

黑水河下游前鳍高原鳅的繁殖特征

杨志¹, 朱其广¹, 徐薇¹, 龚云¹, 金瑶¹, 陈小娟¹, 刘红², 唐会元¹

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北武汉 430079;
2. 华中农业大学水产学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 为了解长江上游特有鱼类前鳍高原鳅(*Triplophysa anterodorsalis*)的繁殖特征, 于 2014 年 1–12 月在金沙江一级支流黑水河下游江段对前鳍高原鳅进行逐月采样, 并采用数理统计学方法对其性腺发育与性成熟系数的周年变化、繁殖群体组成、卵径分布、繁殖力、产卵水温和繁殖集群等进行了研究。结果显示, 前鳍高原鳅的性成熟个体在 1–2 月以及 9–12 月出现, 其雌、雄个体的性成熟系数平均值均在 12 月达到最大值; 50% 雌、雄个体达到性成熟的全长分别为 72 mm、78 mm, 繁殖季节雌雄性比为 0.98:1, 平均卵径为 0.64 mm, 卵径分布呈单峰型; 绝对繁殖力为 1 428~6 356 粒, 均值为 3 834 粒; 相对繁殖力为 250~938 粒/g, 均值为 535 粒/g; 全长、体重与绝对繁殖力呈二次项函数正相关; 繁殖季节水温为 9.3~20.6℃, 均值为 14.1℃; 前鳍高原鳅有明显的产卵集群现象。研究结果可为前鳍高原鳅资源保护及其全人工繁殖技术提供基础数据支撑。

关键词: 前鳍高原鳅; 性成熟系数; 繁殖力; 产卵集群; 黑水河

中图分类号: Q132 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)04-0119-08

前鳍高原鳅(*Triplophysa anterodorsalis*)属鲤形目、鳅科、高原鳅属, 俗称“刚鲢”, 为长江上游特有种, 主要分布在金沙江下游的干流水系(丁瑞华, 1994; 张雄等, 2014)。前鳍高原鳅为典型的小型鱼类, 一般栖息在有砾石的流水生境中, 主要摄食藻类、高等植物碎片和水生昆虫(丁瑞华, 1994)。在长江流域全面禁捕前, 前鳍高原鳅为金沙江下游部分支流的优势种类之一(杨志等, 2017)。

近年来, 随着金沙江下游干支流梯级水电的开发, 前鳍高原鳅的栖息生境已发生了明显改变, 资源量呈现明显的下降趋势, 迫切需要采取栖息地生境恢复与保护措施来维持和恢复其种群规模(Yang et al, 2020)。然而, 考虑到金沙江干支流梯级开发导致的流水生境高度破碎化, 以及区域采砂和农业开发等人类活动对流水栖息生境的严重干扰(Cheng et al, 2015; Yang et al, 2020), 仅仅采取栖息地生境恢复与保护措施很可能难以达到维持和恢复其资源数量的目的。在此背景下, 建立全人工繁殖种群很可能是保护其种群资源的

有效措施或最佳替代方案(杨君兴等, 2013)。为建立前鳍高原鳅全人工繁殖种群, 了解其繁殖特征非常关键且十分必要。然而, 长期以来前鳍高原鳅的繁殖特征, 包括最小性成熟个体规格、繁殖月份、繁殖力、繁殖水温、集群现象等相关基础资料匮乏。本文基于 2014 年 1–12 月在金沙江下游支流黑水河采集的前鳍高原鳅样本, 研究其繁殖特征, 旨在为其资源保护及全人工繁殖技术提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样本采集

研究区域位于金沙江下游主要支流黑水河下游, 该河段属金沙江左岸一级支流, 发源于昭觉县, 由北向南流经四川昭觉、普格、宁南县, 在葫芦口镇下游附近汇入金沙江, 全长 192 km, 流域面积 3 603 km², 平均比降 1.35%, 河口年均流量 80.0 m³/s(孙嘉宁, 2013; 傅菁菁等, 2016)。

调查区域内河流生境以深潭–浅滩和阶梯–深潭为主, 且河床两侧分布较多岩洞, 有利于鱼类躲藏。河流沿岸带植被较为茂盛, 部分区域分布有大量的桑树及其他果树(杨志等, 2017)。经当地渔业部门批准, 使用背负式电捕鱼器(电瓶 20 A、12 V, 电鱼器 3 000 W)沿河段进行连续采样。采样河段为老木水电站至葫芦口镇的黑水河干流以及石梨乡以下的黑水河支流(图 1)。每月采集 4–5 d, 每天采集持续时间约 6 h。

收稿日期: 2020-11-30 修回日期: 2022-05-07

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0408904); 国家自然科学基金(51379134); 中国三峡建设管理有限公司技术服务项目(合同号: JG/10917B)。

作者简介: 杨志, 1982 年生, 男, 博士, 副研究员, 主要从事鱼类生态学研究。E-mail: yangzhi4626@163.com

通信作者: 唐会元。E-mail: Tanghy@mail.ihe.ac.cn

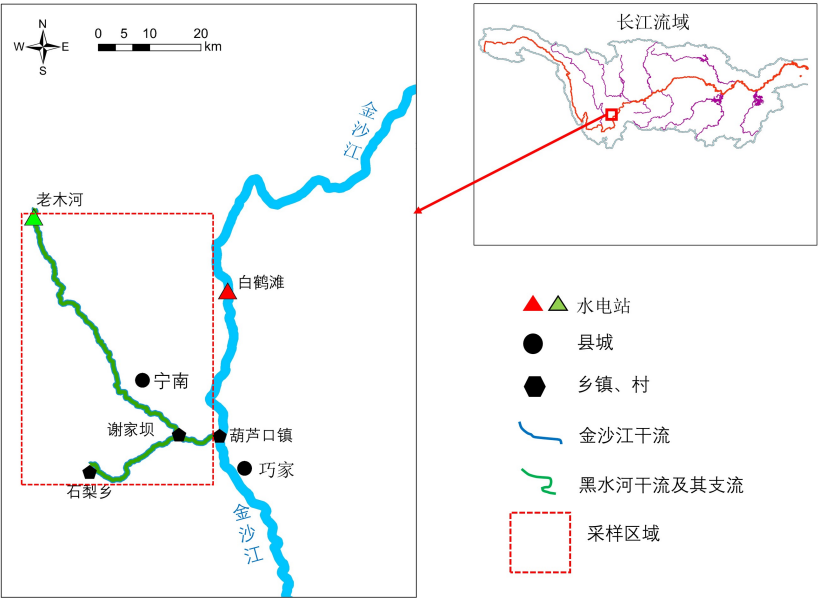


图 1 前鳍高原鳅采样江段

Fig.1 Location of the sampling sections for *T. anterodorsalis*

样本采集后,现场测量每尾前鳍高原鳅个体的全长(TL)、体长(BL)和体重(BW),全长、体长精确到 1 mm,体重精确到 0.1 g。根据每个采样日捕捞到的样本数量,随机选择一定数量的个体进行解剖,其中单日捕捞数量少于 50 尾时,解剖全部个体;单日捕捞个体数量大于 50 尾时,随机选择 30~150 尾个体进行解剖。对各尾解剖个体进行性别和性腺发育期判别,并称量其空壳重和性腺重。性别和性腺发育期判别参照殷名称(1993)所描述的方法,其中性腺发育期处于 IV 期及以上的被认为性成熟个体。性腺称量后,将 IV 期卵巢整个固定于 7%~8% 的福尔马林溶液中,然后带回实验室进行卵粒计数;同时选取 1 尾典型的 IV 期卵巢,用 0.6% 的生理盐水浸泡 10 h 后测定其卵粒直径。

1.2 数据分析

1.2.1 繁殖群体组成 采用下列公式拟合性成熟个体比例(*P*)与全长(TL)的关系(Oddone & Vooren, 2005):

$$P=1/[1+\exp[a+b\times\lg(TL)]]$$

式中:*a*和*b*为评估参数。

①

采取下式评估前鳍高原鳅 50% 个体达到性成熟的全长($P_{TL50\%}$):

$$P_{TL50\%}=10^{(-a/b)}$$

②

采用全长-体长线性拟合方程估算 50% 个体达到性成熟的体长。通过独立样本 *t* 检验比较前鳍高原鳅繁殖群体的平均体长和平均体重在雌雄个体间的差异,并采用卡方检验判别雌雄性比是否偏离理论值 1:1(Oddone & Vooren, 2005)。

1.2.2 性腺发育与产卵类型 采用下式计算雌、雄个体在不同月份的性成熟系数(Gonadosomatic index, GSI):

$$GSI(\%)=(\text{性腺重}/\text{空壳重})\times 100$$

③

通过单因素方差分析(One-way ANOVA)比较性成熟系数在各月份的平均值是否在统计学上存在差异(Oddone & Vooren, 2005)。绘制典型 IV 期卵巢的卵径分布图,从而确定前鳍高原鳅的产卵类型(王剑伟, 1992; 于学颖等, 2018)。

1.2.3 繁殖力 采用下式计算绝对繁殖力(AF)和相对繁殖力(RF)(殷名称, 1993):

$$AF=\text{每克卵巢卵粒数}\times\text{卵巢重}$$

④

$$RF=\text{绝对繁殖力}/\text{空壳重}$$

⑤

采用线性方程、二次项方程、指数分布方程和幂方程对绝对繁殖力和相对繁殖力与全长、体重的关系进行拟合,选取 R^2 值高的拟合方程为最优拟合模型(陶江平等, 2009)。

1.2.4 产卵水温和产卵集群 鱼类样品采集期间,使用温度计同步测量采样点水温。由于黑水河鱼类主要由底栖种类组成,因此本文测量水温为温度计触底处的水温;同时,对前鳍高原鳅样本的体长按照一定间距进行分组,统计各个月份不同体长组个体的数量分布情况。由于各月采样的捕捞努力量大致相当(每月采样 4~5 d, 每天约 6 h),因此结合前鳍高原鳅各月的性成熟系数,不同月份各体长组的数量分布可以反映前鳍高原鳅的产卵集群类型(Tobin et al, 2013)。

采用 CorelDRAW 12.0、Word 365 以及 r 3.0.1 进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 雌雄外形区别

非繁殖季节前鳍高原鳅的性别特征雌雄个体差异不明显,很难根据其外部形态特征进行分辨。繁殖季节的雄鱼通常体型修长、腹部细瘦、不膨大、触手较硬、体侧斑纹较为鲜艳;雌鱼则体色相对较淡、腹部膨大柔软、富有弹性且卵巢轮廓明显。

2.2 性腺发育与性成熟系数周年变化

对雌性性成熟个体而言,其各月的数量占比变化幅度很大;其中,在1-2月以及9-12月的数量变动为77.78%~100.00%,而3-8月的数量占比均为0.00%。雄性与雌性性成熟个体比例的逐月变化规律类似(图2)。

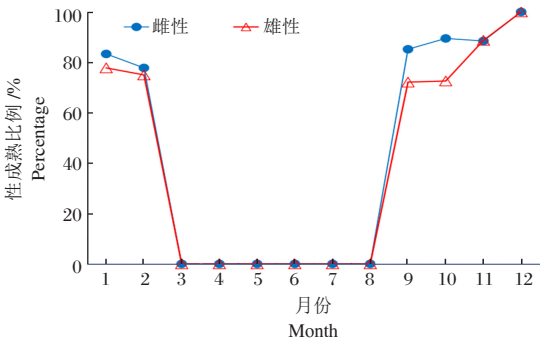
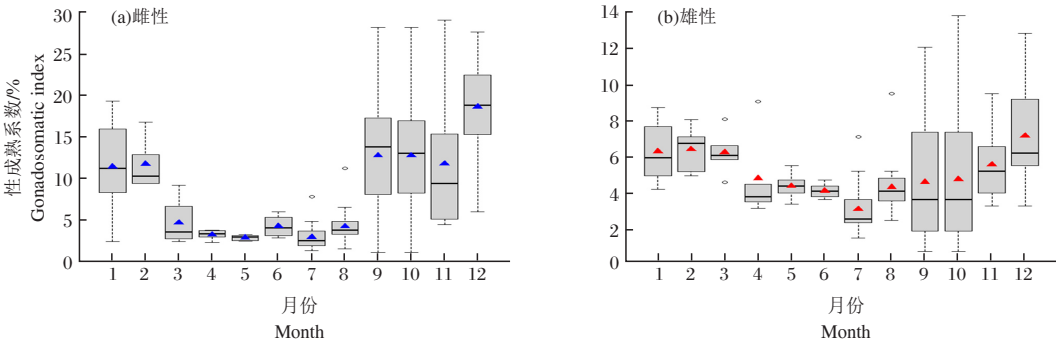


图2 2014年各月前鳍高原鳅性成熟雌雄个体的数量比例
Fig.2 Proportions of male and female *T. anterodorsalis* at sexual maturity in each month of 2014

雌雄个体的性成熟系数在不同月份的变动情况见图3。雌性个体性成熟系数的月均值在各月份间存在显著差异($n=250, F=21.039, P<0.001$);其中,1-2月和9-12月性成熟系数的各月均值显著高于3-8月,以12月最高,为18.51%,5月最低,为2.80%(图3-a),且



箱体内三角形显示平均值、直线显示中位数

图3 2014年黑水河下游前鳍高原鳅雌雄个体性成熟系数的逐月变动

In the box, the triangle shows the average value, and the line inside the box shows the median value

Fig.3 Monthly variation of maturity coefficients of male and female *T. anterodorsalis* collected from the lower Heishui River in 2014

12月的均值均显著高于其他月份(P 值均小于0.05,表1)。雄性个体中(图3-b),性成熟系数的月均值也存在显著差异($n=234, F=3.333, P<0.001$);其中12月的均值显著高于5-10月,7月的均值则显著低于1-3月和9-12月(P 值均小于0.05;表1)。

2.3 繁殖群体组成

2.3.1 50%达到初次性成熟的个体大小 黑水河下游前鳍高原鳅雌、雄个体的全长(TL)与其性成熟个体的比例(P)关系见图4,关系式如下:

$$P_{\text{♀}}=1/\{1+\exp[250.57-135.02\lg(\text{TL})]\} \quad (R^2=0.975)$$
$$P_{\text{♂}}=1/\{1+\exp[46.32-24.47\lg(\text{TL})]\} \quad (R^2=0.977)$$

根据上述关系式,计算得到前鳍高原鳅50%雌、雄个体达到性成熟时的全长分别为72 mm、78 mm。根据体长(BL)和全长(TL)关系式: $BL=0.79TL+2.66$ ($R^2=0.964, n=298$),得到前鳍高原鳅50%雌、雄个体达到性成熟的体长分别为60 mm、64 mm。

2.3.2 全长、体长和体重结构组成及雌雄个体差异 雌性性成熟个体的全长、体长和体重分别为74~114 mm、60~95 mm和3.1~14.3 g,平均全长、平均体长和平均体重分别为93 mm、76 mm和7.6 g;雄性性成熟个体的全长、体长和体重分别为58~110 mm、50~94 mm和2.6~12.3 g,平均全长、平均体长和平均体重分别为92 mm、75 mm和7.0 g。雌雄性成熟个体的平均全长和平均体长无显著差异($t=1.435, P=0.152>0.05$; $t=1.392, P=0.165>0.05$),但雌雄平均体重有显著差异($t=2.238, P=0.026<0.05$)。

2.3.3 性比 前鳍高原鳅的雌雄性比为0.80:1~1.53:1,除1月、2月以及12月外,3-11月的雌雄性比均小于1:1(图5)。前鳍高原鳅在繁殖季节(1月、2月以及9-12月)的雌雄性比为0.98:1,该比值与雌雄性比1:1的理论值不存在显著性偏离($\chi^2=2.631, P=0.105$)。

表 1 黑水河下游前鳍高原鳅雌、雄个体性成熟系数月均值的单因素方差分析

Tab.1 Comparison of the mean value of sexual maturity coefficient between months for male and female *T. anterodorsalis* collected from the lower Heishui River

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		0.949	0.976	0.391	0.235	0.177	0.023*	0.165	0.186	0.227	0.622	0.517
2	0.918		0.925	0.356	0.209	0.156	0.019*	0.143	0.159	0.196	0.570	0.573
3	0.055	0.052		0.408	0.248	0.187	0.026*	0.176	0.200	0.243	0.648	0.492
4	0.013*	0.013*	0.689		0.794	0.670	0.225	0.734	0.875	0.967	0.607	0.076
5	0.007*	0.007*	0.607	0.916		0.857	0.301	0.961	0.841	0.737	0.374	0.016*
6	0.022*	0.023*	0.901	0.756	0.662		0.412	0.872	0.659	0.564	0.276	0.008*
7	0.001*	0.001*	0.557	0.911	0.988	0.604		0.212	0.048*	0.029*	0.021*	<0.001*
8	0.004*	0.005*	0.874	0.709	0.587	0.991	0.439		0.723	0.587	0.255	0.001*
9	0.560	0.686	0.004*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*		0.765	0.285	<0.001*
10	0.558	0.684	0.004*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.999		0.365	<0.001*
11	0.897	0.995	0.024*	0.003*	0.001*	0.006*	<0.001*	<0.001*	0.560	0.557		0.098
12	0.002*	0.007*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	

注：上、下三角形矩阵内的数值分别为雄、雌性性成熟系数在各月间比较的统计概率值(P值)，黑体和星号显示P<0.05。
Notes: The values in the upper and lower triangular matrices are the statistical probability values (P values) for the monthly comparison of the mean value of male and female sexual maturity coefficients. The values in bold with asterisk indicate P<0.05 (2-tailed).

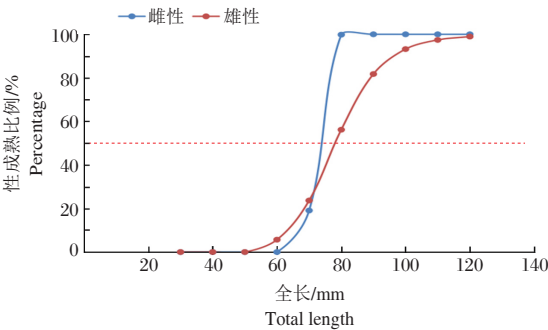


图 4 黑水河下游前鳍高原鳅全长与性成熟个体比例的关系
Fig.4 Relationship between total length and proportion of mature *T. anterodorsalis* collected from the lower reaches of Heishui River

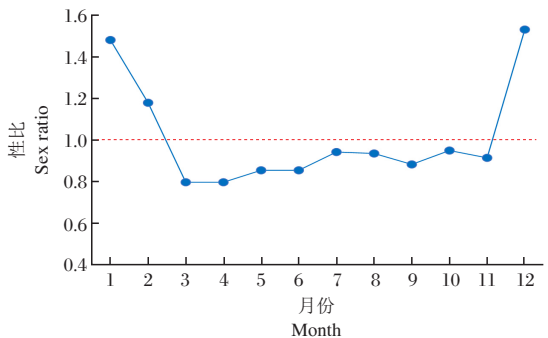


图 5 2014 年各月黑水河下游前鳍高原鳅的雌雄性比
Fig.5 Monthly sex ratios of *T. anterodorsalis* individuals collected from the lower Heishui River in 2014

2.4 卵径分布

前鳍高原鳅 IV 期卵粒的卵径分布如图 6 所示。其成熟卵粒的卵径为 0.45~0.95 mm,均值为 0.64 mm (n=3 255),可见卵径分布呈单峰型。

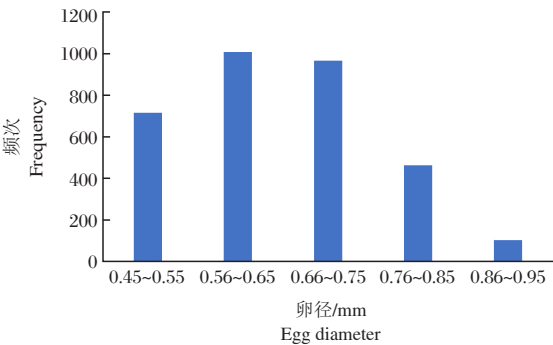


图 6 黑水河下游前鳍高原鳅典型 IV 期卵粒的卵径分布
Fig.6 Egg diameter distribution of *T. anterodorsalis* with ovary in IV stage collected from the lower Heishui River

2.5 繁殖力

2.5.1 绝对繁殖力和相对繁殖力 前鳍高原鳅 IV 期雌鱼 (n=109)的绝对繁殖力为 1 428~6 356 粒,均值为 3 834 粒;相对繁殖力为 250~938 粒/g,均值为 535 粒/g (图 7)。绝对繁殖力在 2 501~5 000 粒的个体数量较多,占总抽样个体的 74.31%;同时,相对繁殖力在 451~700 粒/g 的个体数量也较多,占总抽样个体数的 70.64%。

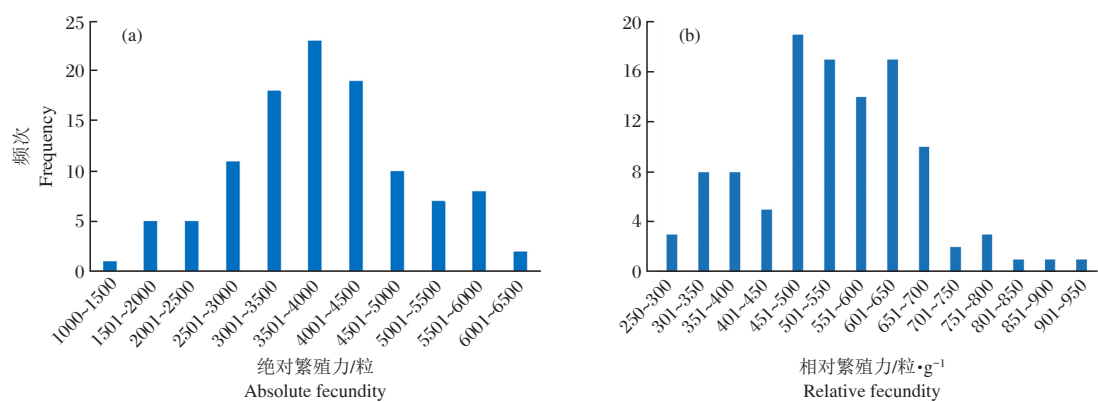


图7 黑水河下游前鳍高原鳅绝对繁殖力(a)和相对繁殖力(b)频次分布

Fig.7 Distribution histograms of absolute fecundity (a) and relative fecundity (b) of *T. anterodorsalis* collected from the lower Heishui River

2.5.2 绝对繁殖力与全长和体重的关系 前鳍高原鳅绝对繁殖力(AF)随着全长(TL)和体重(BW)的增加而增加,其中绝对繁殖力与全长、体重均呈二次项

函数正相关(图8),其相关表达式如下:
 $AF=1.27TL^2-144.24TL+6273$ ($R^2=0.510$)
 $AF=-2.8731BW^2+374.45BW+1236.50$ ($R^2=0.450$)

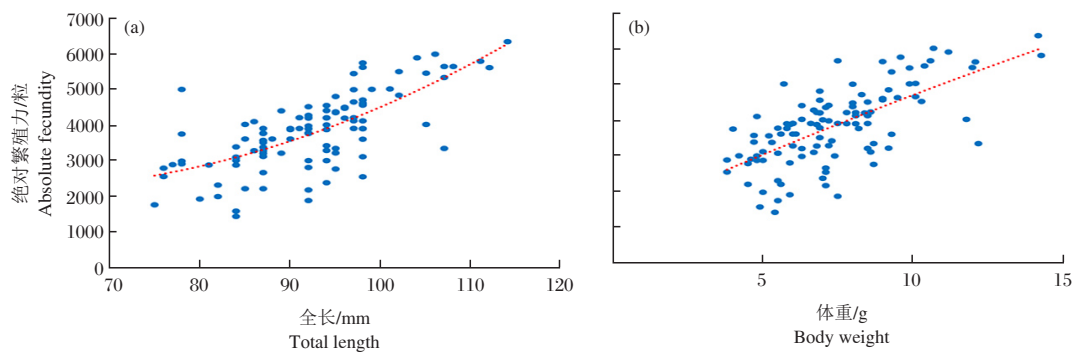


图8 黑水河下游前鳍高原鳅绝对繁殖力与全长 (a)、体重(b)的关系

Fig.8 Relationship between absolute fecundity and total length (a) and body weight (b) of *T. anterodorsalis* collected from the lower Heishui River

2.5.3 相对繁殖力与全长和体重的关系 前鳍高原鳅全长(TL)、体重(BW)和相对繁殖力(RF)均呈二次项函数负相关(图9),其相关表达式

如下:
 $RF=0.0525TL^2-13.78TL+1355.9$ ($R^2=0.064$)
 $RF=3.103BW^2-77.177BW+921.5$ ($R^2=0.207$)

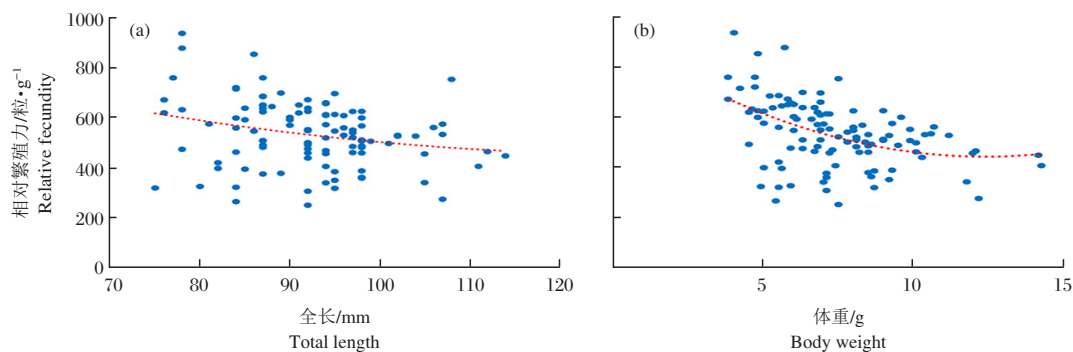


图9 黑水河下游前鳍高原鳅相对繁殖力与全长(a)、体重(b)的关系

Fig.9 Relationship between relative fecundity and total length (a) and body weight (b) of *T. anterodorsalis* individuals collected from the lower Heishui River

2.6 产卵水温和产卵集群现象

2.6.1 水温特征 采样期间,黑水河下游干流水温为9.3~23.0℃,均值为16.7℃;其中,在发现雌性成熟个体的1-2月以及9-12月,该区域水温为9.3~20.6℃,均值为14.1℃。在雌雄个体性成熟系数最高的12月,调查区域的水温为10.3~13.1℃,均值为11.7℃(图10)。

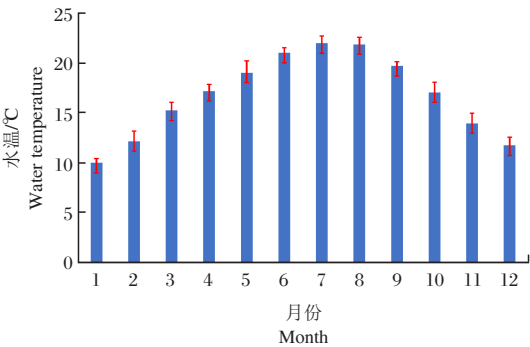


图 10 2014 年黑水河下游采样区域水温的月度分布
Fig.10 Water temperature distribution in the sampling area of the lower Heishui River from January to December in 2014

2.6.2 产卵集群现象 本次调查共计采集前鳍高原鳅样本2 981尾。各体长组在不同月份的数量如图11所示。7-9月采集到的前鳍高原鳅数量远多于其他月份,其中以7月的数量最多,11月的数量最少。7-9月,以41~50 mm,51~60 mm以及61~70 mm体长组个体占绝对优势。结合前鳍高原鳅各月的性成熟系数(图3),发现其有明显的产卵集群现象。

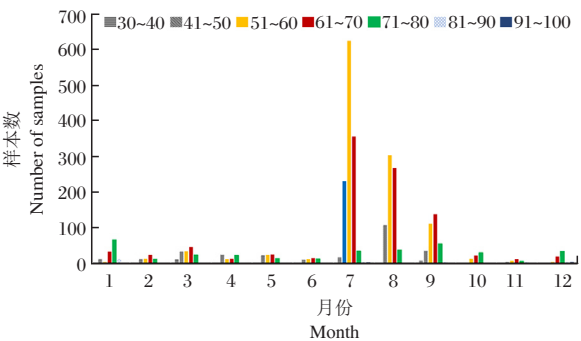


图 11 2014 年黑水河下游前鳍高原鳅各体长组的数量分布
Fig.11 Quantity distribution of different body length groups of *T. anterodorsalis* collected from the lower Heishui River in 2014

3 讨论

3.1 前鳍高原鳅的生活史类型及其保护策略

基于鱼类生物学特征参数,有研究提出了以机会策略者(opportunistic strategists)、周期策略者

(period strategists)和均衡策略者(equilibrium strategists)3种典型生活史类型为基础的三维连续统模型(Winemiller & Rose,1992)。通常情况下,机会策略者具有体型较小、生命周期短、性成熟早、绝对繁殖力低等特点,周期策略者具有体型大、生命周期长、性成熟迟、绝对繁殖力高等特点,而均衡策略者则具有体型中等或偏小、相对繁殖力高、较强的亲本护幼能力等特点(刘飞,2013)。本次调查发现,前鳍高原鳅体型较小,绝对繁殖力和相对繁殖力均较高,而且具有明显的产卵集群行为(可近似认为是一种亲本护幼形式),表明前鳍高原鳅为一种均衡策略者。

已有研究显示,均衡策略者倾向于栖息在环境变异小且相对稳定的生境中,而剧烈、频繁变动的生境变化很可能会导致其种群数量下降(Winemiller & Rose, 1992; Mims & Olden, 2012; 刘飞, 2013);也有学者指出,水文情势的可变性、可预测性和季节性与鱼类群落中具有不同生活史策略种类的丰度变动特征密切相关,其中大坝修建导致的水文情势改变,能够对机会策略者和均衡策略者的丰度变动起到明显和直接的生态过滤作用(Mims & Olden,2012)。因此,保护黑水河干支流江段栖息生境水文情势的自然稳定性及规律性,对维持前鳍高原鳅种群具有重要意义。考虑到白鹤滩水库蓄水倒灌对黑水河下游部分区域生境改变的不可逆转性,建议通过采取栖息地恢复措施(如拆除松新等小水电、恢复产卵基质),尽量保持或延长黑水河回水倒灌区上游的自然流水江段,以减缓因白鹤滩水库蓄水倒灌引起的栖息生境丧失及其种群数量下降境况。

3.2 前鳍高原鳅的繁殖季节及其亲鱼集群现象

本次研究显示,前鳍高原鳅在黑水河下游的繁殖季节为9-12月以及次年1-2月(图2,图3),表明其为秋冬季产卵类型鱼类。有研究发现,贝氏高原鳅(*Triplophysa bleekeri*)、中华鲟(*Acipenser sinensis*)、狼鱼(*Anarhichas lupus*)的产卵季节也为秋冬季(丁瑞华, 1994; Pavlov & Moksness, 1995; 何学福等, 1999),这些大多为能够适应较低水温生境的鱼类或直接为冷水性鱼类;江河大坝修建导致的滞温效应以及全球气候变暖效应,对秋冬季产卵鱼类的自然繁殖过程造成明显影响,其典型表现为推迟产卵时间或改变产卵的水温窗口期(Shoji et al, 2011; Cheng et al, 2015; Huang & Wang, 2018)。因此,金沙江下游干支流前鳍高原鳅的具体繁殖时间很可能在未来发生一定的改变,而这种改变对其种群存续是否造成明显影响,仍需要长期监测。

在各月近似相等的捕捞努力量强度下,7-8月采集到的前鳍高原鳅个体数量远高于9-12月和1-2月(图11),表明其在繁殖发生前会出现亲鱼聚集现象(尽管此时性腺未成熟,图3)。这种现象在其他鱼类如四大家鱼、中华鲟以及狼鱼等产卵前或产卵时也会观测到(湖北省水生生物研究所鱼类研究室,1976; Pavlov & Moksness, 1995; Tao et al, 2017)。已有研究发现,许多鱼类在产卵聚集时不仅产卵洄游或移动路线较为固定,而且在产卵洄游或移动时间上也显示群体水平的一致性和同步性(Pavlov & Moksness, 1995; Green & Wroblewski, 2000; 郭弘艺等, 2012; Huang & Wang, 2018); 鱼类通常会忠实地聚集在历史固定地点进行产卵活动(Green & Wroblewski, 2000), 这种有规律性的产卵洄游与聚集现象,有利于对亲鱼的集中捕捞,势必会减少参与繁殖过程的亲本数量(Tobin et al, 2013)。因此,就前鳍高原鳅而言,在繁殖季节前2个月,就需要特别加强在产卵聚集地和产卵洄游或移动路线上非法捕捞的监管。

参考文献

- 丁瑞华, 1994. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社.
- 傅菁菁, 黄滨, 芮建良, 等, 2016. 生境模拟法在黑水河鱼类栖息地保护中的应用[J]. 水生态学杂志, 37(3): 70-75.
- 郭弘艺, 魏凯, 唐文乔, 等, 2012. 中国东南沿海日本鳗幼体的发育时相及其迁徙路径分析[J]. 水产学报, 36(12): 1793-1801.
- 何学福, 贺吉胜, 严太明, 1999. 马边河贝氏高原鳅繁殖特性的研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 24(1): 69-73.
- 湖北省水生生物研究所鱼类研究室, 1976. 长江鱼类[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘飞, 2013. 赤水河鱼类群落生态学研究[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 孙嘉宁, 2013. 白鹤滩水库回水支流黑水河的鱼类生境模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 陶江平, 乔晔, 杨志, 等, 2009. 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, 2(2): 37-43.
- 王剑伟, 1992. 稀有鮡鲫的繁殖生物学[J]. 水生生物学报, 16(2): 165-174.
- 杨君兴, 潘晓斌, 陈小勇, 等, 2013. 中国淡水鱼类人工增殖放流现状[J]. 动物学研究, 34(4): 22-35.
- 杨志, 龚云, 董纯, 等, 2017. 黑水河下游鱼类资源现状及其保护措施[J]. 长江流域资源与环境, 26(6): 847-855.
- 殷名称, 1993. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社.
- 于学颖, 谭德清, 但胜国, 等, 2018. 金沙江攀枝花江段白缘鳅的繁殖生物学[J]. 四川动物, 37(3): 291-297.
- 张雄, 刘飞, 林鹏程, 等, 2014. 金沙江下游鱼类栖息地评估和保护优先级研究[J]. 长江流域资源与环境, 23(4): 496-503.
- Cheng F, Li W, Castello L, et al, 2015. Potential effects of dam cascade on fish: lessons from the Yangtze River[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 25: 569-585.
- Green J M, Wroblewski J S, 2000. Movement patterns of Atlantic cod in Gilbert Bay, Labrador: Evidence for bay residency and spawning site fidelity[J]. Journal of the Marine Biological Association of the UK, 80(6): 1077-1085.
- Huang Z L, Wang L H, 2018. Yangtze dams increasingly threaten the survival of the Chinese sturgeon[J]. Current Biology, 28(22): 3640-3647.
- Mims M C, Olden J D, 2012. Fish assemblages respond to altered flow regimes via ecological filtering of life history strategies[J]. Freshwater Biology, 58(1): 50-62.
- Oddone M C, Vooren C M, 2005. Reproductive biology of *Atlantoraja cyclophora* (Regan 1903) (Elasmobranchii: Rajidae) off southern Brazil[J]. ICES Journal of Marine Science, 62(6): 1095-1103.
- Pavlov D A, Moksness E, 1995. Development of wolffish eggs at different temperature regimes[J]. Aquaculture International, 3(4): 315-335.
- Shoji J, Toshito S I, Mizuno K I, et al, 2011. Possible effects of global warming on fish recruitment: shifts in spawning season and latitudinal distribution can alter growth of fish early life stages through changes in daylength[J]. ICES Journal of Marine Science, 68(6): 1165-1169.
- Tobin A, Currey-Randall L M, Simpfendorfer C A, 2013. Informing the vulnerability of species to spawning aggregation fishing using commercial catch data[J]. Fisheries Research, 143: 47-56.
- Winemiller K O, Rose K A, 1992. Patterns of life-history diversification in North American fishes: implications for population regulation[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 49: 2196-2218.
- Yang Z, Zhu Q G, Jin Y, et al, 2020. Response of fish assemblages to habitat changes and fishing activity in a tributary of the Jinsha River in southwest China[J]. North American Journal of Fisheries Management, 41(4): 985-998.

(责任编辑 万月华)

Reproductive Characteristics of *Triplophysa anterodorsalis* in the Lower Heishui River

YANG Zhi¹, ZHU Qi-guang¹, XU Wei¹, GONG Yun¹, JIN Yao¹, CHEN Xiao-juan¹, LIU Hong², TANG Hui-yuan¹

- (1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-projects and Restoration of
Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology,
Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R. China;
2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P.R. China)

Abstract: *Triplophysa anterodorsalis* is a small fish species endemic to the upper Yangtze River and prefers flowing water with a gravel substrate. Fragmentation of flowing stream sections in the Jinsha River has resulted in a sharp decline of the *T. anterodorsalis* population. In this study, we described the reproductive characteristics of *T. anterodorsalis* using statistical methods, focusing on the monthly changes of gonad development and the sexual maturity coefficient, reproductive population composition, egg diameter distribution, fecundity, water temperature of spawning season and reproductive aggregation. From January to December of 2014, monthly sampling of *T. anterodorsalis* were performed in the lower reaches of Heishui River. The total length, body length and body weight of each sample were measured, the gender and the development stage of the gonad were identified and the eggs of fish with ovary in stage IV were counted. Results show that the sexual maturity of *T. anterodorsalis* individuals occurs from September to the following February, with the maximum average values of gonadosomatic indices for female and male in December. The total length among which 50% of the individuals reaching sexual maturity was 72 mm for female and 78 mm for male. The sex ratio of female to male in spawning season was 0.98:1. The average egg diameter was 0.64 mm, and the egg diameter distribution displayed a single peak. The absolute fecundity of *T. anterodorsalis* ranged from 1 428 to 6 356 eggs, with the average value of 3 834 eggs, while the relative fecundity varied from 250 to 938 eggs per gram, with an average value of 535 eggs per gram. The absolute fecundity (AF) of *T. anterodorsalis* increased with total length (TL) and body weight (BW), and the relationships were fitted to quadratic functions: $AF=1.27TL^2-144.24TL+6\ 273$ ($R^2=0.510$), $AF=-2.8731BW^2+374.45BW+1\ 236.50$ ($R^2=0.450$). The range of water temperature in spawning season was 9.3–20.6°C, with an average value of 14.1°C. Our research suggests that *T. anterodorsalis* displays obvious spawning aggregation. This study provides basic data for resource protection and artificial propagation of *T. anterodorsalis*.

Key words: *Triplophysa anterodorsalis*; gonadosomatic index; fecundity; spawning aggregation; Heishui River