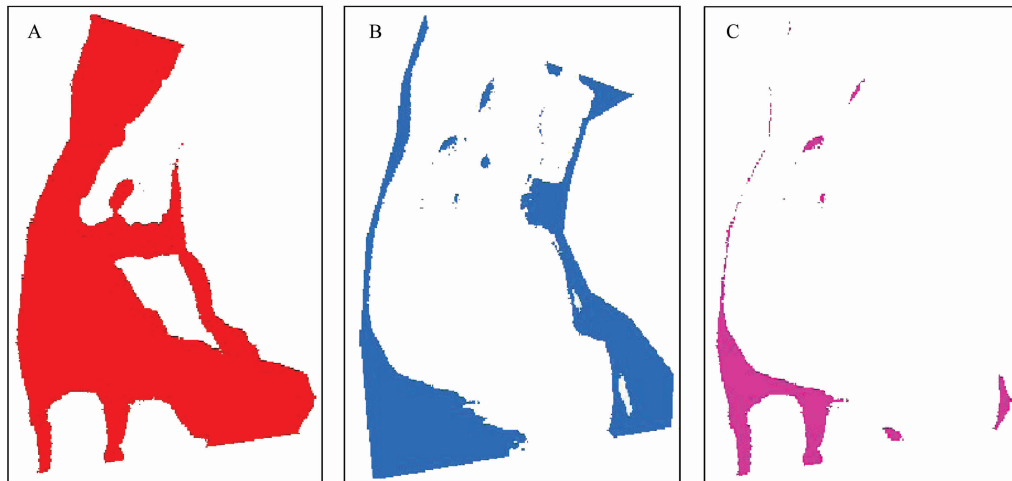


图 5 产卵期间栖息地模拟过程

Fig. 5 Habitat simulation process spawning habitat

A 为满足水深条件的栖息地分布;B 为满足流速条件的栖息地分布;C 满足水深和流速条件的栖息地分布



图 6 幼鱼栖息地分布

Fig. 6 The habitat distribution of juvenile fish



图 7 成鱼栖息地分布

Fig. 7 The habitat distribution of adult fish

表 7 列出了 25 组流量下鱼类 3 种栖息地面积的变化。通过比较不同流量下各种栖息地面积所占比例的变化,可以看出产卵期间(4—6 月份)流量达到 1400 m³/s 时,栖息地面积就会显著增大,说明在该河段为了使黄河鲤鱼产卵期间有较大的适宜栖息地,流量要达到 1400 m³/s;建库后大于 1400 m³/s 流量的显著减少,影响了黄河鲤鱼的产卵。

从成鱼的栖息里面积变化来看,流量为 200—1000 m³/s 期间成鱼的适宜栖息地面积变幅不大,流量为

1800—2200m³/s 时,适宜成鱼生存的栖息面积达到最大值。在 11—3 月份这个时间段,河流主要为鱼类提供过冬的栖息地,200—1000m³/s 的流量完全可以满足,考虑到黄河水量的实际情况及鱼类生存的需求,200 m³/s 左右的流量为花园口段鱼类需水的低限条件。从幼鱼的栖息地面积变化来看,超过 2200m³/s 时,适宜栖息地面积会快速下降,所以在幼鱼生长阶段流量不能超过 2200m³/s。800m³/s 以下的流量会为幼鱼提供较大的适宜栖息地。幼鱼生长期在 4 月份以后,因此,幼鱼生长期的流量以不大于 800m³/s 为宜。建库后花园口低流量变化不明显,因此,建库对成鱼和幼鱼生存的影响不大。

表 7 不同流量下黄河鲤鱼不同生命阶段栖息地面积变化

Table 7 changes of habitat area for Yellow River Carp in different life stage and discharge

流量/(m ³ /s) Discharge	产卵/m ² Spawning/ m ²	成鱼/m ² Adult fish	幼鱼/m ² Juvenile fish	流量/(m ³ /s) Discharge	产卵/m ² Spawning	成鱼/m ² Adult fish	幼鱼/m ² Juvenile fish
100	9419	6087	5996	200	6623	13338	4060
300	6093	11494	4042	400	6614	12967	5335
500	6506	11569	5814	600	8018	11772	5021
700	7768	11180	5750	800	8437	12402	6479
900	8752	11939	6701	1000	10477	10930	5405
1200	9872	8996	5069	1400	22027	8320	3292
1600	23822	7419	4794	1800	22240	17026	8900
2000	23625	12448	4800	2200	25287	41365	2302
2400	35709	24362	799	2600	37494	26272	389
2800	37892	25892	275	3000	40874	30940	66
3200	39626	29347	72	3400	41224	30757	33
3600	40356	30536	39	3800	41203	28967	24
4000	41338	27790	27				

4 结论

本文通过建立河流水文生态指标体系及 River2D 模型,研究小浪底水库对黄河鲤鱼生存繁衍的影响,主要结论如下:

(1) 径流的流量组分与黄河鲤鱼的生态习性有密切的相关关系,小浪底水库的运行显著改变了水文生态指标的流量脉冲、小洪水及大洪水,流量脉冲消失或减少使得黄河鲤鱼产卵缺乏足够的产卵栖息地;小洪水减少使黄河鲤鱼的食物来源和栖息地减少;漫滩洪水减少和消失使黄河鲤鱼失去从河滩地获得食物和栖息地机会。

(2) 通过建立 River2D 模型,得到了不同流量下黄河鲤鱼在不同生命阶段栖息地面积的变化情况,研究表明,在 4—6 月份,建库后大于 1400 m³/s 流量的显著减少,影响了黄河鲤鱼的产卵;建库后花园口低流量变化不明显,建库对成鱼和幼鱼生存的影响不大。因此,小浪底水库建成运行对黄河鲤鱼的产卵影响比较显著。

(3) 小浪底水库的建成运行改变了水库下游的水文过程,进而影响了黄河鲤鱼生存和繁衍的栖息环境。要恢复黄河鲤鱼的产卵栖息地,在小浪底水库的调度运行中要兼顾黄河鲤鱼的生态需求。

References:

- [1] Zhou Z M. The effect of XiaoLangdi projects on eco-environment of wetlands in the lower reaches of the Yellow River. *ShuiLiXueBao*, 2007(10): 511-514.
- [2] Jiang X H, Liu X Y, Zhang S G, Zhang W G. Identify keystone species in the mainstream of Yellow River. *Yellow River of People*, 2005, 27 (10): 1-3.
- [3] Feng J X, Zhang X R, Yang T Y, Cui Z B. The People's Republic of China Fisheries Industry Standard, Yellow River Carp. *Henan Fisheries*, 2003(1): 32-33.
- [4] Wang Y F, Yang, L B. Resources and biology of the Yellow River carp in the Yellow River in Shangdong province. *Transactions of Oceanology and*

Limnology, 1986(1):43-46.

- [5] Zhang Y S. The Growth of the Carp at Tongguan Region Before and after the Filling of the Sanmenxia Reservoir. *Acta Zoologica Sinica*, 1965,17(1):38-47.
- [6] Shen G Q, Jiang N Q, Li Y, Xiang H X, Li X P. Research on water volume of sediment transport and the calculating method in the lower Yellow River. *Advances in Water Science*, 2006, 17(3):407-413.
- [7] Shen G Q, Zhang Y F, Xiang H X. The Flood Response Mechanism and Laws of Sediment Transport in the Lower Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2007:10-15.
- [8] Parasiewicz P, Dumbar M J. Physical habitat modeling for fish: A developing approach. *Archiv fur Hydrobiologie Supplement*, 2001, 135: 239-268.

参考文献:

- [1] 周振民. 黄河小浪底工程对下游湿地生态环境影响研究. *水利学报*,2007(10):511-514.
- [2] 蒋晓辉,刘晓燕,张曙光,张文鸽. 黄河干流水生态系统关键物种的识别. *人民黄河*,2005, 27(10):1-3.
- [3] 冯建新,张西瑞,杨太有,崔宗斌. 中华人民共和国水产行业标准 黄河鲤鱼. *河南水产*, 2003(1):32-33.
- [4] 王育峰,杨立帮. 山东黄河鲤鱼的生物学及资源状况. *海洋湖沼通报*,1986(1):43-46.
- [5] 张玉书. 三门峡水库潼关地区蓄水前后鲤鱼的生长. *动物学报*,1965,17(1):38-47.
- [6] 申冠卿,姜乃迁,李勇,尚红霞,李小平. 黄河下游河道输沙水量及计算方法研究. *水科学进展*,2006, 17(3):407-413.
- [7] 申冠卿,张原锋,尚红霞. 黄河下游河道对洪水的响应机理与泥沙输移规律. 郑州:黄河水利出版社,2007:10-15.