

长江葛洲坝下游鱼类资源量的关键水文指标识别

班璇¹, DIPLAS Panayiotis², 吕晓蓉¹, 肖飞¹, 李书娟³

- (1. 中国科学院测量与地球物理研究所环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430077;
2. Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA, USA, 18015;
3. 重庆市江北区生态环境监测站, 重庆 430000)

摘要:采用遗传规划法和相关系数法识别影响鱼类资源量的关键水文指标,结果显示坝下经济鱼类天然捕捞产量与年最大流量、高流量脉冲历时、10月和12月的月均流量正相关;四大家鱼鱼苗丰度与涨水率、7日最大流量、5月和6月的月均流量正相关;中华鲟繁殖群体数量与基流指数和涨水率呈正相关,与年最小流量、日均流量逆转次数负相关。这些水文指标分别反映了流量的量值、变化率和历时等特征对鱼类的影响。建立了关键水文指标与鱼类资源量之间的非线性函数关系式,通过对比计算值与实测值发现遗传规划法的拟合效果明显优于相关系数法,表明遗传规划法更适用于识别影响鱼类资源量的关键水文指标。

关键词:遗传规划法;相关系数法;经济鱼类;中华鲟;四大家鱼;三峡工程;葛洲坝;长江

中图分类号:S914 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)01-0015-06

Identification of the key hydrologic indicators affecting fish resources in the downstream of Gezhouba Dam//BAN Xuan¹, DIPLAS Panayiotis², LÜ Xiaorong¹, XIAO Fei¹, LI Shujuan³ (1. Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation of Hubei Province, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Bethlehem 18015, USA; 3. Ecological and Environmental Monitoring Station of Jiangbei District, Chongqing 430000, China)

Abstract: Genetic programming and correlation coefficient methods were used to identify the key hydrologic indicators of fish resources. The results show that the fish biomass downstream of the dam is positively correlated with the annual maximum flow, high pulse duration and the average monthly flow in October and December. The biomass of the four major Chinese carps is positively correlated with the rise rate of water level, 7-day maximum flow and the average monthly flow in May and June. The biomass of the Chinese sturgeon is positively correlated with the base flow index and the rise rate of water level, but it is negatively correlated with the annual minimum flow, and the number of daily hydrologic reversals. These pertinent hydrologic indicators reflect the influences of the magnitude, change rate and duration of water discharge on fish. Nonlinear functions are established between pertinent hydrologic indicators and fish resources. By comparing the simulated values with the observed ones, it can be concluded that the genetic programming method is more suitable than the correlation coefficient method for identifying the key hydrologic indicators affecting fish resources.

Key words: genetic programming method; correlation coefficient method; commercial fish; Chinese sturgeon; four major Chinese carps; Three Gorges Project; Gezhouba Dam; Yangtze River

鱼类是河流生态系统中的顶级群落,对河流健康起着重要的指示作用。河流生境能够给鱼类提供正常生活、生长、觅食、繁殖以及其他生命循环周期的场所。生境质量的好坏受诸多因素的影响,如水文、泥沙、河道形态、水质条件、饵料生物等^[1]。近几十年来,由于大型水利工程的不断建设,我国很多河流的水文、水动力以及水环境状况发生了较大改

变,对鱼类的影响问题也变得越来越突出^[1-4]。从众多可能影响鱼类资源量的水文因子中识别出关键水文因子,从而提出有针对性的生态调度决策方案是当前人们保护鱼类以及维护河流健康的一项紧迫任务。长江流域生物资源极其丰富,同时也是我国重要的淡水渔业生产基地。三峡工程的建设改变了长江的天然水文情势,给鱼类的栖息环境造成了一

定程度的威胁,鱼类的物种组成、资源量均发生改变^[5]。据调查,三峡水库蓄水前,长江干流由四川巴县至江西彭泽 1 700 km 的江段上有四大家鱼产卵场 36 处^[6-7],长江中游宜昌至城陵矶有 11 处,产卵量约占全江产卵量的 42.7%^[8-9]。随着葛洲坝工程和三峡工程的建成运行,水库的消峰作用及水库运行调度等因素使季节性洪峰流量减弱或丧失,鱼类迁徙、产卵和孵化所必需的激发因素中断^[1]。三峡大坝蓄水后,四大家鱼的部分产卵场迁移甚至消失,产卵规模缩小,四大家鱼鱼苗丰度也进一步减小^[1,8]。葛洲坝修建后,改变了长江上游的生态环境,阻断了中华鲟的产卵洄游通道,使全部产卵群体被阻隔于坝下,产卵场从原来的 16 处减少到 1 处^[10-11],产卵场分布江段由过去的 800 km 江段压缩至葛洲坝下游不足 5 km 的江段,不足原产卵江段的 1%^[12-13],导致产卵洄游群体的多极分化,致使一部分产卵群体性腺退化,资源量逐渐减少。三峡水库刚好在中华鲟的产卵期(10 月)开始蓄水,使得下游中华鲟产卵江段的平均流量减少了近 41%^[10],这将进一步威胁中华鲟的自然繁殖环境。

鱼类的产卵、繁殖及其种类组成和资源量的改变是受多种环境因子共同影响的结果,并且它们之间的关系复杂多样,大部分是非线性关系,这些客观情况给关键环境因子识别带来一定的挑战。目前,关键环境因子的识别方法有很多种,大致可以分为定性分析法和定量回归法。定性分析法主要包括相关分析法、主成分分析法和典范对应分析法等。定性分析法简单易用,但是大多数定性分析法基于线性原则识别关键环境因子,无法量化多种关键环境因子与生物因子之间的回归关系。定量回归法有多元线性回归法、人工神经网络法、遗传规划法等。多元线性回归法根据观测值与回归值的吻合程度选择最优的回归方程来确定关键环境因子,但是这种回归方法很难发掘与生物因子之间存在非线性关系的环境因子,且线性回归方程的拟合精度往往不高。人工神经网络法擅长建立环境因子与生物因子之间复杂非线性关系的回归模型,其缺点在于建立回归模型之前,需要人工精简环境因子的个数,且环境因子的选择对回归精度的影响较大^[14-17]。遗传规划法(genetic programming, GP)是一种与遗传算法非常类似的启发式随机搜索方法^[23],能从众多环境因子中自动识别出关键环境因子,还可以建立关键环境因子与生物因子之间的非线性关系式,便于进行关键环境因子的敏感性分析,预测生物因子未来的变化趋势。因此,从理论上讲,GP 的功能较为全面,

更适用于识别影响鱼类种群变化与资源量的关键环境因子。但是,由于 GP 是一种相对较新的数据挖掘方法,目前在河流生态学上的应用还比较少,且主要集中在河流的水华问题研究上^[14-15]。目前已有不少学者开始尝试利用 GP 探索鱼类资源量与环境因子的关系,如王俊娜等^[16]采用 GP 识别出影响长江中上游四大家鱼鱼苗丰度的关键环境因子;Jiang 等^[17]采用 GP 提取了影响伊利诺斯河上游鱼类丰度和多样性的主要水文因子。本文尝试采用 GP 对长江葛洲坝至城陵矶鱼类资源量的关键水文指标进行识别,探讨关键水文指标与鱼类资源间的量化关系,以期为三峡水库实施补偿鱼类繁殖条件的生态调度提供决策依据。

1 材料与方 法

长江是我国第一大河,被誉为我国淡水渔业的摇篮、鱼类基因的宝库、经济鱼类的原种基地。从种类数目看,长江水系有鱼类 370 种,占我国淡水鱼种类总数的 48%,居亚洲各水系之首。长江流域是著名的四大家鱼、中华绒螯蟹、鳊鲴等经济鱼类的原种基地和洄游性鱼类国家一级保护动物中华鲟的主要产卵繁殖基地,同时也是我国淡水苗种四大家鱼的重要生产基地^[18-22]。然而,20 世纪以来长江的渔业资源呈现出衰退的特征,主要表现为:渔业资源量剧减;江湖半洄游性鱼类在渔获物中比例显著下降;定居性鱼类在渔获物中比例虽相对稳定,但资源量下降;渔获物中低龄鱼增多,高龄鱼减少;面临濒危或灭绝的种类增多。究其原因,主要是长江流域生态环境的变化以及过度捕捞引起的^[5],葛洲坝的修建阻隔了洄游鱼类上溯到长江上游的通道,三峡大坝的修建极大地改变了下游的水文情势。

本文以葛洲坝下游中华鲟和经济鱼类产卵场所所在处的宜昌水文站,以及监利江段四大家鱼产卵场所在的监利水文站为例,探讨这两个水文站水文情势变化对鱼类资源量的影响。宜昌站位于葛洲坝下游 6 km、三峡大坝下游 44 km 处,控制流域面积 100.6 万 km²。监利站位于下荆江河段的中部,控制流域面积约 104 万 km²。采用 Richter^[15]提出的变化范围法(rang of variability approach, RVA)分析宜昌站和监利站 1997—2011 年的流量数据,求解反映流量大小、极值流量发生时间、发生频率、高低流量脉冲历时以及逆转次数等 32 个水文指标的年均值(由于长江中下游没有零流量出现,所以本研究不考虑 RVA 法中的零流量天数这个指标)^[19],以作为 GP 中的环境因子;采用 1997—2011《长江三峡工程

生态与环境监测公报》中统计的三峡水库坝下宜昌江段主要经济鱼类天然捕捞产量(主要包括鲢、鲤、铜鱼、黄颡鱼和四大家鱼等)、宜昌江段的中华鲟繁殖群体数量、监利江段四大家鱼鱼苗丰度的生物量等作为 GP 中的生物因子;利用 GP 模型识别对上述目标生物因子有重要影响的关键水文指标,并建立回归函数关系式。

GP 建模的基本思想是^[23-25]:首先随机产生一个适合给定问题环境的初始群体,即问题的搜索空间,然后利用给定的适应度函数选择群体中满足要求的个体,通过遗传操作(包括再生、杂交、变异等遗传算子)动态地改变这些解的结构,对解进行一代代地演化,直到找到满足原问题要求的解或满足终止条件,最后输出程序终止时的模型。

个体适应度的计算基于样本的计算值与观测值的标准误差,选择方法采用锦标赛选择法。遗传规划法参数的取值见表 1。

表 1 遗传规划法的基本参数设置

参数名称	参数取值	参数名称	参数取值
种群数	500	变异概率	0.1
最大进化代数	100	初始种群中树的最大节点数	15
选择概率	0.1	树的最大节点数	45
交叉概率	0.9	一次锦标赛参加的个体数	3

由于环境因子和生物因子在数值上差别很大,在遗传规划法计算之前,先采用线性函数转换法将每个因子归一化到 0.001 ~ 1 之间。生物因子被设定为目标鱼种生物量的年均值,环境因子设定为由 RVA 计算出的 32 个水文指标的年均值。每运行一次遗传规划法程序就会得到一个生物因子和环境因子之间的回归方程,采用频率筛选法解决遗传规划法中的非唯一性和随机性问题,以频率出现高的结果作为预选结果。设定遗传规划法总的计算次数为 100 次,每次运行都会筛选出不同的水文指标和回归方程,选择出现频率排名前 10 的水文指标作为影响目标鱼种的关键水文指标,然后把关键水文指标输入遗传规划法程序中再运行 100 次,重新得到不同的回归方程,选择误差最小的目标函数作为最终的回归方程。

2 结果与分析

2.1 影响鱼类资源量的关键水文指标与回归方程

2.1.1 影响坝下江段主要经济鱼类的关键水文指标
以葛洲坝坝下江段主要经济鱼类的渔获总量 F 作为生物因子,宜昌站流量的 32 个水文指标的年均值作为环境因子,得出拟合误差最小的表达式为

$$F = \frac{H_d + Q_{10} Q_{3\text{day max}}}{Q_{7\text{day max}}} Q_{10} Q_{1\text{day max}} Q_{12}^2 \quad (1)$$

式中: H_d 为高脉冲流量的平均历时; Q_{10} 、 Q_{12} 分别为 10 月、12 月的月平均流量; $Q_{1\text{day max}}$ 、 $Q_{3\text{day max}}$ 、 $Q_{7\text{day max}}$ 分别为年均 1 日、3 日和 7 日最大流量。

由式(1)可以看出,影响坝下江段经济鱼类渔获物总量的环境因子主要是与高流量有关的水文指标,尤其是短历时的年最大流量值和高流量脉冲的持续时间,以及秋季(10 月)和冬初(12 月)月均流量值的大小。采用式(1)得到的渔获物总量的计算值与实际观测值的对比如图 1 所示,两者的相关系数达 0.987,标准误差为 669.8 t,纳什系数为 0.96。

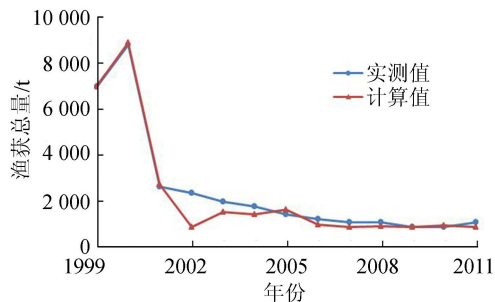


图 1 经济鱼类渔获总量实测值与计算值的对比

2.1.2 影响四大家鱼鱼苗丰度的关键水文指标

以反映四大家鱼繁殖规模的鱼苗丰度 A_{bd} 的年均值作为生物因子,得出拟合误差最小的表达式为

$$A_{\text{bd}} = (R_{\text{rate}} + Q_5 Q_{7\text{day max}}) (Q_6 - R_{\text{rate}}) Q_6^2 Q_{7\text{day max}} \quad (2)$$

式中: R_{rate} 为日间流量上升率; Q_5 、 Q_6 分别为 5 月和 6 月的月平均流量。

一般四大家鱼会在江水起涨后大约 0.5 ~ 2 d 开始产卵,涨水停止时,产卵也停止^[26-27]。因此,三峡蓄水后,涨水率、年均 7 日最大流量以及 5 月、6 月月均流量的不同程度的减少都对四大家鱼的产卵繁殖造成一定的影响,导致鱼苗丰度的大幅度下降,其中以涨水率的影响最为明显。采用式(2)得到的鱼苗丰度的计算值与实际观测值的对比见图 2,两者的相关系数为 0.782,标准误差为 9.16 亿尾。

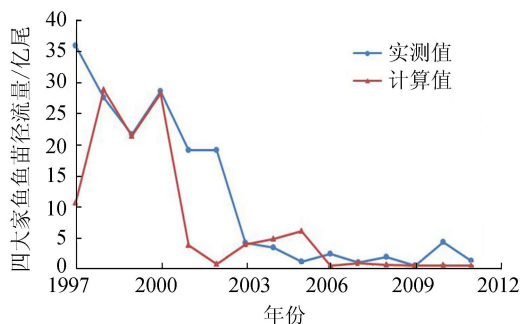


图 2 四大家鱼鱼苗丰度实测值与计算值的对比

2.1.3 影响中华鲟产卵资源量的关键水文指标

将每年宜昌江段中华鲟繁殖群体数量 S 作为生物因子,得出拟合误差最小的表达式为

$$S = R_{rate} + 2Q_b - Q_{7day\ min} - Q_{3day\ min} - Q_{90day\ min} - R_v \quad (3)$$

式中: Q_b 为基流指数; $Q_{7day\ min}$ 、 $Q_{30day\ min}$ 、 $Q_{90day\ min}$ 分别为年均 7 日、30 日和 90 日最小流量; R_v 为日均流量的逆转次数。

由式(3)可以看出,影响宜昌江段中华鲟繁殖群体数量的环境因子主要是不同历时的年最小流量以及流量的变化率,其中年最小流量、日均流量逆转次数与中华鲟繁殖群体数量之间为负相关,涨水率和基流指数与中华鲟繁殖群体数量之间为正相关。采用式(3)得到的中华鲟繁殖群体数量的计算值与实际观测值的对比见图 3,两者的相关系数达 0.81,标准误差为 52.43 尾。

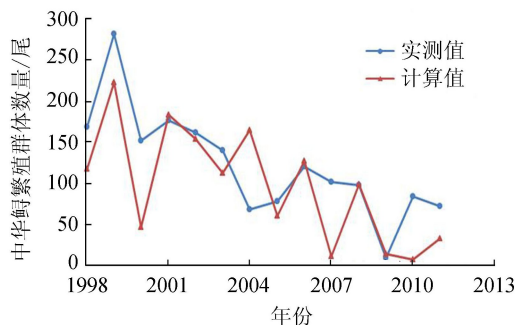


图 3 中华鲟繁殖群体数量实测值与计算值的对比

2.2 遗传规划法与相关系数法的比较与误差分析

利用 Pearson 相关系数法对遗传规划法识别的不同水文指标进行相关性检验,结果表明通过遗传规划法识别出的 6 个影响坝下经济鱼类天然捕捞产量的关键水文指标中,10 月、12 月的月平均流量均通过显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,对坝下经济鱼类的影响最大(表 2);4 个影响四大家鱼鱼苗丰度的关键水文指标都通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,尤其是日间流量上升率,其相关系数达到 0.643,通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验;6 个影响中华鲟繁殖群体数量的关键水文指标都通过了

表 2 遗传规划法识别的不同水文指标的相关性检验结果

经济鱼类天然捕捞量		四大家鱼鱼苗丰度		中华鲟繁殖群体数量	
水文指标	相关系数	水文指标	相关系数	水文指标	相关系数
Q_{12}	0.680 *	R_{rate}	0.643 **	$Q_{30day\ min}$	-0.665 **
Q_{10}	0.672 *	Q_5	0.552 *	R_v	-0.661 *
$Q_{3day\ max}$	0.522	$Q_{7day\ max}$	0.537 *	$Q_{7day\ min}$	-0.646 *
$Q_{1day\ max}$	0.511	Q_6	0.521 *	$Q_{90day\ min}$	-0.633 *
$Q_{7day\ max}$	0.483			Q_b	0.599 *
H_d	0.396			R_{rate}	0.569 *

注: * 表示通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, ** 表示通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

$\alpha = 0.05$ 的显著性检验,其中年均 30 日最小流量值通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

3 讨论

坝下经济鱼类天然捕捞产量与年最大流量、高流量脉冲历时以及 10 月、12 月的月平均流量相关性较高,且全部为正相关,这些确定的水文指标是与河流洪水相关的指标,以及与鱼类越冬相关的流量。实际上很多鱼类都需要洪水的高流量脉冲来刺激其产卵繁殖,而洪水也可以给鱼类带来丰富的饵料资源^[28-29],鱼类的越冬在鱼类的生长周期中也是非常重要的一个环节,影响鱼类资源的总量^[30];四大家鱼鱼苗丰度与流量的涨水率、年均 7 日最大流量以及 5 月、6 月的月平均流量相关性较高,同样全部为正相关;5—6 月为四大家鱼的产卵期,而涨水率和 7 日最大流量对其繁殖起着重要作用^[26-27]。中华鲟繁殖群体数量与不同历时的年最小流量、基流指数以及涨水率相关性较高,其中基流指数和流量涨水率为正相关,其余 4 个指标均为负相关,10—12 月的月均流量未出现在结果中,说明流量月均值的大小并不是中华鲟产卵的限制性因素,而中华鲟选择在此月产卵,是由于水温及其自身的生理因素决定的,与其他鱼类类似,中华鲟也需要高流量脉冲来刺激其产卵^[13]。这些相关指标分别反映了流量的量值、变化率和历时等特征。

遗传规划法能够较好地识别影响鱼类种群变化与资源量的关键水文因子,并能明确给出水文因子与生物因子之间的函数表达式。通过对比遗传规划法与 Pearson 相关系数法对不同鱼类的拟合效果(表 3)可以看出,遗传规划法得出的计算值与实测值之间的相关系数明显高于多元线性回归法,标准误差则小于多元线性回归法,因此,遗传规划法的拟

表 3 遗传规划法与多元线性回归法的拟合效果对比

生物因子	关键水文指标	遗传规划法		多元线性回归法		
		相关系数	标准误差	相关系数	标准误差	
坝下经济鱼类天然捕捞产量	Q_{12} 、 Q_{10} 、 H_d 、 $Q_{1day\ max}$ 、 $Q_{3day\ max}$ 、 $Q_{7day\ max}$	0.987	669.8 t	0.871	1 727.7 t	
	四大家鱼鱼苗径丰度	R_{rate} 、 Q_7 、 Q_{10} 、 $Q_{7day\ max}$	0.782	9.16 亿尾	0.757	9.60 亿尾
		中华鲟繁殖群体数量	$Q_{30day\ min}$ 、 $Q_{7day\ min}$ 、 R_v 、 Q_b 、 R_{rate} 、 $Q_{90day\ min}$	0.81	52.4 尾	0.725

合效果要明显优于 Pearson 相关系数法。但是在结果验证时鱼类资源量的实测值与遗传规划法计算值在部分年份存在明显的差异(图 2 ~ 图 3),如坝下经济鱼类天然捕捞产量在 2002 年、四大家鱼鱼苗丰度在 1997 年、2001 年、2002 年以及中华鲟繁殖群体数量在 2004 年、2007 年和 2010 年。该结果显示遗传规划法对坝下经济鱼类天然捕捞产量的拟合效果要明显优于对四大家鱼鱼苗丰度和中华鲟繁殖群体数量的拟合,同时也表明,流量变化对葛洲坝坝下经济鱼类天然捕捞产量的影响较为明显。而四大家鱼鱼苗丰度和中华鲟繁殖群体数量除受流量变化的影响外,还受水温、流速、地形、气象等其他要素的影响,这可能是导致其拟合效果稍差于坝下经济鱼类天然捕捞产量的原因之一。如果可以收集到水温、水深、流速、地形、气象等较为全面的多个影响因子的相关数据,利用遗传规划法可以得到更好的拟合效果。GP 是一种数据驱动的方法,一定数量的样本数据是这些方法获得可靠结论的前提,当实际监测数据样本量充分时,遗传规划法在自动识别与生物因子存在非线性关系的关键环境因子、解释关键环境因子对生物因子的影响方式以及建立它们之间的量化关系方面具有显著优越性,值得在河流生态学研究领域推广应用。

本文的结果可以为水库的生态调度提供指导建议。比如,为了更好地保护坝下经济鱼类的栖息环境,提高鱼类资源量,在三峡水库的调度过程中,应当在保证防洪安全的基础上,在主汛期前大流量自由泄流,或者在春季人造洪峰,以达到适当增加高流量值的目的。由于涨水率对四大家鱼的产卵起刺激作用,只有达到一定的涨水率和涨水持续时间,四大家鱼才会产卵。因此,在汛前涨水期四大家鱼繁殖时,可以适时地进行“洪水脉冲”式放水,通过人为制造洪峰来满足四大家鱼繁殖时的涨水刺激,诱导其繁殖,从而促进四大家鱼的天然繁殖和物种保存。由于中华鲟的主要产卵时期是在每年的 10—12 月,可以通过提前蓄水,如 9 月上、中旬蓄水,使得蓄水时间尽可能避开中华鲟的产卵期,保证产卵期的生态流量需求。提前蓄水不仅能保证三峡水库库容蓄积的保证率,更重要的是为中华鲟产卵场的生态流量调度提供了历时空间和水量储备,可以根据水文实时预报,结合中华鲟产卵繁殖的监测情况,及时调整三峡水库下泄流量过程。

参考文献:

[1] 胡安焱,张自英,王菊翠. 水利工程对汉江中下游水文生态的影响[J]. 水资源保护,2010,26(2):5-9. (HU

Anyan, ZHANG Ziyang, WANG Juncui. Impact of hydraulic engineering on hydro-ecology in middle and lower reaches of Hangjiang River[J]. Water Resources Protection, 2010,26(2):5-9. (in Chinese))

[2] 林育青,马君秀,陈求稳. 拆坝对河流生态系统的影响及评估方法综述[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):9-15. (LIN Yuqing, MA Junxiu, CHEN Qiuwen. Research on effects of dam removal on river ecosystem and review of its assessment methods[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(5):9-15. (in Chinese))

[3] 邹家祥,翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护,2016,32(5):136-140. (ZOU Jiaxiang,ZHAI Hongjuan. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures [J]. Water Resources Protection, 2016,32(5):136-140. (in Chinese))

[4] 易伯鲁. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M]. 武汉:湖北省科学技术出版社,1988.

[5] 刘绍平,邱顺林,陈大庆,等. 长江水系四大家鱼种质资源的保护和合理利用[J]. 长江流域资源与环境,1997,6(2):127-131. (LIU Shaoping, QIU Sunling, CHEN Daqing, et al. Protection and rational utilization of the germplasm resources of the four major Chinese carps in the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1997,6(2):127-131. (in Chinese))

[6] 林俊强,彭期冬,黄真理. 河流鱼类鱼卵运动的水力学研究进展[J]. 水利学报,2015,46(7):869-876. (LIN Junqiang, PENG Qidong, HUANG Zhengli. Advances in hydraulics of fish egg movement in rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7):869-876. (in Chinese))

[7] 余志堂,邓中堂,许蕴轩,等. 葛洲坝水利枢纽兴建后长江干流四大家鱼产卵场的现状及工程对家鱼繁殖影响的评价[C]// 易伯鲁,余志堂,梁秩桑. 葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼. 武汉:湖北科学技术出版社,1988:47-68.

[8] 班璇. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J]. 水利学报,2011,42(1):47-55. (BAN Xuan. Ecological water requirement of spawning habitat of acipenser sinensis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1):47-55. (in Chinese))

[9] 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[J]. 水生生物学报,2005,29(1):26-30. (YANG Deguo, WEI Qiwei, WANG Kai, et al. Migration of juvenile Chinese sturgeon released by artificial markers [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2005, 29(1):26-30. (in Chinese))

[10] 陶江平,乔晔,杨志,等. 葛洲坝产卵场中华鲟繁殖群体数量与繁殖规模估算及其变动趋势分析[J]. 水生态学杂志,2009,2(2):37-43. (TAO Jiangping, QIAO Ye,

- YANG Zhi, et al. Estimation of the number and scale of reproductive population of acipenser sinensis in Gezhouba spawning ground and analysis of its change trend [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2 (2): 37-43. (in Chinese))
- [11] PENG X, WANG Q, WANG Y, et al. Discussion of acipenser sinensis habitat suitability index model [C]// *International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering*. IEEE, 2011:5733-5736.
- [12] MUTTIL N, LEE H W. Genetic programming for analysis and real-time prediction of coastal algal blooms [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 189(3/4):363-376.
- [13] KIM D K, JEONG K S, WHIGHAM P A. Winter diatom blooms in a regulated river in South Korea: explanations based on evolutionary computation [J]. *Freshwater biology*, 2007, 52(10):2021-2041.
- [14] YANG Y E, CAI X M, HERRICKS E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: a data mining approach for fish community analysis [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44, W04412. doi: 10.1029/2006WR005764.
- [15] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. *Conservation Biology*, 1996, 10: 1163-1174.
- [16] 王俊娜,李翀,段辛斌,等. 基于遗传规划法识别影响鱼类丰度的关键环境因子[J]. *水利学报*, 2012, 43(7): 860-868. (WANG Junna, LI Chong, DUAN Xinbing, et al. Identification of significant environmental factors affecting fish abundance by genetic programming [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(7): 860-868. (in Chinese))
- [17] JIANG L Z, BAN X, WANG X L, et al. Assessment of hydrologic alterations caused by the Three Gorges Dam in the middle and lower reaches of Yangtze River, China [J]. *Water*, 2014, 6:1419-1434.
- [18] XU J J, YANG D W, YI Y H, et al. Spatial and temporal variation of runoff in the Yangtze River Basin during the past 40 years [J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 32-42.
- [19] ALBERTS H C, ALBERTS R M, BLOOM M F, et al. The Three Gorges Dam project from a systems viewpoint [J]. *Systems Research and Behavioral Science*, 2010, 21(6): 585-602.
- [20] OU C, LI J, ZHANG Z, et al. Effects of the dispatch modes of the Three Gorges Reservoir on the water regimes in the Dongting Lake area in typical years [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(4): 594-608.
- [21] KOZA J R. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection [M]. Cambridge: the MIT press, 1992.
- [22] XIONG S W, Lu X Q. A genetic programming approach to partial differential equation inverse problems [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 25(3): 11-15.
- [23] TANG M, SHAO D G, TANG X R. Automatic modeling of flood damage loss assessment system based on genetic programming [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, 40(3): 5-9.
- [24] 王煜,唐梦君,戴会超. 四大家鱼产卵栖息地适宜度与大坝泄流相关性分析[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(1): 107-112. (WANG Yu, TANG Mengjun, DAI Huichao. Analysis on correlation between suitability of spawning habitat for four major Chinese carps and discharge from dam [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(1): 107-112. (in Chinese))
- [25] 王悦,高千红. 长江水文过程与四大家鱼产卵行为关联性分析[J]. *人民长江*, 2017, 48(6): 24-27. (WANG Yue, DANG Mengjun, DAI Huichao. Analysis of the relationship between the hydrological process of the Yangtze River and spawning behavior of four major Chinese carps [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(6): 24-27. (in Chinese))
- [26] POLLARD D A, HANNAN J C. The ecological effects of structural flood mitigation works on fish habitats and fish communities in the lower Clarence River system of South-Eastern Australia [J]. *Estuaries*, 1994, 17(2): 427-461.
- [27] GRAAF G D. The flood pulse and growth of floodplain fish in Bangladesh [J]. *Fisheries Management & Ecology*, 2010, 10(4): 241-247.
- [28] GARVEY J E, Ostrand K G, Wahl D H. Energetics, predation, and ration affect size-dependent growth and mortality of fish during winter [J]. *Ecology*, 2004, 85(10): 2860-2871.

(收稿日期:2017-11-27 编辑:郑孝宇)

