

## 基于生物水文响应模型的刺激四大家鱼繁殖生态调度目标量化方法研究——以三峡水库为例<sup>\*</sup>

刘 翰<sup>1</sup>,林俊强<sup>1\*\*</sup>,秦 鑫<sup>2</sup>,黄 晋<sup>3</sup>,俞立雄<sup>4</sup>,熊定松<sup>2</sup>,普 源<sup>2</sup>

(1:中国水利水电科学研究院,北京 100038)

(2:云南华能澜沧江水电有限公司,昆明 650011)

(3:中国水电建设集团圣达水电有限公司,乐山 614013)

(4:中国水产科学院长江水产研究所,武汉 430223)

**摘要:**为了改善生态调度效果,提高生态调度实践成功率,采用医学领域适用性广、准确性高、直观性强的受试者工作特征曲线法(receiver operating characteristic, ROC),以三峡水库为例,提出了一套基于生物水文响应模型的刺激四大家鱼繁殖生态调度目标量化方法,包括涨水事件界定及生态水文指标选择、鱼类自然繁殖事件及有效繁殖响应界定、生物-水文响应模型构建与多指标判别优选等多个环节。运用三峡水库运行后2013—2019年(除2016年)6年47场次宜昌江段的涨水事件和24次四大家鱼有效繁殖响应的实际观测数据构建模型并量化三峡水库生态调度目标。结果表明:(1)依据初始流量 $Q_0$ 、洪峰流量 $Q_{peak}$ 、流量总增长量 $Q_{sum}$ 和流量日增长率 $dQ$ 这4个指标所建立的单指标生物-水文响应模型具有较好判别四大家鱼自然繁殖对水文条件是否响应的能力;(2)各评价指标 $Q_0$ 、 $Q_{peak}$ 、 $Q_{sum}$ 、 $dQ$ 的最佳阈值分别为 $14960\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $19610\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4050\text{ m}^3/\text{s}$ 及 $1405\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ ;单指标模型性能排序为 $dQ > Q_{peak} > Q_{sum} > Q_0$ ;(3)依据 $dQ$ 或 $Q_{peak}$ 的指标组合方式建立的多指标生物-水文响应模型综合性能最佳。结果表明,ROC模型方法结果形式简单、预见性强,据此量化生态调度目标,可为其他流域、水库的鱼类繁殖响应判别和水库生态调度方案制定提供参考借鉴。

**关键词:**生态调度;四大家鱼;繁殖响应;ROC法;三峡水库

Methods on quantifying ecological operation target based on bio-hydrological response model for stimulating the reproduction of four major Chinese carps in the Three Gorges Reservoir<sup>\*</sup>

Liu Han<sup>1</sup>, Lin Junqiang<sup>1\*\*</sup>, Qin Xin<sup>2</sup>, Huang Jin<sup>3</sup>, Yu Lixiong<sup>4</sup>, Xiong Dingsong<sup>2</sup> & Pu Yuan<sup>2</sup>

(1: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China)

(2: Yunnan Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd, Kunming 650011, P.R.China)

(3: China Hydropower Construction Group Shengda Hydropower Co., Ltd, Leshan 614013, P.R.China)

(4: Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinses Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430233, P.R.China)

**Abstract:** In order to improve the ecological operation effect and increase the success rate of ecological operation practice, a set of ecological operation target quantification methods based on the bio-hydrological response model for stimulating reproduction of four major Chinese carps is proposed. The method includes the definition of upwelling event, the selection of eco-hydrological indicators, the definition of natural fish reproduction event and effective reproduction response, the construction of bio-hydrological response model and multi-indicator discriminative preference. The actual observed data of 47 upwelling events and 24 effective reproduction responses of four fish in the Yichang River section for 6 years after the operation of the Three Gorges Reservoir from 2013 to 2019 (except 2016), were used to construct the model and quantify the ecological planning goals of the reservoir. The results

\* 2022-10-09 收稿;2023-01-04 收修改稿。

国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240214)和华能澜沧江水电股份有限公司重点科研项目(HY2020/S2)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail:junqiang-lin@hotmail.com。

showed that (1) the single-indicator bio-hydrological response model based on the four indicators of initial flow ( $Q_0$ ), peak flood flow ( $Q_{\text{peak}}$ ), total flow growth ( $Q_{\text{sum}}$ ) and daily flow growth rate ( $dQ$ ) had the ability to discriminate whether the natural reproduction of the four major carp was responsive to hydrological conditions; (2) the optimal thresholds for the above evaluation indicators were  $14960 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $19610 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $4050 \text{ m}^3/\text{s}$  and  $1405 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ , respectively; the performance of the single indicator model was ranked as  $dQ > Q_{\text{peak}} > Q_{\text{sum}} > Q_0$ ; (3) the comprehensive performance of the multi-indicator bio-hydrological response model based on the combination of  $dQ$  or  $Q_{\text{peak}}$  was the best. The model results are simple and predictable, and can be used to quantify the ecological operating targets, which can provide a reference for discriminating fish reproduction response and formulating reservoir ecological planning in different watersheds and reservoirs.

**Keywords:** Ecological operation; four major Chinese carps; reproductive response; receiver operating characteristic; Three Gorges Reservoir

截至 2020 年,全球已建成坝高超过 15 m 的大坝 58000 余座<sup>[1]</sup>,在零碳能源供给、季节性供水、农业灌溉、防洪、航运等方面产生了巨大的综合效益,但也不可避免改变了河流天然水文情势和水生态环境,造成江河鱼类资源衰退等不利生态影响<sup>[2]</sup>。为协调流域水能资源高效利用与河流生态系统健康可持续发展,目前全球已有上百座水库就刺激鱼类繁殖、水质改善等目标开展生态调度工作<sup>[3-5]</sup>。长江水能资源丰富<sup>[6]</sup>,三峡水库是开发治理长江的骨干工程<sup>[7]</sup>,自 2011 年以来,三峡水库积极开展生态调度实践,每年通过人造洪水调度进行促进四大家鱼自然繁殖的生态调度试验,有效改善了四大家鱼繁殖期涨水条件减弱问题,一定程度上刺激了长江中游四大家鱼的自然繁殖。然而,据调查显示,有的场次生态调度诱发的家鱼卵苗发生量可达当年调查江段总家鱼产卵量的 91%,有的不足三分之一,有的甚至未监测到卵苗高峰<sup>[8-9]</sup>,生态调度效果存在较大不确定性,因而量化生态调度目标尤为重要。

传统生态调度目标的确定,主要是应用水文学分析方法,通过受工程影响前的历史水文资料和鱼类繁殖活动调查资料,分析鱼类自然繁殖的生态水文需求,从而划定相关水文指标阈值供生态调度参考,如郭文献等<sup>[10]</sup>根据三峡水库蓄水前四大家鱼繁殖期的生态水文特性,提出了宜昌江段利于四大家鱼繁殖的水文需求为流量日上涨率  $910 \sim 2208 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$ ,水位日上涨率  $0.41 \sim 0.74 \text{ m/d}$ ,涨水持续时间需求  $3 \sim 8 \text{ d}$ 。近年来诸多学者也基于不同理论方法研究鱼类繁殖的生态水文学特性与生态调度目标,譬如张辉等<sup>[11]</sup>、Yu 等<sup>[12]</sup>基于生态水文学计算方法及栖息地适宜性模型量化了四大家鱼生态调度目标,在最小生态流量的基础上,根据鱼类栖息适宜性模型率定四大家鱼的繁殖需求;Zhang 等<sup>[13]</sup>、徐薇等<sup>[9]</sup>采用系统重构分析法将洪水过程分解为不同的水文要素,提出适宜四大家鱼的生态调度水文条件;李朝达等<sup>[14]</sup>则通过三峡生态调度以来的多年水文、生物监测成果得出四大家鱼产卵需求的生态调度水文过程。但是这些方法往往仅关注历史大规模产卵事件,且未系统考虑鱼类的环境响应机制,研究得出的鱼类产卵需求阈值范围通常较为宽泛、不够聚焦,可能给生态调度方案的决策和实施效果带来更多不确定性。

近年来,有些学者尝试从生态水力学和鱼类生理生态学角度,通过学科交叉探索鱼类繁殖的水动力触发机制和相应阈值,以此推求生态调度的目标。Chen 等<sup>[15]</sup>通过室内环形水槽试验量化了流速与鱼类繁殖的定量关系,得出四大家鱼适宜繁殖流速为  $1.2 \sim 1.4 \text{ m/s}$ ;杨庆<sup>[16]</sup>通过鱼类洄游水槽试验划定鱼类生存繁衍适应阈值,划定刺激成年草鱼洄游的最小流速阈值是  $0.2 \text{ m/s}$ ,适宜流速为  $0.4 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 。这类方法生态学意义较为显著,但是鱼类自然繁殖的生理生态机制尚未完全明晰,通过室内水槽或环道可控试验确定的环境要素响应阈值作为生态调度目标,可能与野外条件存在较大偏差,且受限于流量水深大小,多数仅可开展产卵适宜流速试验。

综上所述,在有限科学认知下,通过挖掘大量历史实践观测数据,建立具有生物学意义的生态调度目标统计学模型,是指导实践、降低实践不确定性和提高成功率的有效手段。本文以三峡水库为案例,选择受三峡生态调度影响最为显著的四大家鱼宜昌产卵场江段为研究区域,基于 2013—2019 年(除 2016 年)水文和鱼类繁殖活动观测数据(包括每年生态调度期的水文与生物响应数据),借鉴医学领域的疾病诊断和指标阈值确定方法,以期建立一套鱼类自然繁殖对生态水文条件的响应模型,并以此量化三峡生态调度目标阈值,从而为今后三峡水库生态调度目标的量化提供参考。

## 1 研究区概况

历史上长江中游分布有四大家鱼产卵场30余处,1981年葛洲坝建坝后,其坝下十里红至烟收坝、仙人桥至虎牙滩等江段产卵规模扩大<sup>[17]</sup>,至今相邻的两个产卵场已合并为宜昌产卵场。根据近十年来调查显示,目前宜昌产卵场是长江中游规模最大且稳定的产卵场,该产卵场在三峡水库下游约60 km,葛洲坝下游约20 km,受三峡生态调度影响最为显著<sup>[18-19]</sup>。中国水利水电科学研究院和中国水产科学院长江水产研究所对宜昌-宜都江段的水文、水动力条件和鱼类繁殖活动进行了多年的联合调查监测,其中仅2016年未获取相应数据。水文、水动力监测江段为烟收坝至云池江段,鱼类繁殖活动监测断面位于宜都市(30°24'27"N, 111°26'36"E)(图1),繁殖活动监测时段为每年的5月1日—7月10日,采用圆锥网逐日在采样断面左、中、右岸不同采样点、不同水深处收集鱼类卵苗并鉴定鱼种,采集完成后根据易伯鲁方法<sup>[20]</sup>估算该江段四大家鱼产卵规模。

## 2 研究数据和方法

### 2.1 涨水事件界定及生态水文指标选择

四大家鱼在长期自然演化过程中,形成了水温-涨水综合驱动的繁殖习性<sup>[21]</sup>。三峡水库蓄水前,长江中游每年4—7月份,性腺接近成熟(IV期)的四大家鱼亲鱼将上溯至产卵场,等待水温和水流条件。当水温上涨至18℃以上、上游洪水形成湍急水流和连续涨水过程时,经过数小时至数十小时的持续刺激,亲鱼性腺才能完成从IV期到V期的发育,进入产卵状态<sup>[22]</sup>。三峡水库蓄水期及运行期大量的研究成果表明,三峡蓄水后坝下4—5月水温降低明显<sup>[23-24]</sup>,水温达到18℃的日期显著推迟,四大家鱼首次产卵时间推移至5月中旬,自然繁殖季节由4—7月压缩至5—7月。同时,水文情势的改变导致长江中游流量日增长率下降<sup>[25]</sup>,通过涨水刺激完成生殖过程的四大家鱼繁殖受到严重影响<sup>[26]</sup>,长江中游四大家鱼的年产卵量在20世纪60年代至2009年间由 $403 \times 10^8$ 粒锐减至不足 $1 \times 10^8$ 粒<sup>[27]</sup>。自2011年以来,三峡水库在每年5—7月宜昌江段水温高于18℃后择机开展人造洪水的生态调度试验。经本研究团队2013—2019年(除2016年)观测,水温满足四大家鱼产卵的基本要求,产卵规模由 $1.31 \times 10^8$ 粒增至 $43.44 \times 10^8$ 粒,表明人造洪水脉冲过程对四大家鱼繁殖起到积极作用。

为进一步明确刺激四大家鱼产卵的水流信号,统计了近年三峡水库四大家鱼自然繁殖水文监测数据,结果表明:在自然涨水事件和生态调度期间,四大家鱼繁殖响应多发生在江水起涨的2 d后,与前人研究成果吻合<sup>[9,28]</sup>,因此,本研究界定可促进四大家鱼自然繁殖的涨水事件为2 d以上( $T > 2$  d)的流量上涨过程,含上涨过程中或高水位维持期个别天小于0.5%的流量回落波动。据此统计,2013—2019年(除2016年)调查监测期的涨水事件共计47次,其中32次引起了四大家鱼的产卵响应,历年涨水事件引起的总家鱼繁殖规模占当年繁殖规模的比例分别为86.44%、92.33%、94.05%、87.95%、70.95%及87.32%。

前人诸多研究表明,四大家鱼自然繁殖与初始流量、洪峰流量、涨水持续时间、流量总增长量、流量日增长率等涨水事件的生态水文指标密切相关<sup>[8,12,15]</sup>。从动物生理学角度,行为刺激的三要素为强度、时间累积和强度变化率<sup>[29]</sup>。对于四大家鱼的繁殖行为而言,刺激的强度要素可用初始流量大小、洪峰流量大小来表征,刺激的时间累积要素可用涨水持续时间的累积、流量多日增长的数量累积来表征,刺激强度的变化率要素可用流量日增长率来表征。这5个生态水文指标具有动物生理学意义,因此本文选择其来刻画涨水事件,并分析它们与四大家鱼自然繁殖行为响应的定量关系。

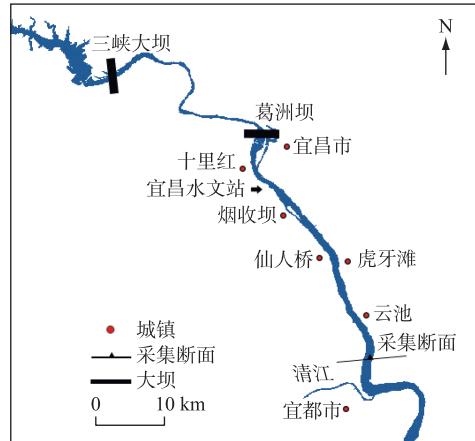


图1 研究区及采样断面示意  
Fig.1 Study area and sampling cross section

## 2.2 自然繁殖事件与有效繁殖响应界定

根据国内多个研究机构来对四大家鱼自然繁殖监测历史数据的统计分析及鱼类生理学的基础理论知识<sup>[22]</sup>,四大家鱼在繁殖季节并非连续不断进行产卵活动,早成熟的鱼群洄游至产卵场,遇到合适的洪峰过程即可产卵,一般产卵持续2~7 d不等,可能是1~2 d集中的大规模产卵,也可能是多日中等或小规模连续产卵,也可能是小间断性的多日产卵,这与亲鱼性腺发育及其对环境要素刺激的敏感性相关。而晚成熟的鱼群洄游至产卵场时可能错过了上次洪峰,就需要等待下次洪峰才能触发产卵活动。因此,界定四大家鱼的自然繁殖事件为7 d内连续产卵活动或间隔不超过2 d的多日产卵活动。据此统计,2013—2019年(除2016年)调查监测期的四大家鱼自然繁殖事件共计52次。

获取四大家鱼繁殖响应和繁殖规模等信息的最直接手段为繁殖活动调查。据2013—2019年(除2016年)调查监测结果,宜昌产卵场的四大家鱼历年自然繁殖规模分别为 $1.31 \times 10^8$ 、 $5.16 \times 10^8$ 、 $6.02 \times 10^8$ 、 $9.80 \times 10^8$ 、 $10.29 \times 10^8$ 、 $43.44 \times 10^8$ 粒,繁殖规模呈逐年回升趋势。繁殖规模年际间差异较大,这与当年参与繁殖的家鱼亲鱼数量相关。为了定量研究四大家鱼自然繁殖事件与涨水事件的响应关系,同时排除年际间亲鱼数量差异、以及少量亲鱼偶发式少量产卵对建模分析的影响,我们界定有效繁殖响应为一次自然繁殖事件的繁殖规模不少于当年该江段总繁殖规模的5%。据此统计,2013—2019年(除2016年)调查监测期的52次四大家鱼自然繁殖事件中,认为引起了鱼群有效繁殖响应的有30次,其中24次有效繁殖响应发生在2.1小节界定的涨水事件中。

## 2.3 基于ROC法的生物水文响应模型

2.3.1 单指标响应模型构建 受试者工作特征曲线法(receiver operating characteristic, ROC)是一种统计信息学方法,近年来在医学诊断、心理学、生物学及数据挖掘等领域,被认为是建立“二分类”判别模型的有效工具<sup>[30]</sup>。ROC法不依赖测试结果的规模,即对分类结果进行单调变换可以保持不变性<sup>[31]</sup>,同时根据历史研究成果,选定的5项生态水文指标均与鱼类产卵与否存在不同程度的线性响应关系,适用于ROC法应用范畴,因此本文将该方法应用于建立判别四大家鱼自然繁殖对涨水事件“是(阳)、否(阴)”响应这一“二分类”问题的判别模型。

生态调度引起的涨水事件与天然涨水事件流量过程存在一定差异。模型依据2.1小节对涨水事件的界定,选择2013—2019年(除2016年)的所有47次涨水事件作为数据样本(含9次生态调度引起的涨水事件),依据2.2小节对有效繁殖响应的界定,将这些样本分为阳性样本集和阴性样本集,按训练集与测试集8:2的比例<sup>[32]</sup>,随机选取了38次涨水事件(含18个阳性样本和20个阴性样本,阴性、阳性样本数量比接近1:1,表明建模数据集为平衡数据集)作为建模训练集,剩余9次涨水事件(含6个阳性样本和3个阴性样本)作为模型测试集。两组数据集5项生态水文指标中,涨水持续时间、初始流量和洪峰流量的均值及中位数误差均在10%以内,流量日增长和总增长的均值及中位数存在一定误差(30%~40%),但总体分布趋于相似。建模首先需进行判别试验(数值试验),根据真实情况,通过给定某判别指标的试验阈值 $I_{test}$ 判定模型判别结果。其次,统计真阳样本数(true positive, TP)、假阳样本数(false positive, FP)、真阴样本数(true negative, TN)和假阴样本数(false negative, FN)。再次,计算该试验阈值 $I_{test}$ 下模型判别的真阳率(true positive rate, TPR,表征判别模型的灵敏度)、假阳率(false positive rate, FPR,表征判别模型的误判率)、真阴率(true negative rate, TNR,表征判别模型的特异度)和假阴率(false negative rate, FNR,表征判别模型的漏判率)。而后,穷举判别试验,在给定试验阈值 $I_{test}$ 条件下遍历所有取值区间,将每个阈值 $I_{test}$ 下的(FPR, TPR)绘制成图即为ROC曲线。根据ROC曲线求解最佳判别阈值 $I_{threshold}$ ,建模流程如图2所示。

从图2中可以看出,在取不同阈值 $I_{test}$ 的判别试验中,增加模型灵敏度的同时将增加模型的误判率(如图中A点代表的判别试验),增加模型特异度的同时将增加模型的漏判率(如图中C点代表的判别试验)。因此,最佳的判别阈值应该选择ROC曲线上切点最靠近左上方的点(如图中B代表的判别试验),使模型的灵敏度和特异度均较高,同时误判率和漏判率尽可能小。B点位置的求解方法一般采用Youden指数法<sup>[33]</sup>,计算公式如下:

$$J = \max(TPR + TNR - 1) \quad (1)$$

求得ROC曲线上最靠近左上方的最佳切点后,其切点对应的判别试验阈值即为最佳判别阈值 $I_{threshold}$ 。

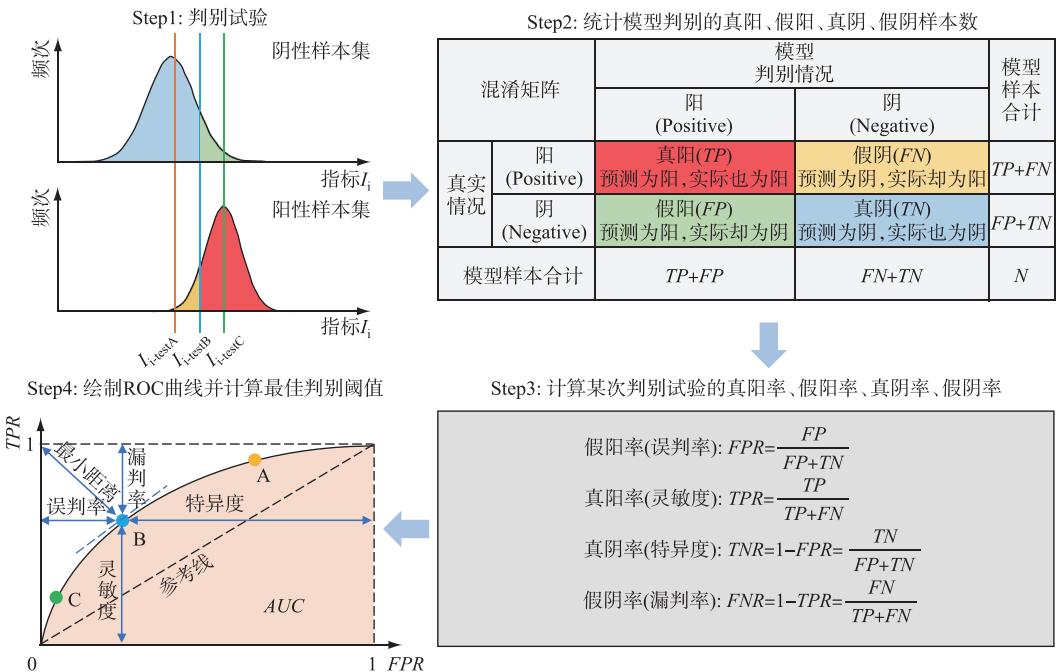


图2 生物-水文响应模型的建模流程  
Fig.2 Modeling process for predictive models

**2.3.2 多指标响应模型构建** 在单指标生物-水文响应判别模型中,若阴性样本和阳性样本的指标重叠区间较大时,就会存在较大的漏判率和误判率。因此,有必要通过多个指标来建立响应判别模型,提高模型判别的准确度。本文选择了初始流量、洪峰流量、涨水持续时间、流量总增长量和流量日增长率这5个具有动物生理学意义的生态水文指标,建立四大家鱼自然繁殖的多指标响应判别模型。多指标的联合判别建模采用“逻辑和”和“逻辑或”两种方法。

1) 逻辑和(And)法:刻画涨水事件的多个指标在单指标响应判别模型中都判定为响应(阳性)时,才综合判定四大家鱼自然繁殖对该涨水事件有效响应。该方法随着判别指标的增多,将提高模型的特异度,降低灵敏度,即误判率趋于最低,但是漏判率将随之升高。基于该方法的多指标响应模型将趋于保守。

2) 逻辑或(Or)法:刻画涨水事件的多个指标中任一指标在单指标响应判别模型中判定为响应(阳性)时,就判定四大家鱼自然繁殖对该涨水事件有效响应。该方法随着判别指标的增多,将提高模型的灵敏度,降低特异度,即漏判率趋于最低,但是误判率将随之升高。基于该方法的多指标响应模型将趋于激进。

**2.3.3 模型性能测试参数** 一个好的响应判别模型,不仅具有良好的区分度,能够正确把响应(阳性)类群和非响应(阴性)类群区分开,同时还具备良好的准确度,能够使模型判别响应类群与实际响应类群尽可能一致。因此,本文从区分度和准确度两个维度,选择了表征区分度的ROC曲线下面积(area under the curve, AUC)<sup>[34]</sup>和净重新分类指数(net reclassification index, NRI)<sup>[35]</sup>,以及表征准确度的模型准确度指数(accuracy, ACC)<sup>[36]</sup>3个参数对模型的性能进行测试。

1) AUC:评价判别模型区分性能优劣的直观指标。AUC=1时,模型可完美区分两个分类,不会出现漏判和误判的情况;0.85≤AUC<1时,模型区分效果很好;0.7≤AUC<0.85时,模型区分效果较好;0.5≤AUC<0.7时,模型区分效果一般,优于随机猜测;AUC=0.5时,ROC曲线等于参考线,模型没有区分能力,判别效果等同随机猜测。AUC<0.5时,模型判别效果比随机猜测差,但只需进行反向条件判别,便可优于随机猜测。

AUC的计算综合考虑了ROC曲线上所有点作为判别阈值时的情况,但在实际应用中,通常只选取一个最佳判别阈值,模型的实际性能取决于该最佳判别阈值下的判别能力,而非ROC曲线上所有点的判别能力。

另一方面,在不同判别模型间进行比较时,尤其是比较模型中加入新指标后的判别能力时,当 AUC 没有显著差异时,难以区分模型判别能力的优劣,因此还有待引入新的辅助性能测试参数。

2) *NRI*: 辅助 AUC 的性能测试参数,用于评价在设定判别阈值下不同模型间区分性能的优劣。例如,依据初始流量及其最佳判别阈值建立的响应判别模型会把四大家鱼的全部行为分为自然繁殖响应和非响应两类,若引入洪峰流量等其他指标和相应判别阈值后构建的新模型会把四大家鱼的行为再重新分为自然繁殖响应和非响应两类,在新模型中,有些原模型被错误分类的,可能在新模型中得到纠正,也可能原模型的正确分类在新模型中被错误分类。*NRI* 指数就是用于衡量不同模型间的这种重分类现象并评价其分类性能的指标,其计算公式如下:

$$NRI = (TPR_{model2} - TPR_{model1}) + (TNR_{model2} - TNR_{model1}) \quad (2)$$

*NRI*>0 表明 model2 的分类性能优于 model1, 反之同理。

3) *ACC*: *ACC* 用于评价模型在最佳阈值下的判别准确度。即模型所有样本中判别分类正确的比率(模型判别为阳实际也为阳的比率以及模型判别为阴实际也为阴的比率),其计算公式如下:

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN} \times 100\% \quad (3)$$

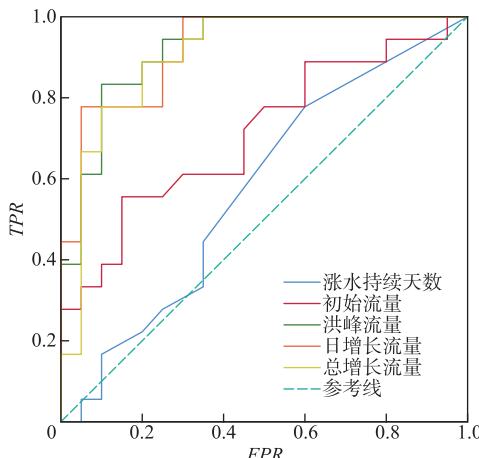


图 3 单指标响应模型的 ROC 曲线

Fig.3 ROC curve for single indicator response prediction model

### 3 三峡水库生态调度目标量化结果分析

#### 3.1 单指标最佳阈值

本文分别以初始流量  $Q_0$ 、洪峰流量  $Q_{peak}$ 、涨水持续时间  $T$ 、流量总增长量  $Q_{sum}$  和流量日增长率  $dQ$  5 个生态水文指标, 构建基于 ROC 曲线的四大家鱼自然繁殖与水文条件响应模型, 并应用 Youden 指数法求解各指标的最佳阈值, 各模型 ROC 曲线如图 3 所示, 各指标最佳阈值下的灵敏度  $TPR$ 、特异度  $TNR$ 、误判率  $FPR$ 、漏判率  $FNR$ 、以及各模型  $AUC$ 、准确度  $ACC$  等性能参数如表 1 所示。

从图 3 和表 1 中可以看出, 依据涨水持续时间  $T$  建立的单指标响应模型及其判别阈值 ( $T \geq 4$  d), 模型渐进显著性  $P$  值  $>0.05$ , 表征模型区分度性能的  $AUC$  为 0.532, 仅略大于 0.5, 表征模型判别准确度的  $ACC$  仅略大于 50%, 表明该模型接近于随机猜测, 几乎无法判别四大家鱼自然繁殖对水文条件是否响应的能力。

表 1 各生态水文指标最佳阈值及其单指标响应模型的性能参数

Tab.1 Optimal thresholds for each indicator and performance parameters of single indicator response model

指标	最佳判别 阈值	灵敏度 $TPR/\%$	特异度 $TNR/\%$	误判率 $FPR/\%$	漏判率 $FNR/\%$	渐进 95% 置信 区间显著性	AUC	ACC/%
初始流量 $Q_0/(m^3/s)$	14960	55.6	85.0	15.0	44.4	0.026	0.711	71.1
洪峰流量 $Q_{peak}/(m^3/s)$	19610	83.3	90.0	10.0	16.7	<0.001	0.893	86.8
涨水持续时间 $T/d$	4	77.8	40.0	60.0	22.2	0.438	0.532	57.9
流量总增长量 $Q_{sum}/(m^3/s)$	4050	88.9	80.0	20.0	11.1	<0.001	0.891	84.2
流量日增长率 $dQ/(m^3/(s \cdot d))$	1405	77.8	95.0	5.0	22.2	<0.001	0.917	86.8

依据初始流量  $Q_0$  建立的响应模型, 其  $P$  值  $<0.05$ ,  $AUC$  略大于 0.7,  $ACC$  超过 70%, 表明该模型具有较好的判别性能。依据洪峰流量  $Q_{peak}$ 、流量总增长量  $Q_{sum}$  和流量日增长率  $dQ$  3 个指标所建立的响应模型, 它们的  $P$  值均小于 0.05,  $AUC$  均大于 0.85,  $ACC$  超过 80%, 表明应用这 3 个指标所建立的单指标模型可以很好判别四大家鱼自然繁殖是否响应。综合对比区分度性能参数  $AUC$  和判别准确度性能参数  $ACC$ , 得出 4 个具有

较好判别能力的单指标模型性能排序为  $dQ > Q_{peak} > Q_{sum} > Q_0$ 。

### 3.2 多指标组合判别方式及其性能对比分析

根据3.1节分析及数据统计结果,由于本文界定的有效涨水事件是涨水持续时间超过2 d以上的涨水过程,统计的涨水持续时间数据范围涵盖3~11 d,依据这些数据样本建立的响应模型及其判别阈值,无法判别四大家鱼能否自然繁殖响应,表明四大家鱼自然繁殖对于超过2 d以上的涨水持续时间已不敏感,超过2 d的涨水持续时间已满足鱼类产卵行为刺激三要素中的时间累积要素要求。因此,本文选择初始流量、洪峰流量、流量总增长量和流量日增长率4个能够较好判别四大家鱼自然繁殖响应的生态水文指标,分别应用逻辑和(And)法和逻辑或(Or)法,以单指标模型中综合性能最高的 $dQ$ 指标模型为基础,尝试构建不同多指标组合的响应模型,寻找性能更佳的多指标联合判别组合。

逻辑和(And)法、逻辑或(Or)法根据上述4个生态水文指标的最佳阈值分别进行和(And)、或(Or)逻辑运算,各种指标组合的响应判别模型及其性能参数如表2所示(其中,由于多指标判别模型无法计算AUC值,以NRI和ACC作为性能参数)。在进行不同组合模型区分度性能分析时,选择NRI指数和 $dQ$ 单指标模型进行比较。从表2中可以看出, $dQ$  or  $Q_{peak}$ 的指标组合方式,模型的区分度性能提高了17.2%,判别准确度进一步提升至94.7%,该种指标组合方式的模型综合性能最佳,且比单指标最优模型性能更佳。 $dQ$  or  $Q_{peak}$ 的指标组合方式分别表征行为刺激三要素中的刺激强度及强度变化率要素,同时,持续两天以上的涨水过程表征刺激三要素中的时间累积要素,因此在该种组合方式下,所选取水文指标可兼顾鱼卵产卵行为刺激的各方面要素,对鱼类繁殖响应做出更准确的判断。

表2 多指标组合的响应模型及其性能参数

Tab.2 Response prediction model with multi-metric combination and its performance parameters

方法	指标组合	灵敏度 TPR/%	特异度 TNR/%	误判率 FPR/%	漏判率 FNR/%	NRI	ACC/%
逻辑和 (And)法	$dQ$ and $Q_0$	50.0	95.0	5.0	50.0	-27.8	73.7
	$dQ$ and $Q_{peak}$	61.1	95.0	5.0	38.9	-16.7	78.9
	$dQ$ and $Q_{sum}$	72.2	95.0	5.0	27.8	-5.6	84.2
	$dQ$ and $Q_0$ and $Q_{peak}$	50.0	95.0	5.0	50.0	-27.8	73.7
	$dQ$ and $Q_0$ and $Q_{sum}$	44.4	95.0	5.0	55.6	-33.4	71.0
	$dQ$ and $Q_{peak}$ and $Q_{sum}$	44.4	95.0	5.0	55.6	-33.4	71.0
	$dQ$ and $Q_0$ and $Q_{peak}$ and $Q_{sum}$	55.6	95.0	5.0	44.4	-22.2	76.3
	$dQ$ or $Q_0$	83.3	85.0	15.0	16.7	-4.5	84.2
	$dQ$ or $Q_{peak}$	100.0	90.0	10.0	0.0	17.2	94.7
逻辑或 (Or)法	$dQ$ or $Q_{sum}$	94.4	80.0	20.0	5.6	1.6	86.8
	$dQ$ or $Q_0$ or $Q_{peak}$	100.0	85.0	15.0	0.0	12.2	92.1
	$dQ$ or $Q_0$ or $Q_{sum}$	100.0	70.0	30.0	0.0	-2.8	84.2
	$dQ$ or $Q_{peak}$ or $Q_{sum}$	100.0	75.0	25.0	0.0	2.2	86.8
	$dQ$ or $Q_0$ or $Q_{peak}$ or $Q_{sum}$	100.0	70.0	30.0	0.0	-2.8	84.2

### 3.3 模型方法验证

采用测试集对3.1节和3.2节建立的最佳单指标响应模型和多指标响应模型进行验证,相应生态水文指标参数及验证结果如表3所示。从表中可以看出,仅用 $dQ$ 单指标及其最佳阈值对涨水事件是否会引起四大家鱼自然繁殖响应进行判别时,测试集中的9场次涨水事件(含2次生态调度引起的人造涨水事件),模型判别正确了8场次,1场次误判(预测为阳,实际为阴),0场次漏判(预测为阴,实际为阳),测试集中的判别准确度达88.8%。应用 $dQ$  or  $Q_{peak}$ 多指标模型进行判别时,模型对测试集的判别效果和 $dQ$ 单指标模型一致。这表明 $dQ$ 单指标模型和 $dQ$  or  $Q_{peak}$ 多指标模型都具有较好的实际判别预测效果。误判的涨水事件5中,7月2日—7月3日单日涨水量超过10000 m<sup>3</sup>/s,其余涨水阶段日涨水量均低于 $dQ$ 单指标判定阈值,未形成连续的高流量增长刺激,导致对四大家鱼繁殖响应的误判。

表 3 最佳单指标响应模型和多指标响应模型的指标参数及验证结果<sup>1)</sup>

Tab.3 Indicator parameters and validation results of the best single-indicator model and multi-indicator model

涨水事件 编号	年份	日期 (月-日)	流量日增长率 $dQ/(m^3/(s\cdot d))$	洪峰流量 $Q_{peak}/(m^3/s)$	$dQ$ 单指标模型 预测结果	$dQ$ or $Q_{peak}$ 多指标模型 预测结果	实际 情况
5	2013	6-5—6-7	3500	19200	1	1	1
8	2013	6-30—7-5	3520	29200	1*	1*	0
13#	2014	6-2—6-7	1500	18900	1	1	1
18	2015	5-1—5-5	153	13130	0	0	0
20	2015	5-12—5-15	183	13250	0	0	0
30	2017	6-15—6-19	1778	23920	1	1	1
32	2017	7-4—7-10	3512	28370	1	1	1
35#	2018	5-19—5-25	1558	25310	1	1	1
44	2019	6-10—6-12	1885	18370	1	1	1

1) 单指标模型中判别阈值为  $dQ \geq 1405 m^3/(s\cdot d)$ , 多指标模型中判别阈值为  $dQ \geq 1405 m^3/(s\cdot d)$  or  $Q_{peak} \geq 19610 m^3/s$ ; \* 表示模型判别结果与实际情况相悖; #表示该涨水事件是由生态调度引起的人造涨水事件; “1”表示阳性, 即有效繁殖响应; “0”表示阴性, 即无效繁殖响应。

## 4 讨论

### 4.1 模型对有效繁殖响应阈值的敏感性分析

前文 2.2 小节中, 界定了鱼类有效繁殖响应的阈值为一次自然繁殖事件的繁殖规模不少于当年该江段总繁殖规模的 5%。为了评估模型对有效繁殖阈值的敏感性, 将阈值设置为 1%、5%、8%、10%、15% 和 20%, 分别计算模型的主要性能指数 AUC 和 ACC, 结果如图 4 所示。

从图中可以看出, 当有效繁殖阈值界定为年产卵规模的 1% 时, 单指标响应模型的性能指标 AUC 值稳定在大于 0.7 的良好预测效果区间, 但模型判别准确度 ACC 值则相较有效繁殖阈值界定为 5% 时有所下降。当有效繁殖阈值界定在年产卵规模的 8%、10% 和 15% 时, 洪峰流量  $Q_{peak}$ 、流量总增长量  $Q_{sum}$  和流量日增长率  $dQ$  的单指标响应模型的 AUC 及 ACC 值均随有效繁殖阈值的增加呈下降趋势。当有效繁殖阈值界定大于年产卵规模的 15% 时, 部分指标 AUC 及 ACC 值呈上升趋势, 部分指标的 AUC 及 ACC 值则呈下降趋势。综合来看, 前文将有效繁殖阈值界定为该江段总繁殖规模的 5% 对于本文建立的生物水文响应模型而言是适宜的。

### 4.2 模型方法的局限性

本文建立的响应模型是基于 2013—2019 年宜昌-宜都江段水文和生物观测数据, 这些数据表征的是三峡水库试验运行期以来(2010 年 10 月以来, 三峡水库运行方式为蓄水期蓄水至正常蓄水位 175 m, 汛期汛限水位控制在 145 m)四大家鱼宜昌产卵场自然繁殖对水库调蓄作用下生态水文条件的响应特性。因此, 本文建立的模型及其阈值可适用于三峡水库试验运行期至今四大家鱼宜昌产卵场自然繁殖响应的判别与预测。

相同研究时期, 周雪等<sup>[8]</sup>根据监利江段 2013—2017 年生态调度期间四大家鱼的繁殖活动观测, 得出涨水持续时间  $T \geq 4$  d, 流量日增长率  $dQ$  达到  $1600 \sim 2833 m^3/(s\cdot d)$ , 可刺激四大家鱼集中产卵。徐薇等<sup>[9]</sup>基于 2011—2018 年宜昌至沙市江段四大家鱼的繁殖活动观测, 提出初始流量  $Q_0 \geq 14000 m^3/s$ , 涨水持续时间  $T \geq 4$  d, 流量日增长率  $dQ \geq 2000 m^3/(s\cdot d)$  是促进四大家鱼产卵的生态水文需求, 相关指标与本文单指标响应模型及其判别阈值结论相仿, 但由于研究区域不同, 相关生态水文指标的判别阈值略有不同。对于宜昌下游沙市、监利、洪湖等其他四大家鱼传统产卵场对水文条件的繁殖响应判别, 需要根据相应产卵场的水文与生物观测数据, 建立模型并计算最佳阈值。

另一方面, 本文提出的响应模型建模方法是基于概率统计学方法, 数据样本越多, 模型预测结果越接近真实情况。若进一步增加模型的训练样本, 各指标的最佳阈值可能略有变化, 最佳多指标响应模型的指标组合方式可能发生变化。此外, 对于超出训练集生态水文指标取值范围的涨水事件, 模型对其是否能引起四大家鱼自然繁殖响应的判别可能失真, 这就需要根据新的实测数据对模型进行滚动训练, 不断完善模型性能。

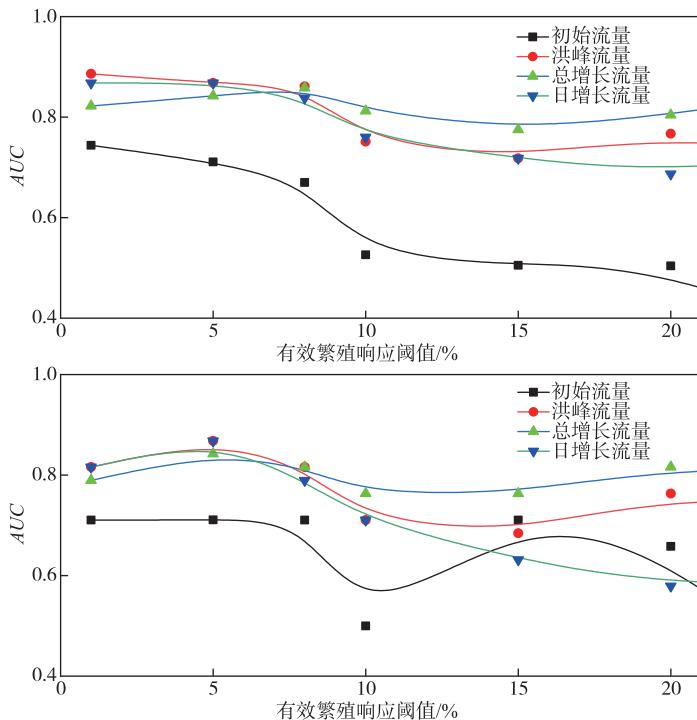


图 4 模型性能变化曲线(性能指标数值越高,模型性能越好)

Fig.4 Curve for performance of the model

#### 4.3 模型方法的应用场景

医学领域疾病诊断应用广泛的 ROC 法及其最佳指标阈值确定方法在生态分析中的适用性已得到验证。朱耿平等<sup>[37]</sup>将 ROC 法应用于生态位模型评价中,预测物种潜在分布和现实分布;李宏群等<sup>[38]</sup>运用 ROC 曲线分析 Maxent 模型对水葫芦适生区的预测准确性,均取得了较好的预测效果。本文借鉴医学领域疾病诊断应用广泛的 ROC 法及其最佳指标阈值确定方法,根据实际水文和鱼类繁殖观测数据,构建了四大家鱼宜昌产卵场自然繁殖对生态水文条件的响应判别模型及其最佳模型优选方法。经模型性能测试和验证,优选的最佳单指标模型和多指标模型对于训练集和测试集均具有较好的预测判别效果,可直接应用于三峡水库泄放水文过程是否会引起下游四大家鱼宜昌产卵场自然繁殖的预测。另一方面,本文构建的响应模型及其确定的指标最佳阈值充分考虑了鱼类在水库运行后不同水文条件下的实际繁殖响应情况,相比传统生态调度方案制定时根据鱼类天然繁殖生态水文需求划定的较大范围指标阈值而言,其预见性更强,不确定性更低。据此量化水库生态调度的目标并制定相应方案,将初始流量  $Q_0$ 、洪峰流量  $Q_{\text{peak}}$ 、流量总增长量  $Q_{\text{sum}}$  和流量日增长率  $dQ$  的最佳阈值作为生态调度水文指标部署的下限值,即采用  $Q_0 \geq 14960 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\text{peak}} \geq 19610 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{\text{sum}} \geq 4050 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $dQ \geq 1405 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$  的单指标或多指标要求作为生态调度目标,可有效提高生态调度实践的成功率。

虽然模型具有工程和地域局限性,但是本文提出的涵盖“涨水事件界定及生态水文指标选择—鱼类自然繁殖事件及有效繁殖响应界定—ROC 单指标生物水文响应模型构建—多指标生物水文响应模型构建—模型性能参数对比—模型优选”等各个环节的数学模型与生态调度目标量化方法体系具有普适性。尽管模型构建过程复杂,但其结果形式简单,以单指标或多指标组合方式呈现,以划定的各指标最佳阈值来进行预测判别和调度目标制定,易推广至不同流域、不同水库和一线人员进行应用。

## 5 结论

本文借鉴医学领域的疾病诊断和最佳指标阈值确定方法,应用2013—2019年(除2016年)6年47场次涨水事件和24次四大家鱼有效繁殖响应的实际观测数据,建立阳性(响应)样本集和阴性(无响应)样本集,选择了5个生态水文指标(初始流量 $Q_0$ 、洪峰流量 $Q_{peak}$ 、涨水持续时间 $T$ 、流量总增长量 $Q_{sum}$ 和流量日增长率 $dQ$ )刻画涨水事件,构建了四大家鱼自然繁殖对涨水事件的单指标生物水文响应模型和多指标响应模型,并以此量化了三峡水库的生态调度目标,得出如下结论:

1)5个生态水文指标中,依据涨水持续时间 $T$ (基于 $T>2$  d的有效涨水统计数据)建立的单指标响应预测模型几乎无法判别四大家鱼自然繁殖对水文条件是否响应的能力,表明四大家鱼自然繁殖对于超过2 d以上的涨水持续时间不敏感;依据初始流量 $Q_0$ 、洪峰流量 $Q_{peak}$ 、流量总增长量 $Q_{sum}$ 和流量日增长率 $dQ$  4个指标所建立的单指标响应模型具有较好的判别能力,各指标最佳阈值分别为14960 m<sup>3</sup>/s、19610 m<sup>3</sup>/s、4050 m<sup>3</sup>/s和1405 m<sup>3</sup>/(s·d),可作为三峡水库生态调度目标;单指标模型性能排序为 $dQ>Q_{peak}>Q_{sum}>Q_0$ 。

2)依据 $dQ$  or  $Q_{peak}$ 的指标组合方式建立的多指标响应模型,其区分度性能提高了17.2%,预测准确度进一步提升至94.7%,该种指标组合方式的模型综合性能最佳。

3)生物-水文响应模型构建过程充分考虑了四大家鱼在水库运行后不同水文条件下的实际繁殖响应情况,预见性更强,不确定性更低,据此量化的生态调度目标可指导水库生态调度方案的制定,提高生态调度实践的成功率。

## 6 参考文献

- [1] Mulligan M, van Soesbergen A, Sáenz L. GOODD, a global dataset of more than 38,000 georeferenced dams. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 1-8.
- [2] Zhu Y. Commentary on dam influence on fish habitat and evaluation on assessment method. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2005, 3(2): 100-103. [朱瑶. 大坝对鱼类栖息地的影响及评价方法述评. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 100-103.]
- [3] Talukdar S, Pal S. Effects of damming on the hydrological regime of Punarbhaba River Basin wetlands. *Ecological Engineering*, 2019, 135: 61-74.
- [4] Olden JD, Konrad CP, Melis TS et al. Are large-scale flow experiments informing the science and management of freshwater ecosystems? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(3): 176-185. DOI: 10.1890/130076.
- [5] Wang L, Chen QW, Zhang JW et al. Incorporating fish habitat requirements of the complete life cycle into ecological flow regime estimation of rivers. *Ecohydrology*, 2020, 13(4): e2204.
- [6] Zheng SR. Development and utilization of hydropower resources in China: Opportunity and challenges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, (S1): 1-6. [郑守仁. 我国水能资源开发利用的机遇与挑战. 水利学报, 2007, (S1): 1-6.]
- [7] Cai QH, Sun ZY. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: Progress and prospects. *J Lake Sci*, 2012, 24(2): 169-177. DOI: 10.18307/2012.0201. [蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望. 湖泊科学, 2012, 24(2): 169-177.]
- [8] Zhou X, Wang K, Chen DQ et al. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on larval resources of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(8): 1781-1789. [周雪, 王珂, 陈大庆等. 三峡水库生态调度对长江监利江段四大家鱼早期资源的影响. 水产学报, 2019, 43(8): 1781-1789.]
- [9] Xu W, Yang Z, Chen XJ et al. Three Gorges Reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1129-1139. [徐薇, 杨志, 陈小娟等. 三峡水库生态调度试验对四大家鱼产卵的影响分析. 环境科学与技术, 2020, 33(5): 1129-1139.]
- [10] Guo WX, Xia ZQ, Wang YK et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 554-559. [郭文献, 夏自强, 王远坤等. 三峡水库生态调度目标研究. 水科学进展, 2009, 20(4): 554-559.]
- [11] Zhang H, Zeng CJ, Li T et al. Ecological flow in the mid-lower Hanjiang River based on spawning demands of the four major Chinese carps. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(3): 1-8. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202101190013. [张辉, 曾晨军, 李婷等. 基于四大家鱼产卵需求的汉江中下游生态流量研究. 水生态学杂志, 2022, 43(3): 1-8.]
- [12] Yu LX, Lin JQ, Chen DQ et al. Ecological flow assessment to improve the spawning habitat for the four major species of carp of the Yangtze River: A study on habitat suitability based on ultrasonic telemetry. *Water*, 2018, 10(5): 600. DOI: 10.3390/w10050600.

- [13] Zhang GH, Chang J, Shu GF. Applications of factor-criteria system reconstruction analysis in the reproduction research on grass carp, black carp, silver carp and bighead in the Yangtze River. *International Journal of General Systems*, 2000, **29**(3): 419-428. DOI: 10.1080/03081070008960949.
- [14] Li CD, Lin JQ, Xia JH et al. Ecohydrological response changes in the spawning behaviors of the four major Chinese carps species since the operation of the Three Gorges Reservoir. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, **52**(5): 158-166.
- [15] Chen QW, Zhang JY, Chen YC et al. Inducing flow velocities to manage fish reproduction in regulated rivers. *Engineering*, 2021, (7): 178-186.
- [16] 杨庆. 典型鱼类生存繁衍适宜水文条件与适应阈值实验研究[学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [17] 柏海霞. 长江宜都四大家鱼产卵场地形特征及生态水力因子分析[学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
- [18] 孙铭帅. 长江中游城陵矶至宜昌江段鱼群密度分布特征研究[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [19] Liu MD, Gao L, Tian HW et al. Status of fishes at the early life history stage in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, **25**(1): 147-158. [刘明典, 高雷, 田辉伍等. 长江中游宜昌江段鱼类早期资源现状. 中国水产科学, 2018, **25**(1): 147-158.]
- [20] 易伯鲁, 余志堂, 梁秩燊等. 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.
- [21] 沈忱. 长江上游鱼类保护区生态环境需水研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2015.
- [22] 林浩然. 鱼类生理学. 广州: 广东高等教育出版社, 1999.
- [23] Peng QD, Liao WG, Li C et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since the impoundment. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2012, **44**(S2): 228-232. DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.s2.041. [彭期冬, 廖文根, 李翀等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, **44**(S2): 228-232.]
- [24] Cai YP, Yang Z, Xu W. Effect of water temperature variation after impoundment of the Three Gorges Reservoir on natural reproduction of the four major Chinese carps. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, **49**(1): 70-77. DOI: 10.15961/j.jsuese.2017.01.009. [蔡玉鹏, 杨志, 徐薇. 三峡水库蓄水后水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响. 工程科学与技术, 2017, **49**(1): 70-77.]
- [25] 张爱民. 梯级水电开发对长江干流生态水文情势影响研究[学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018.
- [26] Bai HX, Peng QD, Li C et al. A summary of topographical characteristics of the four major Chinese carps' spawning grounds and hydrodynamic conditions for natural propagation in the Yangtze River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, **12**(3): 249-257. [柏海霞, 彭期冬, 李翀等. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, **12**(3): 249-257.]
- [27] 长江渔业资源管理委员会办公室. 长江三峡工程生态与环境监测系统渔业资源与环境监测重点站技术报告(2007—2009), 2009.
- [28] Guo WX, Wang HX, Xu JX et al. Effects of Three Gorges Reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, **30**(3): 22-26, 38. [郭文献, 王鸿翔, 徐建新等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究. 水力发电学报, 2011, **30**(3): 22-26, 38.]
- [29] 白波, 高明灿. 生理学. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [30] Ma H, Bandos AI, Gur D. On the use of partial area under the ROC curve for comparison of two diagnostic tests. *Biometrical Journal*, 2015, **57**(2): 304-320.
- [31] 王彦光, 朱鸿斌, 徐维超. ROC 曲线及其分析方法综述. 广东工业大学学报, 2021, **38**(1): 46-53.
- [32] Zhang H, Shi YY, Liu JW et al. Selection method of data set for validation of prediction model. *Chinese Journal of Pediatrics*, 2021, **59**(6): 1. [张华, 石岩岩, 刘家玮等. 预测模型验证数据集的选择方法. 中华儿科杂志, 2021, **59**(6): 1.]
- [33] Youden WJ. Index for rating diagnostic tests. *Cancer*, 1950, **3**(1): 32-35.
- [34] Bradley AP. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*, 1997, **30**(7): 1145-1159.
- [35] Chen FC, Xu YC, Zhang ZC. Multi-biomarker strategy for prediction of myocardial dysfunction and mortality in sepsis. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 2020, **21**(7): 537-548.
- [36] Ling CX, Huang J, Zhang H. AUC: A statistically consistent and more discriminating measure than accuracy. International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2003: 519-524.
- [37] Zhu GP, Fan JY, Wang ML et al. The importance of the shape of receiver operating characteristic (ROC) curve in ecological niche model evaluation-case study of *Hlyphantria cunea*. *Journal of Biosafety*, 2017, **26**(3): 184-190. [朱耿平, 范靖宇, 王梦琳等. ROC 曲线形状在生态位模型评价中的重要性——以美国白蛾为例. 生物安全学报, 2017, **26**(3): 184-190.]
- [38] Li HQ, Li YX, Liu XL et al. Prediction of potential distribution for water hyacinth in China by using Maxent ecologic niche model. *Ecological Science*, 2018, **37**(3): 143-147. [李宏群, 李宇轩, 刘晓莉等. 基于 Maxent 生态位模型的水葫芦在中国的适生区预测. 生态科学, 2018, **37**(3): 143-147.]