DOI:10.15928/j.1674-3075.202101190013

基于四大家鱼产卵需求的汉江中下游生态流量研究

张 辉[1,2],曾晨军[1,2],李 婷[1,2],何术锋[1,2],莫康乐[1,2],杨培思[1,2],陈求稳[1,2]

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029;
2. 南京水利科学研究院 生态环境研究所,江苏 南京 210029)

摘要:针对汉江中下游梯级电站开发后水文节律变化造成四大家鱼栖息地生境质量降低的问题,分别通过几种常用水文学法和栖息地模型计算了汉江中下游河道最小生态流量和四大家鱼产卵适宜生态流量,并在最小生态流量的基础上,结合四大家鱼产卵适宜生态流量以及生态水文特征在5-8月进行了脉冲设计,综合确定满足四大家鱼产卵需求的生态流量过程。结果表明,Lyon法和7Q10法最适宜汉江中下游最小生态流量的计算,流量为294~863 m³/s;通过栖息地模型计算,彭市和仙桃江段四大家鱼产卵适宜生态流量为1 233~3 950 m³/s;流量日涨幅在139.1~534.8 m³/s,持续5 d的涨水过程可为四大家鱼产卵提供良好的条件。该研究从四大家鱼产卵需求的角度考虑,为汉江中下游梯级电站的生态调度提供科学参考。

关键词:汉江中下游;四大家鱼;生态流量;水文学法;栖息地模型

中图分类号:Q143 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2022)03-0001-08

汉江是长江最大的支流,蕴含着十分丰富的渔业资源。汉江中下游鱼类约79种,包括青鱼、草鱼、鲢、鳙(四大家鱼)等多种重要的经济鱼类(何力等, 2007)。受梯级水利枢纽工程的影响,汉江中下游的水文情势以及原有水生生境发生了明显变化,对汉江中下游鱼类繁殖、特别是对产漂流性卵鱼类的繁殖产生了较大的影响,其中产卵行为对水文条件需求较严格的四大家鱼受影响尤为明显(李修峰等, 2006a);同时,引江济渭入黄工程的建设和运行可能会进一步影响下游的生态环境质量(常福宣等, 2008),导致鱼类栖息地萎缩及栖息地质量下降,影响水生生物的生存繁殖并造成资源量的降低。河流生态环境保护已成为汉江中下游河道迫切需要解决的问题。生态流量是保障河流生境健康的根本,合理估算河流生态流量,对于汉江渔业生态环境的恢复具有重要意义。

评估河道生态流量本质上是求解河道中流量阈值的问题(钟华平等, 2006);其中,最小生态流量是保证河道生态系统功能正常运行所需要的流量,在我国通常采用水文学法和水力学法计算,此类方法是以河流水文情势或水力学特性为依据,对现场资料和实测数据的需求较低。但这类方法缺乏生态学依据,因此难以就水量变化对生态的影响进行定量评估(杨志峰和张远, 2003),水生生物在不同时期对水量的需求往往难以满足。栖息地模型是对水力学法的进一步发展,1982年由美国鱼类和生物服务调查中心提出,其将水动力模型和生物习性结合,建立流量与目标物种适宜栖息地面积之间的定量关系,从而确定满足生物习性不同时期需求的适宜生态流量,具有明确的物理意义。目前西方国家最广泛使用的方法有IFIM法(PHABSIM模型)、CASMIR法等(徐宗学等, 2016)。

近年来,众多学者针对河流生态流量的理论和计算方法开展了研究。常福宣等(2008)通过比较水文学与水力学方法计算结果,同时考虑引水济渭入黄调水需要,认为90%保证率的最小月均流量是维持汉江上游河道生态健康基本需求的推荐流量,但缺乏与生物学的结合,对鱼类繁殖、越冬等重要习性的响应关系不明确;李建和夏自强(2011)采用IFIM法,通过结合水动力模型与四大家鱼适宜性曲线,计算出长江中游不同流量下四大家鱼产卵场加权适宜栖息地面积,确定了最低以及适宜四大家鱼繁殖的河流生态流量阈值。但产漂流性卵鱼类的繁殖行为不仅与河道内流量大小有关,涨落水率、历时时间等生态水文特征也是影响鱼类产卵的重要因素(史方方和黄薇, 2009);张晓敏等(2009)通过野外观测发

收稿日期:2021-01-19 **修回日期**:2021-08-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502205);国家杰出青年科学基金项目(51425902)。

作者简介:张辉,1996年,男,硕士研究生,研究方向为生态水力学。E-mail:1075238918@qq.com

通信作者:莫康乐,1987年,女,高级工程师,主要从事生态水力学研究。E-mail:klmo@nhri.cn

现，洪水过程对鱼类自然繁殖有明显的促进作用，而目前丹江口水库泄水形成的洪水刺激对四大家鱼繁殖的作用有限。因此，有必要针对汉江中下游河道四大家鱼产卵需求的生态流量展开研究。

本文采用几种常用水文学法计算汉江中下游最小生态流量，并通过 Tennant 法检验比选；以四大家鱼为研究对象，采用 PHABSIM 模型对局部产卵场鱼类产卵适宜生态流量进行推求；结合四大家鱼产卵适宜生态流量和生态水文特征对 5–8 月的最小生态流量进行脉冲设计，确定出满足四大家鱼产卵需求的生态流量过程，以期为保护四大家鱼资源、优化汉江中下游梯级水库生态调度提供依据。

1　材料与方法

1.1　区域概况

汉江中下游（30°30′~32°36′N，11°24′~115°18′E）全长 652 km，多年平均流量达到 247 亿 m^3，河床宽浅、河曲发育，为鱼类提供了良好的栖息环境。自 20 世纪 70 年代丹江口水库建成后，汉江中下游存在王甫洲、襄樊、茨河等 9 处四大家鱼产卵场，其卵苗径流量达到 9 亿（粒）尾（周春生等, 1980）。随着汉江中下游梯级水利枢纽的修建，至 2014 年汉江中游四大家鱼产卵场基本上处于消失的状态（李修峰等, 2006a）。汪登强等（2019）推测汉江中下游潜江至汉川江段目前尚存泽口、张港、彭市和仙桃段 4 处四大家鱼产卵场，产卵规模分别为 0.02 亿、0.05 亿、0.33 亿和 0.21 亿粒，其中彭市和仙桃段四大家鱼的鱼卵径流量达到总量的 88.52%。本文选取 2018 年产卵规模较大的岳口镇下游至彭市镇约 11 km 江段（彭市段）和多祥镇至仙桃市约 16 km 江段（仙桃段）作为研究河段，对满足四大家鱼产卵需求的生态流量过程进行计算。四大家鱼产卵场分布见图 1。



图 1　汉江中下游四大家鱼主要产卵场分布

Fig.1　Location of primary spawning sites of the four major Chinese carps in the mid-lower Hanjiang River

1.2　数据来源

考虑到水文学法需要长期连续的水文数据，本研究采用仙桃与汉川水文站 1960–2018 年逐日平均水位、流量资料（湖北省水文水资源局，1960–2018）。由于产卵场所在江段缺少详细的断面水文资料，因此通过建立潜江至汉川段一维水动力模型（王领元, 2007），推求出彭市段与仙桃段四大家鱼产卵场的精确水位–流量关系曲线。模型上下游边界分别为岳口和汉川断面，由于上游岳口面缺少流量数据，且岳口至仙桃段无大型支流的汇入和流出，因此可采用仙桃站流量数据近似作为上游边界数据，下游断面采用汉川水位数据。经率定糙率系数设置为 0.032，并采用仙桃站水位数据对模型进行验证，相对误差在±3.7% 以内，模拟精度可满足要求。根据计算结果读取彭市段与仙桃段鱼类产卵场水位–流量数据，并绘制图 2。

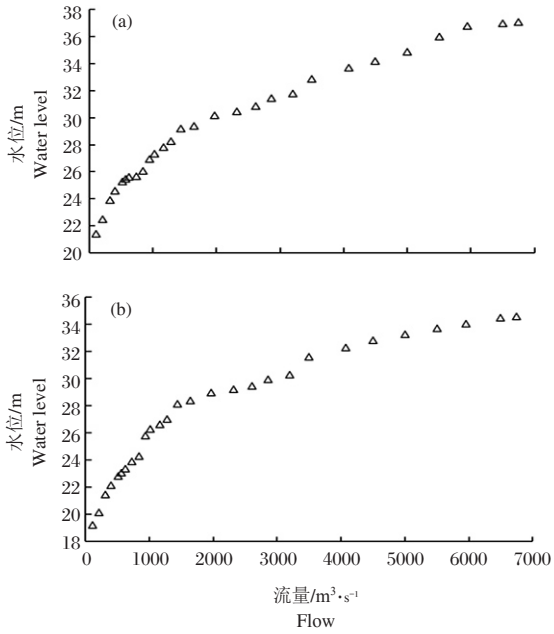


图 2　彭市段（a）和仙桃段（b）四大家鱼产卵场水位–流量关系

Fig.2　Relationship between water level and flow rate of the spawning grounds of the four major Chinese carps in Pengshi and Xiantao reaches

1.3　研究方法

1.3.1　水文学法　彭市与仙桃四大家鱼产卵场江段距仙桃水文站较近，且区间内无大型支流的汇入和流出。因此，两处产卵场的最小生态流量可采用仙桃水文站数据进行计算和表征。本文通过收集整理汉江中下游仙桃水文站 70 多年的逐日流量资料，采用流量历时法（门宝辉等, 2012）、逐月最小径流法、

7Q10法(张强等, 2010)、Lyon法(葛金金等, 2019)计算汉江中下游岳口至仙桃江段的最小生态流量,并采用Tennant法(郭利丹等, 2009)对这4种方法的计算结果进行对比检验(表1),确定出适宜该江段的最小生态流量。

表1　生态流量与河流生境健康关系

Tab.1　Relationship between ecological flow and river habitat health

栖息地定性描述	生态流量占多年平均流量/%	
	一般用水期(10-3月)	鱼类产卵育幼期(4-9月)
最大	200	200
最佳范围	60~100	60~100
极好	40	60
很好	30	50
良好	20	40
一般或较差	10	30
差或最小	10	10
极差	<10	<10

1.3.2　栖息地模型法　(1)二维水动力模型。由于本研究江段水平方向尺度远远大于垂直方向,所以适宜采用深度平均的平面二维浅水方程来描述区间水流特性,以推求出不同水文条件下产卵场范围内流速和水深分布。二维水动力模型详细推导过程参考赵尚飞等(2019)。彭市段和仙桃段模型均采用非结构化三角形网格,由于研究区段位于河道的转弯段,河流形态较复杂,采用三角形网格能够更好地贴合实际地形。模型上下游分别采用流量和水位边界,彭市段模型上游边界为岳口镇断面,下游边界为彭市镇断面;仙桃段模型上游边界为多祥镇断面,下游边界为仙桃市断面,其水位、流量资料均由一维水动力模型推算得到,具体网格划分信息及模型参数见表2。

表2　模型网格划分及参数确定

Tab.2　Division of model grid and determination of model parameters

江段	网格节点/个	网格数量/个	网格最小角度/°	时间步长/s	河床糙率
彭市段	1605	2918	30	1.0	0.032
仙桃段	3006	5532	30	0.5	0.032

(2)栖息地模型。以水动力模型计算结果为基础,通过耦合目标物种的栖息地适宜性曲线,计算各单元所对应栖息地适宜性指数,再将各计算单元栖息地适宜性指数和单元面积相乘,计算得出加权适宜栖息地面积(WUA),从而建立不同流量和目标物种适宜栖息地面积之间的关系(谭燕平等, 2011)。公式如下:

$$\mathrm{WUA} = \sum_{i}^{n} \mathrm{CSF}_i[V_i, D_i, C_i] \cdot A_i \qquad ①$$

PHABSIM模型采用几何平均法:

$$\mathrm{CSF}_i = \sqrt[3]{V_i \cdot D_i \cdot C_i} \qquad ②$$

式中:WUA为研究区域加权适宜栖息地面积,CSF_i为第i个单元格的栖息地适宜性指数,V_i、D_i和C_i分别为第i个单元格的流速、水深与河道底质的产卵适宜度指数,其范围均由0到1,表示适宜性从最差到最佳;A_i为第i个单元格的水平面积,n为计算单元格数量。

四大家鱼产卵行为主要受水深和流速的影响。由于河流底质资料可获得性不足以及产卵场区段长度较短,本文无法判定底质等指标的影响,假定其无明显差异,仅将水深和流速作为主控因素纳入研究,以推求出汉江中下游四大家鱼主要产卵江段的产卵适宜生态流量。

(3)四大家鱼栖息地适宜性曲线。四大家鱼繁殖期产卵场的生境质量将直接影响汉江中下游鱼类资源,其在繁殖期间(5-8月)通常需要一定的流速刺激和水深条件,本文综合目前栖息地适宜性指标的相关研究成果(郭文献和夏自强, 2007;李建和夏自强, 2011;林俊强等, 2015;周华彬等, 2020),确定四大家鱼产卵最佳流速为0.8~1.3 m/s,极限流速为3.0 m/s。漂流性鱼卵需要在水中悬浮一定的时间才能孵化成具备生存能力的幼苗,流速低于0.25 m/s会导致鱼卵下沉死亡,降低卵苗发育量,同时0.25 m/s也适宜作为刺激鱼类产卵的最低流速;最佳水深为6.5~12.0 m,适宜水深为3.0~20.0 m,流速和水深过大或过小都会降低产卵适宜性(图3)。

1.3.3　流量脉冲设计原则　四大家鱼繁殖期除了需要一定的流速刺激和水深条件等生境要素,洪峰脉冲大小、日涨水率、涨水持续时间、出现次数等同样是影响其产卵行为的重要水文指标。有调查表明,江水涨水过程常常伴随着四大家鱼苗汛的出现(邱顺林等, 2002);结合以往对汉江中下游四大家鱼产卵适宜生态水文特征的研究(余志堂, 1982;李修峰等, 2006a;谢文星等, 2009;张晓敏等, 2009),涨水持续时间3~8 d、水位上涨率在0.44~1.50 m/d为宜,涨水时间和涨幅过大或过小均对鱼类产卵行为不利。

本研究以四大家鱼产卵适宜生态水文特征为约束条件,以栖息地模型结果为洪峰流量限制区间,在水文学法结果的基础上,对5-8月繁殖期生态流量进行流量脉冲设计,确定出满足四大家鱼产卵需求的生态流量过程。

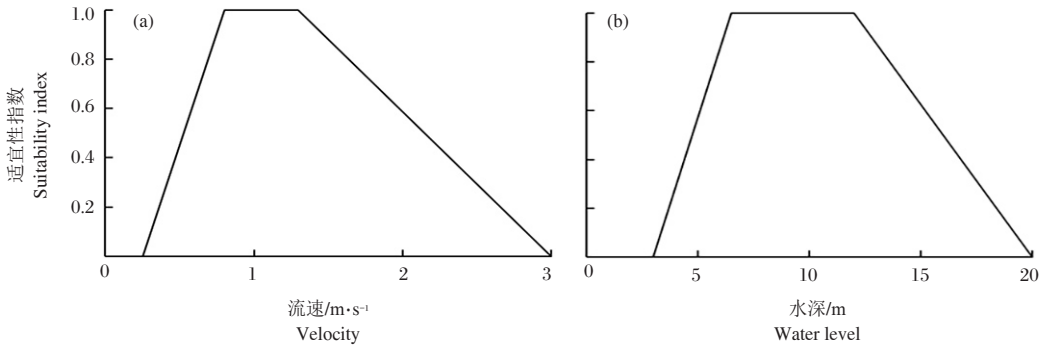


图3 四大家鱼产卵适宜性指数与流速(a)和水深(b)的关系

Fig.3 Relationship of the spawning suitability index for four major Chinese carps with flow velocity and water depth

2 结果与分析

2.1 汉江中下游最小生态流量计算

汉江中下游径流量在1–6月逐渐增加，7–9月为主汛期，10–12月迅速减小，主汛期3个月的径流量占全年总量的39.9%(表3)。除逐月最小径流法之外，各水文学法计算结果在1–4月处于较低的水平，4–7月呈明显的上升趋势，最大值通常出现在7–8月，随后开始逐渐下降。逐月最小径流法计算结果的月均流量峰值出现在9–12月，不能反映河道径流的季节性变化规律，与该区域水生生物的主要需水时段存在一定的滞后性，而径流交替变化的水文特征具有相应的生态响应和特定生态作用(李捷等, 2007)。因此，逐月最小径流法不适用于汉江中下游生态流量的计算。7Q10法、流量历时曲线法和Lyon法计算结果相近，为294~863 m^3/s，各月最小生态流量占多年月均流量的30.0%~62.3%。其中流量历时曲线法在4–9月低于其他两种方法，且在一般用水期的计算值总体偏高，也不能很好地反映汉江中下游的天然水文情势；Lyon法和7Q10法计算结果季节性区分明显，丰水期各月最小生态流量占多年月均流量的30.0%~48.2%，处于Tennant法评价的“一般”和“很好”级别之间，能够维持适宜鱼类觅食和活动的栖息地生态系统(郭利丹等, 2009)。因此认为Lyon法和7Q10法更适宜汉江中下游河道最小生态流量的计算。

2.2 四大家鱼产卵适宜生态流量模拟

根据仙桃水文站1960–2018年的逐日流量资料，在汉江中下游四大家鱼繁殖期5–8月的月均流量为280~6 096 m^3/s，模拟工况范围从123~6 787 m^3/s，模拟流量范围基本涵盖了研究河段的实际流量。

根据彭市段和仙桃段不同流量下栖息地模拟结果(图4)，建立四大家鱼适宜栖息地面积与流量关系(图5)。在123~1 233 m^3/s流量范围内，彭市段和仙桃段适宜栖息地面积随流量的增加而快速增长。低流

表3 几种水文学法的最小生态流量计算结果

Tab.3 Calculation of ecological flow using four hydrological methods

月份	实测多年平均流量/$m^3 \cdot s^{-1}$	逐月最小径流法		7Q10法		流量历时曲线法		Lyon法	
		计算值/$m^3 \cdot s^{-1}$	占比/%	计算值/$m^3 \cdot s^{-1}$	占比/%	计算值/$m^3 \cdot s^{-1}$	占比/%	计算值/$m^3 \cdot s^{-1}$	占比/%
1	729	211	28.9	307	42.1	454	62.3	323	44.3
2	693	220	31.8	389	56.1	428	61.8	316	45.5
3	742	300	40.5	322	43.4	460	62.0	324	43.7
4	917	291	31.8	294	32.0	465	50.7	326	35.6
5	1219	280	23.0	470	38.6	432	35.4	486	39.9
6	1216	394	32.4	585	48.2	478	39.3	525	43.2
7	2040	378	18.5	614	30.1	612	30.0	740	36.3
8	1945	459	23.6	863	44.4	682	35.1	720	37.0
9	1917	555	29.0	575	30.0	578	30.2	675	35.2
10	1608	511	31.7	552	34.3	548	34.1	487	30.2
11	986	480	48.7	528	53.6	532	53.9	328	33.2
12	791	280	35.4	478	60.3	469	59.3	318	40.1

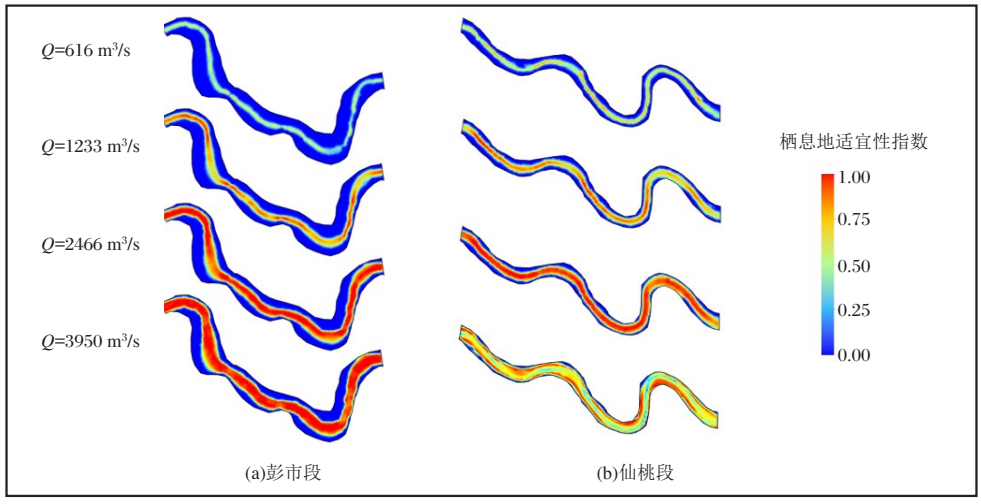


图4　不同河段典型流量条件下四大家鱼适宜栖息地分布

Fig.4　Distribution of suitable habitats for the four major Chinese carps under typical flow conditions in different reaches of the mid-lower Hanjiang River

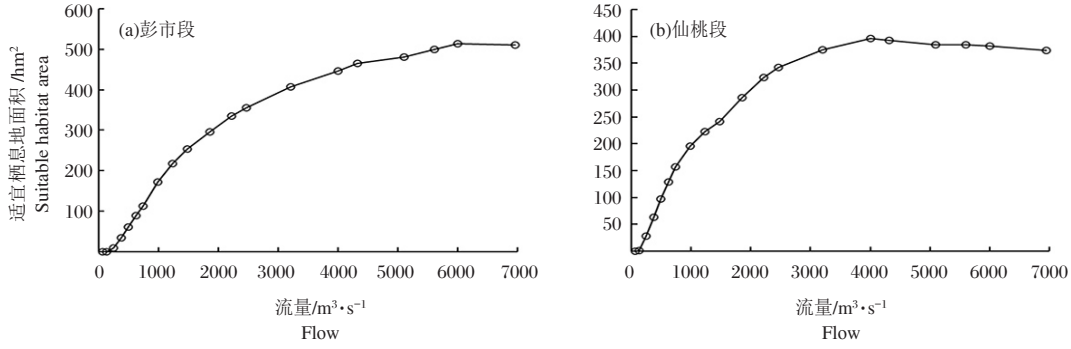


图5　不同河段四大家鱼适宜栖息地面积与流量关系

Fig.5　Relationship between suitable habitat area of the four major Chinese carps and flow rate in different reaches of the mid-lower Hanjiang River

量时,栖息地适宜空间主要集中在河道中部流速和水深较大的区域,并随流量的增大,逐渐向河岸两边延展。当流量超过 1 233 m³/s 时,彭市段适宜栖息地面积随流量的增加而增大,但其增长速率逐渐减小,适宜空间在河道中的分布较均匀;当达到一定流量,仙桃段栖息地中部流速过快,适宜栖息地范围逐渐转变为以近岸为主,适宜栖息地面积呈现出先增加后减小的现象,在 3 950 m³/s 左右达到最大。结合两段产卵场适宜栖息地面积与流量响应关系,认为在繁殖期刺激四大家鱼产卵的适宜生态流量应为 1 233~3 950 m³/s。

2.3　考虑生态水文特征的生态流量过程

通过水文学法和栖息地模型计算结果,并结合四大家鱼产卵适宜生态水文特征,确定满足四大家鱼产卵需求的生态流量过程(图6)。其中,水文学法结果取 Lyon 法和 7Q10 法计算均值。在四大家鱼繁殖期间共设计 3 次洪水脉冲过程(表4),分别为5月下旬、6月下旬和8月上旬,单次调度持续时间均为5 d,3 次人造洪峰的流量日涨幅分别控制在 133.0~553.8 m³/s、108.2~534.8 m³/s 和 139.1~554.2 m³/s。

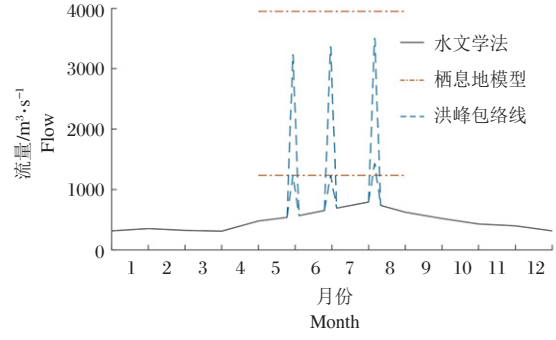


图6　考虑四大家鱼繁殖期生态水文特征的生态流量过程

Fig.6　Ecological flow considering eco-hydrological characteristics during the breeding period of the four major Chinese carps

表 4 四大家鱼繁殖期人造洪峰水文特征值

Tab.4 Hydrological characteristic values of artificial flood peaks during the breeding period of four major Chinese carps

洪峰过程（日期）	起算流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	流量下限/ $m^3 \cdot s^{-1}$	流量上限/ $m^3 \cdot s^{-1}$	流量日涨幅/ $m^3 \cdot s^{-1}$
第一次洪峰（05-25）	540.2	1233.0	3786.3	133.0~553.8
第二次洪峰（06-25）	656.7	1233.0	3366.0	108.2~534.8
第三次洪峰（08-01）	795.2	1431.5	3508.1	139.1~554.5

3 讨论

3.1 生态流量结果对比及其与产卵流量的关系

水文学法主要通过历史水文数据确定最小生态流量，虽然能够在一定程度上反映河道天然水文节律，但忽略了流量过程和生物需求之间的相互影响（钟华平等, 2006），往往只能保障河道的基本水生生境健康。本研究采用的几种常用水文学法计算结果最大值仅有 863 m^3/s，但在栖息地模型结果中可以看出，该流量下栖息地生境质量仍处于较差且快速提升的状态。根据以往鱼类早期资源调查（谢文星等, 2009；万力等, 2011），通常汉江中下游发生流量超过 2 000 m^3/s 时才会出现明显产漂流性卵鱼类的卵苗，而水文学法计算结果远远小于四大家鱼卵苗出现时的流量需求。在 Tennant 法评价中，当河道内流量超出多年平均流量的 200% 时，认为会对生态系统的发展产生不利影响（张强等, 2010）。但栖息地模型结果显示，彭市和仙桃产卵场江段的适宜生态流量达到了多年平均流量的 200%~320%。从保障四大家鱼产卵流量需求出发，在该流量范围内，产卵场江段的栖息地质量随流量的增加而变好，由此可见水文学法在生物栖息地需求方面考虑得不足。根据李修峰（2006b）的调研结果，汉江中游流量在 750~1 550 m^3/s 时四大家鱼无产卵行为，与本文对中下游四大家鱼产卵适宜生态流量的研究结果存在偏差，可能与中游水利工程建设以及库区水流变缓有关。有调查发现，汉江中下游仙桃江段在持续涨水 8 d，流量为 2 480~8 200 m^3/s 的涨水过程中也监测到了四大家鱼的鱼卵，但同年其他两次流量较大的洪水过程均没有收集到鱼卵（张晓敏等, 2009），说明大洪水事件不一定对鱼类繁殖是有利的。通常情况下，当河道内流量超过一定阈值时，也会降低栖息地生境的适宜性（班璇, 2011；王瑞玲等, 2020）。

3.2 生态流量脉冲设计的合理性

汉江中下游鱼类产卵期一般为 5–8 月，但受丹江口水库低温水下泄的影响，鱼类繁殖时间相比建坝前推迟 20~30 d（秦烜等, 2014）。为满足四大家鱼等产漂流性卵鱼类的产卵需求，生态调度最早可在 5 月底开始实施，考虑到卵苗的孵化和生长，调水时间不能晚于 8 月中旬。丹江口水库建坝前，每年在鱼类繁殖季均有 5~7 次明显的涨水过程，但受梯级水电开发的影响，汉江中下游丰水期涨水频次及幅度都有所下降，虽然目前每年仍有 3~6 次涨水过程，但能有效刺激四大家鱼产卵的洪水过程非常少，且通常只发生在水位涨幅较大的流量过程中（谢文星等, 2009；张晓敏等, 2009）。在 2018 年汉江中下游实施梯级联合生态调度期间，四大家鱼卵苗量有明显的提升，表明人造洪峰能够有效促进四大家鱼繁殖。汪登强等（2019）认为促进鱼类大规模繁殖，需保证兴隆水利枢纽下游流量日均涨幅达到 500 m^3/s 以上，且调度持续时间大于 5 d；而本研究发现，单次调度持续时间为 5 d 时，流量日均涨幅在 139.1~534.8 m^3/s 即可为彭市段和仙桃段四大家鱼繁殖提供良好的产卵条件，同时在该范围内栖息地质量随着涨幅的增大而提升。尽管本研究在设计人造洪峰时段中考虑了水温对鱼类产卵行为的影响，由于缺乏实测水温数据，未结合四大家鱼产卵适宜水温给出更为精准的人造洪峰时间，同时不同的洪峰间隔以及涨水持续时间也会影响鱼卵的漂流及孵化（段辛斌等, 2008；林俊强等, 2015）。因此，在后续研究中还需要进一步开展原位监测工作，以优化生态调度方案，指导管理单位合理开展生态调度工作。

4 结论

（1）不同水文学法的计算结果存在一定差异，其中 Lyon 法和 7Q10 法最适宜汉江中下游最小生态流量的计算。水文学法计算结果仅能够保障河道基本生境健康，但不足以为四大家鱼繁殖提供适宜的流量条件。

（2）通过栖息地模型计算结果，在四大家鱼繁殖期间，汉江中下游彭市和仙桃产卵场江段的生态流量峰值在 1 233~3 950 m^3/s 为宜，流量过大和过小都可能降低产卵场江段栖息地质量。

（3）流量日涨幅在 139.1~534.8 m^3/s、持续涨水 5 d 可为彭市和仙桃段四大家鱼产卵提供良好的水文条件，但其产卵行为还受到涨水持续时间、洪峰间隔、频次等因素的影响。

参考文献

班璇,2011. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J]. 水利学报, 42(1):47-55.

常福宣,陈进,黄薇,2008. 河道生态流量计算方法综述及在汉江上游的应用研究[J]. 南水北调与水利科技, 6(1):11-13.

段辛斌,陈大庆,李志华,等,2008. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J]. 中国水产科学, 15(4):523-532.

葛金金,彭文启,张汶海,等,2019. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法——以沙颍河周口段为例[J]. 南水北调与水利科技, 17(2):75-80.

郭利丹,夏自强,林虹,等,2009. 生态径流评价中的Tennant法应用[J]. 生态学报, 29(4):1787-1792.

郭文献,夏自强,2007. 长江中下游河道生态流量研究[J]. 水利学报, (S1):619-623.

何力,张斌,刘绍平,等,2007. 汉江中下游水文特点与渔业资源状况[J]. 生态学杂志, 26(11):1788-1792.

湖北省水文水资源局,1960-2018. 中华人民共和国水文年鉴(第6卷). 长江流域水文资料(第16册)[M]. 北京:中华人民共和国水利部水文局.

李建,夏自强,2011. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报, 42(6):678-684.

李捷,夏自强,马广慧,等,2007. 河流生态径流计算的逐月频率计算法[J]. 生态学报, 27(7):2916-2921.

李修峰,黄道明,谢文星,等,2006a. 汉江中游江段四大家鱼产卵场现状的初步研究[J]. 动物学杂志, 41(2):76-80.

李修峰,黄道明,谢文星,等,2006b. 汉江中游产漂流性卵鱼类产卵场的现状[J]. 大连水产学院学报, 21(2):105-111.

林俊强,彭期冬,黄真理,2015. 河流鱼类鱼卵运动的水力学研究进展[J]. 水利学报, 46(7):869-876.

门宝辉,林春坤,李智飞,等,2012. 永定河官厅山峡河道内最小生态需水量的历时曲线法[J]. 南水北调与水利科技, 10(2):52-56.

秦烜,陈君,向芳,2014. 汉江中下游梯级开发对产漂流性卵鱼类繁殖的影响[J]. 环境科学与技术, 37(S2):501-506.

邱顺林,刘绍平,黄木桂,等,2002. 长江中游江段四大家鱼资源调查[J]. 水生生物学报, 26(6):716-718.

史方方,黄薇,2009. 丹江口水库对汉江中下游影响的生态学分析[J]. 长江流域资源与环境, 18(10):954-958.

谭燕平,王玉蓉,李嘉,等,2011. 雅砻江锦屏大河湾减水河段中鱼类栖息地模拟研究[J]. 水电能源科学, 29(3):40-43.

万力,蔡玉鹏,唐会元,等,2011. 汉江中下游产漂流性卵鱼类早期资源现状的初步研究[J]. 水生态学杂志, 32(4):53-57.

汪登强,高雷,段辛斌,等,2019. 汉江下游鱼类早期资源及梯级联合生态调度对鱼类繁殖影响的初步分析[J]. 长江流域资源与环境, 28(8):1909-1917.

王领元,2007. 应用MIKE对河流一、二维的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学.

王瑞玲,黄锦辉,葛雷,等,2020. 基于黄河鲤栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J]. 水利学报, 51(9):1175-1187.

谢文星,黄道明,谢山,等,2009. 丹江口水利枢纽兴建后汉江中下游四大家鱼等早期资源及其演变[J]. 水生态学杂志, 30(2): 44-49.

徐宗学,武玮,于松延,2016. 生态基流研究:进展与挑战[J]. 水力发电学报, 35(4):1-11.

杨志峰,张远,2003. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 18(3):294-301.

余志堂,1982. 汉江中下游鱼类资源调查以及丹江口水利枢纽对汉江鱼类资源影响的评价[J]. 水库渔业, (1):19-22.

张强,崔瑛,陈永勤,2010. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究[J]. 生态环境学报, 19(8):1828-1837.

张晓敏,黄道明,谢文星,等,2009. 汉江中下游"四大家鱼"自然繁殖的生态水文特征[J]. 水生态学杂志, 12(2):126-129.

赵尚飞,杜彦良,王瑜,等,2019. 松花江梧桐河生态修复工程鱼类栖息地模拟及调查[J]. 水生态学杂志,40(5):1-8.

钟华平,刘恒,耿雷华,等,2006. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 17(3):430-434.

周春生,梁秩燊,黄鹤年,1980. 兴修水利枢纽后汉江产漂流性卵鱼类的繁殖生态[J]. 水生生物学集刊, 7(2):175-188.

(责任编辑　万月华)

Ecological Flow in the Mid-lower Hanjiang River Based on Spawning Demands of the Four Major Chinese Carps

ZHANG Hui[1,2], ZENG Chen-jun[1,2], LI Ting[1,2], HE Shu-feng[1,2], MO Kang-le[1,2], YANG Pei-si[1,2], CHEN Qiu-wen[1,2]

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R. China;
2. Center for Eco-environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R. China)

Abstract: The hydrologic regime and ecology of the middle and lower Hanjiang River have changed dramatically due to cascaded hydropower development. Ecological flow is fundamental to river habitat health and important for fish resource restoration. In this study, we obtained hydrological data for the Pengshi and Xiantao reaches from 1960 to 2018 and calculated the minimum ecological flow using four common methods. Then, the optimal ecological flow for spawning of the four major Chinese carps was estimated using a habitat model. Finally, the ecological flow necessary to meet spawning requirements of the four major Chinese carps was comprehensively determined by incorporating the pulse design from May to August (based on the minimum ecological flow), the optimal ecological flow, and the eco-hydrological characteristics that promote spawning. Results show that the Lyon and 7Q10 hydrological methods were most suitable for calculating the minimum ecological flow in the mid-lower Hanjiang River, and that the calculated minimum ecological flow ranged from 294-863 m^3/s. Based on habitat model calculations, the optimal range of ecological flow for spawning of the four major Chinese carps in the Pengshi and Xiantao reaches was 1 233-3 950 m^3/s. If the daily increase in flow is in the range of 139.1-534.8 m^3/s, over a 5 day period, the flow regime will provide favorable spawning conditions for the four major Chinese carps. This study provides a scientific reference for conserving the four major Chinese carps and optimizing the ecological regulation of cascaded power stations in the mid-lower Hanjiang River.

Key words: mid-lower Hanjiang River; four major Chinese carps; ecological flow; hydrological method; habitat model