

中小河流鱼类生境适宜性评估模型与等级分区

夏继红¹, 秦如照¹, 窦传彬¹, 汪颖俊², 王启挺², 胡璇璇³

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 龙游县林业水利局, 浙江 龙游 324400;
3. 遂昌县水利局, 浙江 遂昌 323300)

摘要:以浙江省龙游县社阳溪厚唇光唇鱼为代表性鱼类,通过2017—2020年现场鱼类群落与生境影响因子调查,采用广义可加(GAM)模型和栖息地适宜性指数(HSI)模型,构建了社阳溪厚唇光唇鱼生境适宜性评估模型,并分析其生境适宜性阈值范围及分区。结果表明:采用GAM赋权的算术平均算法(AMM)具有最好的模型拟合度,流速、水深及叶绿素a的质量浓度是生境适宜性指数模型的关键解释变量,其偏差贡献率分别为61.5%、21.0%和12.5%。厚唇光唇鱼最适宜流速为37~58 cm/s,最适宜水深为40~63 cm,最适宜叶绿素a质量浓度为0.10~0.35 mg/m³。厚唇光唇鱼生境分区具有较强的时空差异性,在空间上,最适宜生境主要分布在中下游河段;在时间上,2019—2020年生境适宜度明显变差。

关键词:生境适宜性;河流健康;厚唇光唇鱼;主成分分析法;广义可加模型

中图分类号:X171.1;X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0009-05

Habitat suitability assessment model and suitability grading classification for fishes in small and medium rivers//
XIA Jihong¹, QIN Ruzhao¹, DOU Chuanbin¹, WANG Yingjun², WANG Qiting², HU Xuanxuan³ (1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Longyou Forestry and Water Conservancy Bureau, Longyou 324400, China; 3. Suichang Water Conservancy Bureau, Shuichang 323300, China)
Abstract: Taking the *acrosocheilus labiatus* in the Sheyang River of Longyou County, Zhejiang Province as the representative fish, a habitat suitability model was established by using GAM and HSI models through the investigation of fish communities and possible habitat impact factors in the field from 2017 to 2020. The habitat suitability zoning and threshold range were analyzed. The results show that the arithmetic mean algorithm (AMM) for weighting GAM models has the best model fitness. Flow rate, chlorophyll a and water depth are the key explanatory variables of the habitat suitability index model, and their deviation contribution rates are 61.5%, 21.0% and 12.5%, respectively. The optimum flow rate is from 37 to 58 cm/s, the optimum water depth is from 40 to 63 cm, and the optimum chlorophyll a is from 0.10 to 0.35 mg/m³. The habitat zoning of the *acrosocheilus labiatus* has strong spatial-temporal differences. The optimum habitat is mainly distributed in the upper and middle reaches of the river while the habitat suitability significantly deteriorated in 2019 and 2020.
Key words: habitat suitability; river health; *acrosocheilus labiatus*; principal component analysis; generalized additive model

鱼类是河流生态系统中的顶级群落,决定着河流生态系统物质交换和能量交换过程,是河流生态系统相对敏感的指示性物种^[1]。鱼类生境是指鱼类赖以生存、繁衍的空间和环境^[2],对河流健康起着重要的指示作用^[3]。近年来,由于人类工农业活动的干扰,鱼类生境和水生生态系统发生了巨大的变化,部分鱼类由于生境严重退化成了濒危物种。为了保护鱼类生境及河流生态系统,国内外学者综合考虑基质、水域水质、水动力因子,研究提出了不

同鱼种的生境评价模型。例如,易雨君等^[4-5]建立了中华鲟、长江江豚等濒危鱼类的生境评价模型,分析了濒危鱼类生境适宜性分布。Bridgette等^[6]基于生态系统的方法建立了阿兰萨斯湾比目鱼的生境评价模型。现有的研究成果大多关注于骨干河流的渔业生境,而山丘区中小河流作为另一种典型生态系统,因其特殊的地貌形态,其河流水流特点、水环境条件、养分条件等鱼类生境条件均与骨干河流具有很强的差异性,需单独进行研究。目前常用的生境适

宜性评价方法包括栖息地适宜性指数 (HSI) 模型、多元统计方法、模糊逻辑方法、人工神经网络等,其中,HSI 模型是生境适宜性评价中最为常用的定量方法,被广泛应用于平原水域及大型骨干河流鱼类生境适宜性研究^[7]。但因该方法缺少对关键影响因子的筛选和权重确定,无法反映出关键影响因子对生境的贡献。因此,本文以浙江省龙游县社阳溪为研究区域,以厚唇光唇鱼为代表鱼类,应用生境适宜性指数模型与广义可加模型 (GAM) 耦合,拟合出关键影响因子的生境适宜性曲线,研究建立社阳溪厚唇光唇鱼的生境适宜性评估模型,并对生境适宜性等级进行分区,以期对山丘区中小型河流鱼类生境保护及河流生态修复工作提供参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

龙游县 (119°02′ ~ 119°20′E, 28°44′ ~ 29°17′N) 位于浙江省西部,金衢盆地中部,地处亚热带季风气候区,具有明显的盆地特征,年平均气温 17.1℃,年降雨量 1 666.4 mm。社阳溪是龙游县境内衢江支流之一,为典型的山丘区中小型河流,全长 36 km,流域面积 112 km²,中上游流经山地,河谷深窄,自然落差大,水流湍急,下游河道弯曲,支流发育,水源充沛。自 2019 年起,在社阳溪的高坪桥村位置修建大坝,形成高坪桥水库。厚唇光唇鱼是社阳溪的重要本土鱼种。

1.2 监测断面布置与野外调查方法

根据河道坡降,将社阳溪分成上中下 3 个河段,分别在各河段选取 2 或 3 个监测断面,下游河段监测断面包括红村畈 (S1)、红光村 (S2),中游河段监测断面包括坝下游 (S3)、坝址 (S4),上游右侧支流汇流口包括汇流口 (S6)、上茶园 (S7)、大公殿 (S8),左侧支流包括汇流口 (S5)、马鞍岭底 (S9)、连下桥 (S10)、路底铺 (S11),见图 1。采用背负式电鱼器法^[8]开展鱼类数据调查,调查范围为监测断面上下游各 25 m。

在每个断面等距确定 3 个点位,采用水深仪和流速仪分别测量各监测断面的水深、表层流速、中层流速、底层流速。应用多参数水质仪监测各测点的 pH 值、水温、叶绿素 a 质量浓度、溶解氧质量浓度,采集水样带回实验室,采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、酸性过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定总氮和总磷质量浓度,以 3 个点位的水质、水动力数据的平均值作为断面的数值。

分别于 2017 年 7 月 6 日、2018 年 7 月 5 日、2019 年 7 月 6 日、2020 年 8 月 27 日开展鱼类调查

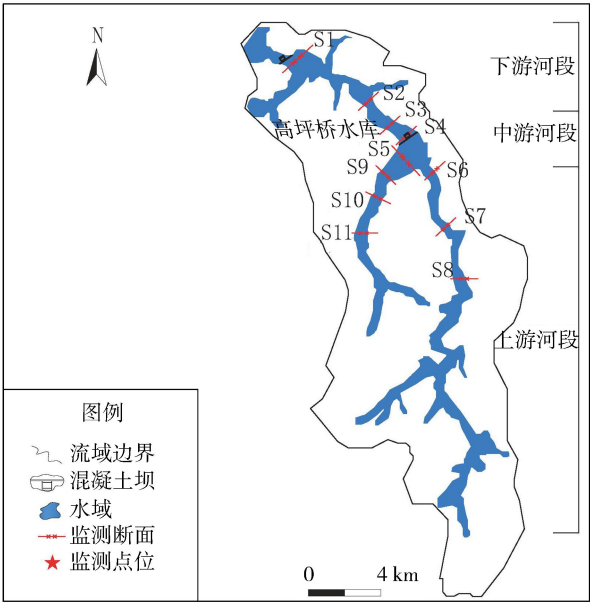


图 1 监测断面布置与监测点位

及水质和水动力数据监测工作。其中,2017 年与 2018 年水库尚未动工修建,所有监测断面处于自然河流状态,均进行了鱼类调查与水质、水动力数据监测工作。2019 年开始修建水库, S4 与 S5 断面受工程扰动影响较大,鱼类无法游至其他河段,故仅进行水质、水动力数据监测;其他监测断面受工程扰动影响较小,鱼类可自由游动,均进行鱼类调查与水质、水动力数据监测工作。2020 年水库修建完成,仅 S7、S8、S10、S11 断面受工程扰动影响较小,鱼类可自由游动,进行了鱼类调查与水质、水动力数据监测工作;其他断面仅进行水质、水动力数据监测。所有监测所得数据均用于模型构建或验证。

1.3 数据处理方法

a. HSI 模型。HSI 模型是 20 世纪 80 年代美国地理调查局国家湿地研究中心鱼类和野生生物署提出的定量研究生物偏好与栖息地生境因子之间关系的常见方法^[9]。HSI 模型通常针对目标物种,假设物种的丰度与栖息地生境因子间存在响应关系,以评估栖息地适宜度。栖息地适宜度指数有单变量格式、二元格式和多变量格式 3 种格式。指数取值范围在 0 ~ 1 之间,指数值越大表明栖息地适宜度越高。该方法被全球 90% 的鱼类栖息地模型所采用,其中应用最广泛的 PHABSIM 模型就采用了该方法^[7]。

b. GAM 模型。GAM 模型是 1990 年 Hastie 和 Tibshirani 在加性模型基础上提出的非参数拟合模型,该模型利用光滑样条函数或核函数单独对每个自变量进行关系预测,最终利用相加的方式来解释自变量对因变量的影响,模型的基本表达见式 (1)。GAM 模型适用于仅有单一响应变量且变量符合指数族规律的拟合,因其在处理响应变量和解释变量

之间高度非线性和非单调关系方面的能力,被广泛用于渔获率与环境关系研究^[7]。

$$g(\mu) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k f_i(x_i) + \varepsilon \tag{1}$$

其中 $\mu = E(Y/x)$

式中: Y 为响应变量; x 为解释变量; $g(\mu)$ 为依据响应变量分布选取的联结函数; β_0 为常数截距项; $f_i(x_i)$ 为用于表述 $g(\mu)$ 与第 i 个解释变量关系的非参数函数; k 为各变量的自由度; ε 为随机误差项。

c. 主成分分析法 (PCA)。PCA 是用于分析多重共线性数据的一种多变量统计方法。PCA 主要通过一系列原始变量的线性组合来解释数据集,得出互不相关的“新隐含变量”,是一种降维统计方法^[10]。该方法通过非生物变量的数据找出主成分,然后用选出的主成分对响应变量进行回归,被用于许多水生栖息地研究^[7]。

2 模型构建

2.1 关键因子识别及权重确定

2.1.1 基于广义可加模型关键因子识别及权重确定

本文采用 Pearson 相关性分析剔除共线性较高的预测变量;利用 P-P 图、Q-Q 图分析确定响应变量的分布类型以及其对应的联结函数^[11]。采用逐步分析法进一步筛选解释变量,根据赤池信息量准则 (AIC 准则) 及模型偏差系数检验逐步加入解释变量后的模型拟合程度。选取最优 GAM 中的解释变量作为关键影响因子,根据最优 GAM 中累积偏差贡献率等比确定各变量的权重。

经 Pearson 相关性分析,溶解氧与总磷质量浓度、pH 值与水温存在显著相关性。总磷不仅能够影响水中藻类物质从而影响到溶解氧质量浓度,而且能够影响鱼类的生长速度、脂肪代谢和骨骼矿化程度,从而影响到鱼类的生长和繁殖。水温更是对鱼类的新陈代谢、游泳能力有着决定性的影响。因此,本文选取水温和总磷质量浓度作为解释变量。根据厚唇光唇鱼丰度绘制正态 P-P 图和 Q-Q 图(图 2),可见散点基本落在对角线附近,可认为厚唇光唇鱼丰度呈正态分布,因此 GAM 以 Identity link 作为联结函数。GAM 识别的关键因子如表 1 所示,最优模型含流速、水深、叶绿素 a 质量浓度 3 个关键影响因子,计算得出权重分别为 0.65、0.13 和 0.22。

2.1.2 基于主成分分析法关键因子识别及权重确定

对 8 个水动力及水质因子进行主成分分析,将特征值大于或等于 1 的每个主成分中因子荷载最大的指标作为关键影响因子,根据公因子方差等比确定其权重^[12]。最终分析结果见表 2,共识别出 3 个

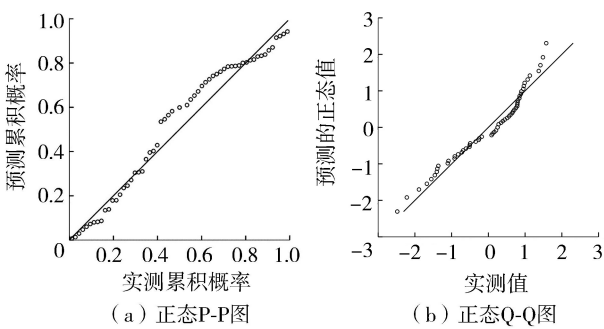


图 2 厚唇光唇鱼丰度分布

表 1 GAM 和 AIC 准则变量筛选结果

模型因子	AIC 值	R ²	p	偏差 贡献率/%	累积偏差 贡献率/%
流速	228.68	0.539	<0.001	61.5	61.5
水深	208.48	0.665	<0.001	12.5	74.0
叶绿素 a 质量浓度	207.74	0.892	<0.001	21.0	95.0
总磷质量浓度	209.74	0.892			
水温	210.82	0.898			
总氮质量浓度	212.76	0.791			

注: R² 为拟合优度; p 为模型真实度。

表 2 主成分分析结果及公因子方差

水动力及水质因子	主成分分析			公因子 方差
	1	2	3	
流速	-0.312	0.328	0.730	0.738
水深	-0.773	0.265	0.284	0.749
叶绿素 a 质量浓度	0.021	0.847	0.341	0.834
pH 值	0.771	-0.380	-0.007	0.739
水温	0.301	0.239	0.607	0.517
溶解氧质量浓度	0.760	0.496	-0.108	0.836
总磷质量浓度	0.582	-0.347	0.188	0.494
总氮质量浓度	-0.692	-0.483	0.318	0.815

主成分因子, 累积偏差贡献率分别为 34.735%、60.947%、81.530%。该方法同样识别出流速、水深、叶绿素 a 质量浓度为关键因子, 计算得出其权重分别为 0.32、0.32、0.36。

2.1.3 关键因子识别结果解释

研究区社阳溪全河段均为天然形成的砾石基质, 不同河段的砾石粒径并无明显差异, 因此, 无需对基质进行关键因子识别。但不同河段由于人类干扰程度、坡降不同等因素, 水质及水动力差异性较大。因此, 本文选取水质及水动力因子进行关键因子识别。

GAM 与 PCA 均为数据驱动的非参数方法, 从业经验及主观因素影响较小, 且能有效降低环境变异引起的不确定性, 从而客观描述鱼类对于生境的选择。本文两种方法研究结果均显示, 研究区域内厚唇光唇鱼生境适宜性关键影响因子为流速、叶绿素 a 质量浓度和水深。流速是鱼类生境的一项重要影响因子, 鱼类能根据水流的速度随时调整自身

的游向和流速,使自身保持逆流游泳状态或长时间停留在某一特定位置^[13],不仅如此,流速还能通过影响水质间接影响鱼类生境。厚唇光唇鱼为肉食性鱼类,食肉的特性十分强烈,主要以浮游动物为主。叶绿素 a 质量浓度是衡量浮游植物的主要指标,而浮游植物作为浮游动物天然食物,其在水体中的密度与浮游动物生长繁殖密切相关^[14]。社阳溪中厚唇光唇鱼饵料来源多为浮游动物,无人工投喂等其他来源。因此,叶绿素 a 质量浓度与其生境密切相关。水深不仅能够影响水压力,也能直接影响到其他水文要素,从而直接影响鱼类行为。

2.2 厚唇光唇鱼生境适宜性指数模型

2.2.1 模型构建

a. 单因子生境适宜度模型。基于每个监测点厚唇光唇鱼的丰度(厚唇光唇鱼尾数占该点捕获鱼类总尾数的比例),我们可以定义一个单因子生境适宜度指数 SI,SI 取值范围在 0 ~ 1 之间,SI 值越大,生境适宜度越高,默认厚唇光唇鱼丰度最大的监测点 SI 值为 1,SI 值处于 0.7 ~ 1 为厚唇光唇鱼最佳单因子生境适宜度范围。SI 的计算公式如下^[15]:

I_{SI} = \frac{Y - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} \tag{2}

式中:I_{SI}为生境适宜度指数;Y为经过平滑回归拟合的丰度;Y_{max}、Y_{min}分别为预测值的最大和最小值。

b. 综合因子生境适宜度模型。综合因子生境适宜性指数 HSI 由多个 SI 值综合计算所得,采用算术平均法(AMM)和几何平均法(GMM)两种方法进行综合,模型分别见式(4)和(5)。式中的权重分别采用广义可加模型及主成分分析法两种方法确定。

I_A = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \sum_{i=1}^n I_{SI} \tag{3}

I_G = (\prod_{i=1}^n I_{SI}^{\omega_i}) (\sum_{i=1}^n \omega_i)^{-1} \tag{4}

式中:I_A、I_G分别为采用算术平均法和几何平均法得到的生境适宜性指数,取值范围均为 0 ~ 1,数值越高,生境质量越好;\omega_i为第 i 个解释变量的权重;n 为

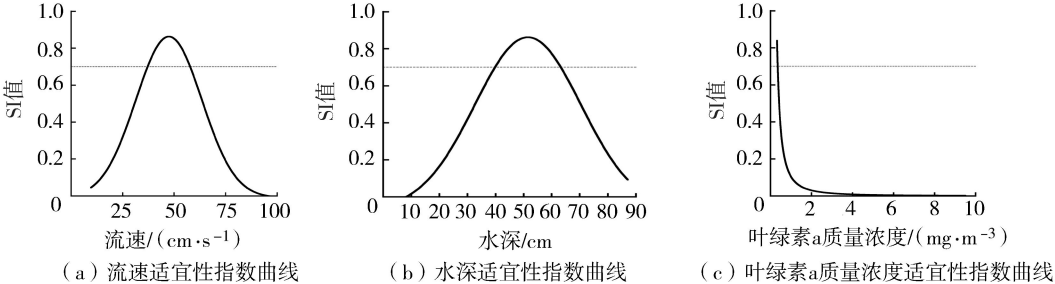


图3 厚唇光唇鱼流速、水深和叶绿素 a 质量浓度的适宜性指数曲线

解释变量的个数。
本文采用 AIC 准则比较两种模型,将 PCA 与 GAM 方法确定的权重分别代入到 AMM 和 GMM 算法中,得到 4 种不同的模型,再采用 RStudio 软件中的 AIC 函数分别计算出 4 种模型的 AIC 值,AIC 值最小的模型具有最好的模型拟合度,可作为最终模型。结果表明采用 GAM 赋权的 AMM 算法具有最小的 AIC 值(-552.80)。因此,最终采用 GAM 赋权的 AMM 算法构建社阳溪厚唇光唇鱼生境适宜性指数模型,即

I = 0.65 I_{SIV} + 0.22 I_{SIC} + 0.13 I_{SID} \tag{5}

式中:I为采用算术平均法计算得到的厚唇光唇鱼生境适宜性指数;I_{SIV}为流速的 SI 值;I_{SIC}为叶绿素 a 质量浓度的 SI 值;I_{SID}为水深的 SI 值。

根据 HSI 模型将生境划分为 5 个等级,HSI 值分别在[0,0.2)、[0.2,0.4)、[0.4,0.6)、[0.6,0.8)、[0.8,1.0]范围内,生境依次处于崩溃、非常不适宜、不适宜、适宜、非常适宜等级。生境适宜性指数大于或等于 0.6 的河段被认为是厚唇光唇鱼生境较为适宜的河段。

2.2.2 模型验证

随机选取 70% 的数据进行建模,利用剩下的 30% 数据进行验证,将流速、水深与叶绿素 a 质量浓度数据利用上述模型计算得到 SI 与 HSI 的预测值,再利用剩余所有水质水动力及鱼类资源数据,采用相同的方法构建 HSI 模型,得到 SI 与 HSI 的实际值,比较预测值与实际值,结果表明数据误差均小于 20%,且关键因子识别结果相同,因此可认为该模型具有较好的预测性和准确性。

3 讨论

3.1 单因子生境适宜性最佳范围及变化趋势

分别将流速、水深及叶绿素 a 质量浓度的 SI 值进行拟合,得到图 3。由图 3 可知,厚唇光唇鱼的最适宜流速为 37 ~ 58 cm/s;当流速小于 37 cm/s 时,流速越小,生境适宜性越低;当流速大于 58 cm/s 时,流速越大,生境适宜性越低。最适宜水深为 40 ~ 63 cm;

当水深小于 40 cm 时,水深越小,生境适宜性越低;当水深大于 63 cm 时,水深越大,生境适宜性越低。最适宜叶绿素 a 质量浓度为 0.10 ~ 0.35 mg/m³;当叶绿素 a 质量浓度大于 0.35 mg/m³ 时,叶绿素 a 质量浓度越大,生境适宜性越低。

3.2 综合因子生境适宜性等级分区及解释

厚唇光唇鱼适宜生境($I \geq 0.6$)主要分布于河流中下游河段。总体而言,在空间上,社阳溪从上游至下游厚唇光唇鱼的生境适宜性指数逐步升高,上游左侧支流生境适宜性指数高于右侧支流。但在两溪汇流口附近河段适宜性最低,处于崩溃($0 \leq I < 0.2$)或非常不适宜($0.2 \leq I < 0.4$)状态。由表 3 可知,从 2017—2020 年厚唇光唇鱼的生境适宜指数变低,2017—2018 年生境适宜性指数最高,中下游均为适宜生境;2019 年生境适宜性指数有所降低,仅下游为适宜生境;2020 年生境适宜性指数最低,均处于不适宜状态,且上游及汇流口均处于崩溃($0 \leq I < 0.2$)状态,这与 2019—2020 年高坪桥水库处于修建期关系密切。

表 3 2017—2020 年社阳溪不同河段厚唇光唇鱼生境适宜性指数

年份	上游	中游	汇流口 1	下游 1	汇流口 2	下游 2
2017	0.61	0.64	0.47	0.28	0.06	0.53
2018	0.82	0.67	0.18	0.11	0.11	0.33
2019	0.68	0.55	0.15	0.12	0.10	0.38
2020	0.58	0.31	0.18	0.13	0.08	0.12

野外调查时发现,左侧汇流口附近有堆石,导致实际流速远高于最适宜流速,因此左侧汇流口处河段生境最差。2020 年由于修建水库,中下游流速明显减慢,低于厚唇光唇鱼最适宜流速。此外,水质也受到了极大的影响,叶绿素 a 质量浓度明显升高,下游河段色素 a 质量浓度最低,为 0.61 mg/m³,但也远高于厚唇光唇鱼的最适宜叶绿素 a 质量浓度。因水库的施工,河道水深为 30 m 左右,远超厚唇光唇鱼的最适宜水深。可见,整个水库修建期对整条河道中厚唇光唇鱼的生境均有非常剧烈的影响。另外,已有研究表明,水温也是影响厚唇光唇鱼的重要生境因子,由于本文取样监测时间为每年的 7 月,水温在 25 ~ 30℃ 之间,年际差异性不大,因此,本文未考虑水温变化对厚唇光唇鱼的影响,待水库进入正常运行期后,将开展月度或季度监测,以探讨不同水温下的鱼类资源情况,尤其是需要深入探究电站冷水排放对厚唇光唇鱼的影响。

4 结 论

a. 厚唇光唇鱼是社阳溪最具代表性的本土鱼

种,通过采用 GAM 以及 PCA 方法,均识别出其生境关键影响因子为流速、水深及叶绿素 a 质量浓度。经过 AIC 准则比较,采用 GAM 赋权的 AMM 算法的 HSI 模型为生境适宜性最佳评估模型。

b. 社阳溪厚唇光唇鱼的关键生境影响因子的单因子最佳生境如下:最适宜流速为 37 ~ 58 cm/s,最适宜水深为 40 ~ 63 cm,最适宜叶绿素 a 质量浓度为 0.10 ~ 0.35 mg/m³。

c. 社阳溪厚唇光唇鱼综合因子生境分区具有较强的时空差异性,在空间上,最适宜生境主要为中上游河段;在时间上,2017 年和 2018 年生境适宜度较高,2019 年和 2020 年受水库施工建设影响,生境适宜性明显变差。

d. 水库建设与鱼类生境密切相关,对流速、水深、水质等生境影响因子有显著影响,因此未来需加强河道水文、生态、环境监测,深入研究水库运行对鱼类生境的影响,尤其是深入研究电站运行对中下游河段生物生境的影响。

参考文献:

[1] 温静雅,陈昂,曹娜,等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5):49-55. (WEN Jingya, CHEN Ang, CAO Na, et al. A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5):49-55. (in Chinese))

[2] 石瑞花,许士国. 河流生物栖息地调查及评估方法[J]. 应用生态学报,2008,19(9):2081-2086. (SHI Ruihua, XU Shiguo. Methods for river habitat survey and evaluation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2081-2086. (in Chinese))

[3] 班璇,DIPLAS P,吕晓蓉,等. 长江葛洲坝下游鱼类资源量的关键水文指标识别[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):15-20. (BAN Xuan, DIPLAS P, LÜ Xiaorong, et al. Dentification of the key hydrologic indicators affecting fish resources in the downstream of Gezhouba Dam [J] . Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):15-20. (in Chinese))

[4] 易雨君,王兆印,陆永军. 长江中华鲟栖息地适合度模型研究[J]. 水科学进展,2007,18(4):538-543. (YI Yujun, WANG Zhaoyin, LU Yongjun . Habitat suitability index model for Chinese Sturgeon in the Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4):538-543. (in Chinese))

(下转第 31 页)