

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.026

罗梭江鱼类替代生境量化评价

彭依云^{1,2}, 洪迎新^{1,3}, 刘东升¹, 陈求稳¹

(1. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏 南京 210029;
2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
3. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要:针对罗梭江替代生境适宜度及影响因素尚缺乏定量分析的问题,选取澜沧江干流特有经济鱼类中国结鱼(*Tor sinensis*)为目标物种,基于河流内流量增加法(IFIM),结合二维水动力模型和鱼类栖息地适宜性曲线,建立了罗梭江典型鱼类的栖息地评价模型,分析了替代生境适宜度及其影响因素。结果表明:罗梭江作为澜沧江最大支流,能为中国结鱼提供良好产卵场,产卵场在丰水期(7—9月)数量和质量较优,高质量产卵场主要分布于河流蜿蜒处;罗梭江不适宜成鱼全年栖息,尤其在枯水期(2—4月),成鱼产卵及育肥适宜度最差。在罗梭江替代生境后期管理中,建议优先加强对河流弯道处的生境保护及捕捞管理,同时重视其关联干流的生态保护。

关键词:替代生境适宜度;河流内流量增加法;栖息地评价模型;中国结鱼;澜沧江;罗梭江

中图分类号:S937 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0190-07

Quantitative evaluation of fish alternative habitats in the Luosuo River // PENG Yiyun^{1,2}, HONG Yingxin^{1,3}, LIU Dongsheng¹, CHEN Qiuwen¹ (1. *Eco-environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*; 3. *China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China*)

Abstract: In view of the lack of quantitative analysis on the alternative habitats suitability and influencing factors in the Luosuo River, *Tor sinensis*, a unique economic fish in the main stream of the Lancang River, was selected as the target species, and the habitat evaluation model of typical fish in the Luosuo River was established based on the intra-river flow increasing method (IFIM), two-dimensional hydrodynamic model and fish habitat suitability curve. The alternative habitat suitability and its influencing factors were analyzed. The results show that the Luosuo River, as the largest tributary of Lancang River, can provide a good spawning ground for *Tor sinensis*. The number and quality of spawning ground are better in wet season (July to September), and high-quality spawning ground is mainly distributed in the meandering part of the river. The tributaries of the Luosuo River are not suitable for adult fish to inhabit all year round, especially in the dry season (February to April), and the suitability of adult fish for spawning and fattening is the worst in this period. In the later management of the alternative habitat of the Luosuo River, it is recommended to give priority to strengthening the habitat protection and fishing management at the river bend, and pay attention to the ecological protection of its associated mainstream at the same time.

Key words: alternative habitat suitability; intra-river flow increasing method (IFIM); habitat assessment model; *Tor sinensis*; Lancang River; Luosuo River

梯级水电开发是利用水能资源的一个重要模式^[1],在水能丰富地区合理地建设梯级大坝,会将河流生态系统分割成多个具有相似生境的水库生态

系统^[2]。河流受大坝阻隔,连续性遭到破坏,河流形态发生转变,由河相转为河相-湖相交替,甚至出现湖相形式^[3-4],大量鱼类洄游的行为也会受到大

基金项目:国家自然科学基金(52009082);国家重点研发计划(2019YFC0408901);江苏省水利重点科技项目(2019006)

作者简介:彭依云(1995—),女,博士研究生,主要从事梯级水库鱼类栖息地与生境研究。E-mail: Pengyiyi2020@yeah.net

通信作者:刘东升(1988—),男,工程师,博士,主要从事河湖关键带水文地球化学过程研究。E-mail: dsliu@nhri.cn

坝阻挡, 排卵繁育受到影响, 从而导致鱼类的物种多样性和数量显著减少^[5-6]。此外, 梯级水库的建成将改变径流的季节性调节、泥沙截留、水文条件以及水温时空分布, 也将破坏原有河流鱼类的自然栖息环境, 并影响鱼类个体行为特性及种群间的基因交流, 导致遗传多样性的丧失^[7]。为了减轻梯级水电开发对重要鱼类的不利影响, 中国在水电开发和生态保护实践中逐渐形成了“干流开发, 支流保护”的新思路^[8], 以支流生境条件补偿性保护干流中生境受水电开发破坏的鱼类, 使流域水电开发和生态环境保护共同发展。

栖息地模型是支流生境替代可行性分析和效果评价的常用方法, 通过模拟目标生物在各生命时期行为对环境因子的响应关系以判断生境适宜性, 对于栖息地评价较为全面和客观^[9]。国内外针对鱼类栖息地模拟的研究已有不少成果, 如赵尚飞等^[10]使用 River2D 水生生物栖息地模型模拟了不同类型河道鱼类栖息地差、中、良 3 个等级的分布及变化; 孙志毅^[11]将 MIKE11 模型和 PHABSIM 模型进行耦合, 建立了模拟交汇河流对特有鱼类生境影响的河流生态水力学模型; Ceola 等^[12]将三维水动力模型 (estuary lake and coastal ocean model, ELCOM) 和水生生态系统动态模型 (computational aquatic ecosystem dynamics model, CAEDYM) 进行耦合, 并对红点鲑鱼在不同水文条件的栖息地下的变化情况进行了模拟预测; 唐磊^[13]通过建立一维生态河貌模型, 结合目标鱼类的生境特征, 定量评价了水坝拆除对支流替代生境的改善效果。尽管如此, 目前鲜有模型应用于支流生境替代效果的分析, 以至于缺乏替代生境适宜度及其影响因素的定量评价。

已有研究表明, 罗梭江作为澜沧江最大的支流, 对干流受水电开发影响严重的鱼类起到了很好的替代保护作用^[14-16]。其干支流水温差异、关键涨水过程以及河流联通性 3 个要素评价都达到最佳状态, 重要鱼类保护程度、水污染状况、生态基流、生境多样性以及鱼类“三场”分布等要素评价结果良好。因此, 本研究选择罗梭江作为研究对象, 基于河流内流量增加法 (intra-river flow increasing method, IFIM), 结合 EFDC (environmental fluid dynamics code) 二维水动力模型和鱼类栖息地适宜性曲线, 建立澜沧江典型鱼类中国结鱼的栖息地评价模型, 通过计算目标鱼类栖息地适宜性指数 (habitat suitability index, HSI) 以及有效利用面积 (weighted usable area, WUA) 等关键因子, 对罗梭江鱼类栖息地的数量和质量展开分析与探讨, 评价不同水情下替代生境对目标鱼类的适宜度, 对其生境替代效果

进行量化评价, 以期罗梭江替代生境后期管理提供参考。

1 研究区概况

澜沧江-湄公河发源于青藏高原唐古拉山北麓的小冰川, 全长 4 880 km, 流域面积 8 320 km², 是河长世界排名第 6、流域面积世界排名第 14 的大河。罗梭江发源于普洱市宁洱县, 是澜沧江-湄公河的最大支流, 主要河道长 297.8 km, 流域面积 7 678.9 km²^[17-18], 多年平均流量 169.5 m³/s。澜沧江-湄公河生境发生变化后, 罗梭江的流水生境成为喜流水性鱼类 (如中国结鱼) 的不二选择。2007 年成立罗梭江州级鱼类保护区, 主要保护对象包括叉尾鲂 (*Wallago attu*)、丝尾鲃 (*Hemibagrus wyckiioides*)、中华鲮 (*Clupisoma sinense*)、中国结鱼 (*Tor sinensis*) 等^[19-20]。其中, 保护区核心段为磨者河和罗梭江汇合的河口与罗梭江和澜沧江汇合河口之间的河段, 主要受保护鱼类为中国结鱼、丝尾鲃等。本文模拟江段选取罗梭江磨者河河口至南醒河河口, 占罗梭江鱼类自然保护区核心区域的 73%, 全长 29.2 km, 落差 33 m, 平均比降 1.13‰。模型上边界为磨者河河口下游 100 m, 下边界为南醒河河口上游 100 m (图 1)。

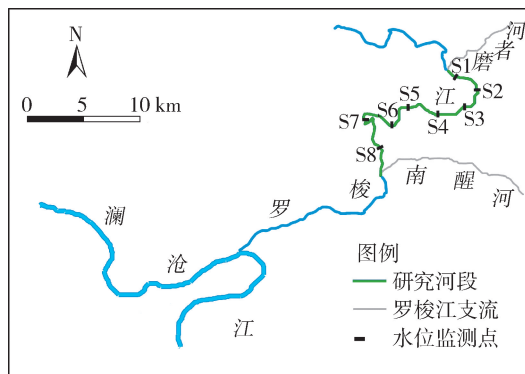


图 1 研究区水系及研究河段

Fig.1 Water system and river reach in study area

2 研究方法

2.1 水动力模型

采用 EFDC 模型对罗梭江进行水动力模拟研究, 该模型可用于模拟地表水系统中的三维流场^[21]、生物化学过程以及物质传输^[22], 研发较为成熟, 目前被国内外广泛应用。考虑到模拟分辨率及计算效率, 本研究采用正交曲线网格划分区域, 沿流向划分 500 个网格, 纵向平均长度为 59.7 m; 由于河道较长, 为确保网格质量, 在河流宽度方向划分 8 个网格, 平均宽度 9.8 m, 共计 4 000 个网格 (图 2)。为

确保模拟的准确性,网格应适应模拟区域并保持正交性,计算网格的平均正交偏差应小于 3.0° 。本次模拟计算的平均正交偏差为 2.98° ,整体精度满足要求。

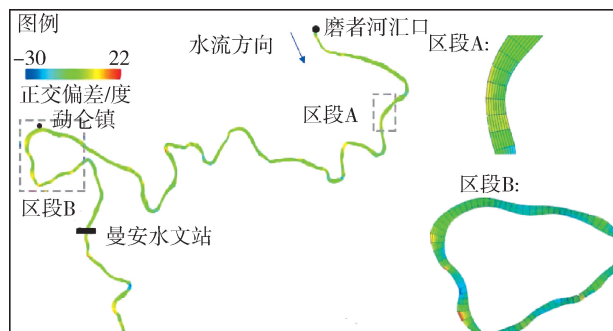


图2 计算区域网格划分

Fig. 2 Grid division of caculation area

EFDC 模型使用的地形数据来自文献调研,其中曼安水文站以下河道河底高程来自 Wang 等^[19] 2012 年 12 月的实测数据,以上河段依据河床平均坡度及周围高程对断面进行手动插值,共获得 43 个断面高程数据。根据断面数据,再由 EFDC 内置程序对研究区域全河段进行网格平均插值,插值计算完成后,对局部高程变化较大的区域进行了光滑处理。考虑到模型上边界至水文站及以下河段没有大型支流汇入,忽略一些小沟渠汇入的水量,将整个模型中的水量视为统一值,上边界输入流量为曼安水文站实测流量,下边界水位利用 MIKE11 构建一维模型进行推算。将曼安水文站 1959—2008 年的多年月平均径流量作为研究区的代表流量用于模型计算,时间步长设置为静态时间步长,取值 1 d。模型运行前,首先对降水量、气温、蒸发量等基本参数进行确定;曼宁系数可直观反映河道的粗糙度,与河流形态、河床结构底质等密切相关,本文参考《天然河流糙率表》,取值为 0.035。

采用水位对 EFDC 模型模拟结果进行率定验证。实测水位于 2019 年 3 月测得,为模拟河道沿水流方向的 8 个点位数据(图 1),该模型使用 3 月多年月平均流量($33.955\ 76\ \text{m}^3/\text{s}$)进行模拟,S1~S4 为率定点位,S5~S8 为验证点位。率定点位的平均误差为 0.035 m,最大误差为 0.04 m;验证点位的平均误差为 0.063 m,最大误差为 0.14 m,结果表明 EFDC 模型具有较高的可靠性和精准性。

曼安水文站 1959—2008 年实际年径流量过程表明,径流量年际变化幅度不大,年际极值比较低;年径流累积量过程线也表明年径流没有很大波动,这说明 EFDC 模型计算选用曼安水文站多年月平均径流作为研究区代表流量是可行的。为了满足

EFDC 模型的计算要求,对于诸如边界、弯道等局部河段的网格的正交偏差也设置小于 3.0° 。模型使用的河底高程数据来自文献调研,存在数据陈旧问题。然而,河底高程虽略有起伏,局部发生变化,但对于整个模拟河段来说,对河道的整体流场的影响较小。另外,根据本文模拟结果,高质量产卵场主要分布于河道蜿蜒处,说明栖息地适宜性主要受河道形态影响,而河道形态采用的是最新地形数据。从时间尺度上看,在河道形态及高程一致的情况下,影响流场的主要因素为不同月份所对应的流量与水位,即模型的边界条件。因此,河底高程数据的陈旧虽然会影响模型精度,但对本文整体规律和主要结论的影响是有限的。本文模型对水位的率定与验证平均误差均较小,证明了模型具有较高的可靠性与精准性。

2.2 鱼类生境评价模型

中国结鱼为澜沧江特有经济鱼类,栖于河道水流较缓处,为中下层鱼类,具有短距离洄游习性。幼鱼主要以摄取浮游动物为生,成鱼逐渐变为杂食性(植物的果实、鱼、甲壳动物与其他的无脊椎动物)。产卵期主要集中在 7—9 月,产卵时亲鱼上溯,选择卵石下的急流中繁殖^[23]。本研究选取中国结鱼(图 3)作为目标鱼类,评价生境适宜度,主要选择依据为:①鲤行目鱼类是澜沧江干支流的主要鱼类品种,且大部分喜急流环境、产沉性卵,中国结鱼作为其中最典型的一种,能很大程度上代表干支流鱼类的生活习性;②中国结鱼作为经济型鱼类,可围绕高效生态、优质安全的总体目标,推进罗梭江生态经济型渔业产业的可持续健康发展;③前人的研究表明,中国结鱼相关研究受到了较多关注,对于适宜环境因子的定量及生物学研究目前已经有不少研究成果^[20,24]。

相比较于其他种类的水生生物,鱼类在自身需要的生长环境中,倾向于选择有利于生长的空间和生境环境,避开不利条件^[25]。所以可以通过分析河流生境特征来研究适于鱼类生活的区域特征参数,如水深、流速等^[26]。在合适的水深条件中,鱼类能够更好地生存、栖息以及庇护自己,当水深过大时,容易影响沉性鱼卵及幼鱼的发育^[27];流速综合反映了水流与河道坡度、河床糙率、河道宽度相互作用,一定流速条件下可以促进鱼类性腺生长发育,从而诱导其排卵^[28]。综上所述,在保护鱼类栖息地方面,获取目标鱼类栖息地适宜性曲线非常重要,是建立栖息地模型的关键一环。本研究通过文献调研获取了中国结鱼流速、水深栖息地适宜性曲线^[19],如图 4 所示。



(a) 活体



(b) 成鱼 (663.1 g)



(c) 幼鱼 (27.7 g)

图3 中国结鱼

Fig.3 *Tor sinensis*

本研究基于 IFIM 法,结合 EFDC 二维水动力模型和鱼类栖息地适宜性曲线,建立了罗梭江典型鱼类中国结鱼的栖息地评价模型。IFIM 法诞生于 1970 年代美国鱼类和野生动物保护中心^[29],该方法通过将水力学模型和生物物理信息模型耦合,建立水动力因子与水生生物栖息地之间的偏好关系,为管理河流生态系统的健康提供依据^[30]。IFIM 法通过 WUA 和 HSI^[31] 定量计算生物的有效生境的数量和质量,最后结合鱼类生活史对鱼类替代生境的可行性做出评价。为了表征支流生境对鱼类完整生活史的替代保护效果,本研究选取中国结鱼产卵和成鱼栖息两个阶段的适宜性进行评估。

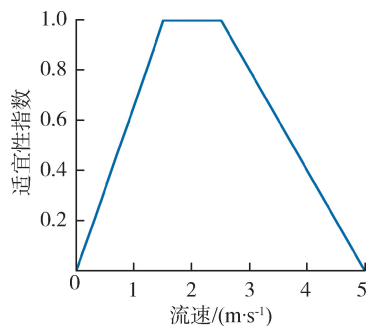
$$A_{WUA} = \sum_{i=1}^n I_{HSI} A_i \quad (1)$$

其中

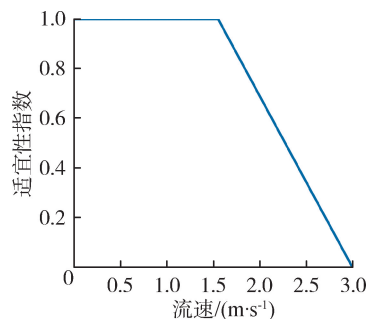
$$I_{HSI} = V_i D_i C_i$$

式中: A_{WUA} 为 WUA 值; n 为计算单元数; A_i 为计算单元 i 的面积; I_{HSI} 为计算单元 i 的 HSI 值; V_i 为计算单元 i 的适宜性流速; D_i 为计算单元 i 的适宜性水深; C_i 为计算单元 i 的河道适宜性指数(包括底质和覆盖物状况),本研究由于缺乏底质数据,暂不考虑河

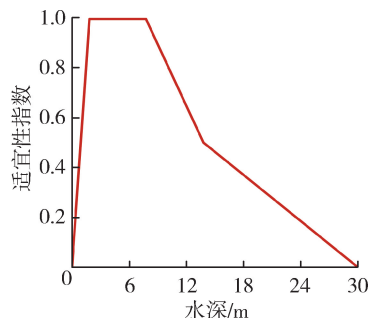
道指数,这里 C_i 取值为 1。



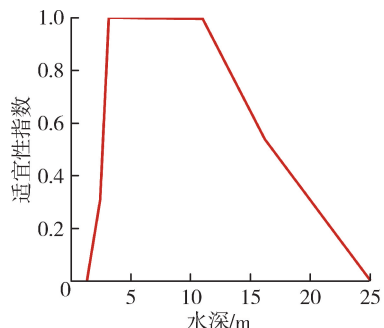
(a) 产卵流速



(b) 成鱼栖息流速



(c) 产卵水深



(d) 成鱼栖息水深

图4 中国结鱼流速、水深栖息地适宜性曲线

Fig.4 Habitat suitability curve of velocity and water depth of *Tor sinensis*

3 结果与分析

3.1 替代生境质量评价

由表 1 可见 1959—2008 年 WUA 均值年内变化情况,可见,产卵 WUA 值与成鱼 WUA 值年内变化趋势相同,均在 8 月达到峰值,分别为 201.5 万 m^2 、211.9 万 m^2 ;在 4 月达到最小值,分别为

33.8 万 m²、38.2 万 m²。通过表 1 可算出,产卵和成鱼 WUA 值变化趋势与流量表现出极显著正相关,相关系数分别为 0.966、0.979 ($P < 0.01$)。7—10 月产卵 WUA 占河流面积超过 50%,囊括了中国结鱼整个产卵期,同时,成鱼 WUA 占比超过 50% 的时间也为 7—10 月,可见在一年中的绝大部分时间成鱼 WUA 占河流面积比例均处于较低水平,在 2—4 月甚至低于 20% (表 1)。

3.2 替代生境适宜度时空变化特征

参考 Ding 等^[32]所制定的栖息地适宜性标准,将栖息地质量分为不适宜、基本适宜、中等适宜及适宜 4 类(表 2)。图 5(a)为中国结鱼各月产卵栖息地质量等级占比情况,可见罗梭江中国结鱼产卵的适宜等级栖息地集中出现在 6—11 月,其中 7—9 月占河流面积比例较大,分别为 65%、78%、60%,其他时间基本适宜栖息地占主导地位。图 5(b)为中国结鱼各月成鱼栖息地质量等级占比情况,可见成鱼的适宜等级栖息地虽然全年均有出现,但占比较大者同样出现在 7—9 月,分别为 82%、85%、75%,其余月份皆低于 40%,而 2—5 月仅为 10% 左右。值得注意的是,不同于产卵栖息地占河流面积百分比总和在各月均达到 100%,成鱼栖息地面积在大多数月份低于河流面积,即由于形成湖相区或者进入枯水季节,导致出现了 HSI 值为 0 的区域,如 2—5 月各质量类型比值总和分别为 56%、44%、41%、59%。

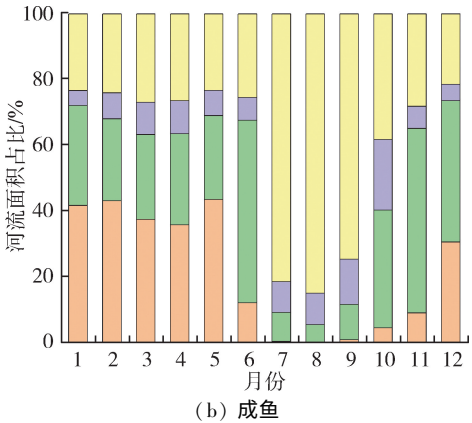
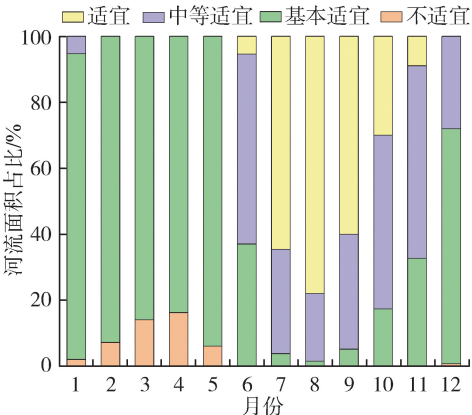


图 5 中国结鱼各月产卵和成鱼栖息地质量等级占比
Fig.5 Proportion of habitat quality grades of spawning and adult *Tor sinensis* in each month

表 1 栖息地总量计算结果

Table 1 Calculation results of total habitats						
月份	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	产卵 WUA/万 m ²	产卵 WUA 与河流面积比值	成鱼 WUA/万 m ²	成鱼 WUA 与河流面积比值	
1	60.26	61.6	0.26	56.2	0.24	
2	44.02	46.2	0.20	45.7	0.19	
3	33.96	36.4	0.15	39.6	0.17	
4	31.39	33.8	0.14	38.2	0.16	
5	45.97	48.1	0.20	46.9	0.20	
6	116.41	106.2	0.45	91.5	0.39	
7	318.04	182.5	0.77	204.0	0.86	
8	426.71	201.5	0.85	211.9	0.89	
9	286.37	174.9	0.74	193.9	0.82	
10	185.05	141.8	0.60	135.4	0.57	
11	128.13	113.5	0.48	98.9	0.42	
12	81.18	800.2	0.34	69.6	0.29	

表 2 鱼类栖息地适宜性指数赋分等级

Table 2 Classification of fish habitat suitability index		
适宜性指数	适宜性等级	含义
(0.7,1]	适宜	大部分水域的流速和水深条件,能为鱼类提供适宜的栖息生境
(0.4,0.7]	中等适宜	大部分水域的流速和水深等条件,能为鱼类提供较适宜的栖息生境;或者有较多水域的流速和水深等条件,能为鱼类提供非常适宜或适宜的栖息生境
(0.1,0.4]	基本适宜	大部分水域的流速和水深等条件,能为鱼类提供基本适宜的栖息生境;或者有较多水域的流速和水深等条件,能为鱼类提供基本适宜的栖息生境;或者有一定水域的流速和水深等条件,能为鱼类提供非常适宜或适宜的栖息生境
(0,0.1]	不适宜	部分水域的域的流速和水深等条件差,不能为鱼类提供相对适宜的栖息生境

鉴于中国结鱼集中于7—9月有产卵栖息地需求,而成鱼栖息的替代生境适宜度由质量最差的时间段决定,因为此时鱼类将被迫离开该栖息地。因此,分别选取了7—9月产卵栖息地分布和2—4月成鱼栖息地分布(图6),进一步对鱼类栖息地的适宜度进行分析。由图6可见,8月研究河段处于适宜等级的面积占比最大,该月WUA也处于最高水平;7月和9月相对8月适宜等级占比略小,WUA也略低。总体而言,7—9月为集中产卵期,研究区域河段均表现出生境较为适宜,适宜等级产卵栖息地主要集中于河道蜿蜒处。成鱼栖息地在2—4月表现出极差的适宜性,不适宜等级占比最大,WUA也相对较低。

纵观各月栖息地情况,产卵栖息地和成鱼栖息地WUA与各月流量大小紧密相关,当流量增大时,WUA值也随之增加,相对应WUA在研究河流面积中的占比也增大,说明栖息地加权可利用面积与各时期入河流量相关。而流量则反映了河道流速与水深的大小,因此表明流速与水深是影响栖息地适宜性指数的重要因素。在丰水期(7—9月),罗梭江多年月平均入河流量较大,水流流速相对较大,结合中国结鱼产卵期适宜水深与流速可知,随着入河流量的增加,流速及水深均发展到中国结鱼产卵期最适宜区间,这意味着该时期罗梭江为目标鱼类提供了高效且优质的产卵环境。其中,研究河段蜿蜒曲折处适宜等级占比最大,这表明罗梭江蜿蜒曲折河段对目标鱼类极其重要,可以为后期罗梭江鱼类自然

保护区建设提供参考。通常而言,栖息地保护常因为保护区面积较大且位于山区,给后期维护工作带来较大困难^[17],而对高质量栖息地的识别及优先管控将有效地改善这种困境。在枯水期(2—4月),由于低流量导致河流水深较浅、水流流速较慢的原因,成鱼栖息地表现出极差的适宜性,绝大部分河道为不适宜等级,而此时成鱼栖息地WUA也相应处于最低值,表明罗梭江进入枯水期后,鱼类进入越冬期,支流生境适宜性降低,目标鱼类成鱼栖息空间大大缩小,绝大部分鱼类将不得不离开支流,返回干流深水区寻找适宜栖息地。

4 结 论

- a. 罗梭江WUA值与流量呈正相关关系,水位是影响低流量条件下WUA值的主要因素;在时间维度上,WUA值在7—9月较高,2—4月较低,并且年内分布不均匀。
- b. 罗梭江可为中国结鱼提供有效的产卵栖息环境,尤其是在集中产卵期(7—9月),河流内分布着数量众多且质量较高的产卵栖息地;高质量产卵栖息地大多分布于河流蜿蜒处,建议在罗梭江替代生境后期管理时,优先加强对河流弯道处的环境保护及渔业管理。
- c. 罗梭江并不能全年为目标保护鱼类提供有效的成鱼栖息环境,尤其是枯水期(2—4月)。以中国结鱼为代表的澜沧江下游洄游鱼类生活史目前最好的模式为“干流肥育支流繁殖”。这意味着保护

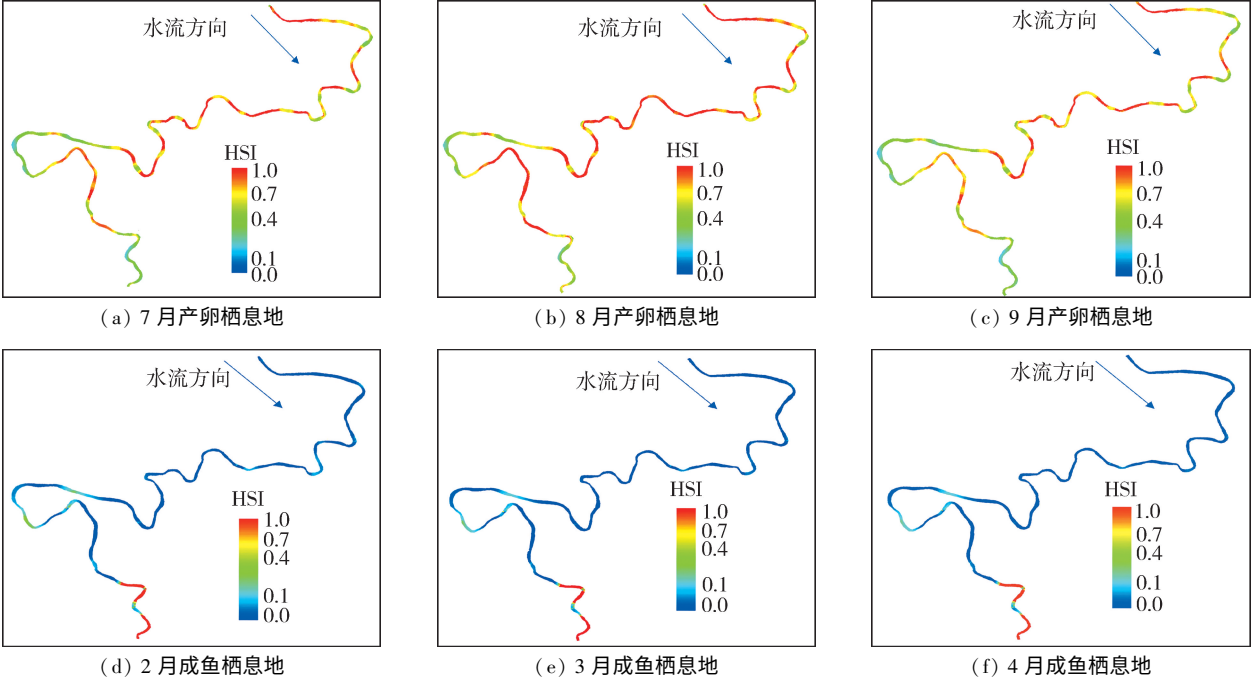


图6 中国结鱼栖息地空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of *Tor sinensis* habitat

关联干流的生态环境也是罗梭江支流替代生境产生效应的关键。

参考文献:

- [1] 吕军,汪雪格,刘伟,等. 松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 155-160. (LYU Jun, WANG Xuege, LIU Wei, et al. Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 155-160. (in Chinese))
- [2] 何大明,冯彦,胡金明. 中国西南国际河流水资源利用与生态保护[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 邱阳凌. 黑水河生态河貌模拟及鱼类替代生境评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [4] 王强,庞旭,李秀明,等. 水电梯级开发对河流生境质量及纵向连通性影响评价: 以五布河和藻渡河为例[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5508-5516. (WANG Qiang, PANG Xu, LI Xiuming, et al. Assessment method for the influence of hydroelectric dams on the physical habitat quality and longitudinal connectivity of rivers: a case study of the Wubu and Zaodu rivers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5508-5516. (in Chinese))
- [5] 王成友. 长江中华鲟生殖洄游和栖息地选择[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [6] 王煜,李金峰,翟振男. 优化中华鲟产卵场水动力环境的梯级水库联合调度研究[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 56-63. (WANG Yu, LI Jinfeng, ZHAI Zhennan. Research on joint operation of cascade reservoirs to optimize hydrodynamic environment for Chinese sturgeon spawning ground[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 56-63. (in Chinese))
- [7] DAVIES K F, MARGULES C R. Effects of habitat fragmentation on carabid beetles: experimental evidence [J]. Journal of Animal Ecology, 1998, 3(67): 460-471.
- [8] 高婷,李翀,廖文根. 实施支流生境替代保护的基本原则[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(4): 267-272. (GAO Ting, LI Chong, LIAO Wengen. The basic principles in applying tributary habitat alternative protection [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(4): 267-272. (in Chinese))
- [9] 侯俊,黄喻威,苗令占,等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 8-12. (HOU Jun, HUANG Yuwei, MIAO Lingzhan, et al. Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 8-12. (in Chinese))
- [10] 赵尚飞,杜彦良,王瑜,等. 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, 2019, 40(5): 1-8. (ZHAO Shangfei, DU Yanliang, WANG Yu, et al. Wutong River fish habitat survey and modeling under ecological restoration [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(5): 1-8. (in Chinese))
- [11] 孙志毅. 基于栖息地生态适宜度指数模型的河流鱼类生境模拟分析[J]. 水利规划与设计, 2020(6): 86-90. (SUN Zhiyi. Simulation analysis of river fish habitat based on habitat ecological suitability index model [J]. Water Resources Planning and Design, 2020(6): 86-90. (in Chinese))
- [12] CEOLA S, PUGLISES A, VENTUR A M, et al. Hydro-power production and fish habitat suitability: assessing impact and effective-ness of ecological flows at regional scale [J]. Advances in Water Resources, 2018, 116: 29-39.
- [13] 唐磊. 金沙江下游梯级水电开发影响下鱼类支流生境替代方案研究[D]. 南京: 河海大学, 2020.
- [14] 林诗芸. 补远江干流鱼类生境特征与鱼类多样性的关联研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [15] 赵进勇,董哲仁,孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. 科技导报, 2008(17): 82-88. (ZHAO Jinyong, DONG Zheren, SUN Dongya. State of the art in the field of river habitat assessment [J]. Science and Technology Review, 2008(17): 82-88. (in Chinese))
- [16] 杨青瑞,陈声威,何建宽,等. 支流生境替代保护效果评价指标体系与评价方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(6): 408-413. (YANG Qingrui, CHEN Shengwei, HE Jiankuan, et al. Evaluation index system of tributary habitat alternative protective effect [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(6): 408-413. (in Chinese))
- [17] 黄光明,王海龙,王伟营. 澜沧江流域鱼类栖息地保护实践[J]. 水生态学杂志, 2015, 6(36): 86-91. (HUANG Guangming, WANG Hailong, WANG Weiyong. Fish habitat conservation in the Lancang River Basin [J]. Journal of Water Ecology, 2015, 6(36): 86-91. (in Chinese))
- [18] 康斌,胡文娴,祈文龙,等. 补远江鱼类多样性研究[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(3): 6-15. (KANG Bin, HU Wenxian, QI Wenlong, et al. Research on fish species diversity in the Buyuan River [J]. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31(3): 6-15. (in Chinese))
- [19] WANG Y, WANG D S, YANG Q R, et al. Rationality study of establishing nature reserve in Luosuo River from the point of fish [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 641/642: 1146-1150.
- [20] 王莹. 澜沧江中下游鱼类栖息地的水文、水力学特征研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.

(下转第 202 页)