doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2026.05.008

辽宁杂色杜父鱼年龄结构与生长特征的初步研究

简梓聪[1,2],骆小年[1,2],段友健[1,2],李　姣[1,2],董睿欣[1,2],
赵林智[1,2],田姜润嵩[1,2],李剑桥[1,2],王美淇[1,2]

(1.大连海洋大学水产与生命学院,辽宁 大连 116023)
(2.辽宁省北方鱼类应用生物学与增养殖重点实验室,辽宁 大连 116023)

[摘要]　为研究辽宁杂色杜父鱼的年龄结构和生长特征,于 2024 年 10 月—11 月及 2025 年 4 月—5 月,在辽宁苏子河(SZH)、蒲石河(PSH)、太子河(TZH)流域采集样本 715 尾,以其矢耳石作为年龄判读材料开展系统分析. 结果显示:雌性个体体长分布为 52.00~121.50 mm,体质量为 2.65~30.37 g;雄性体长为 54.50~136.00 mm,体质量为 2.71~47.60 g. 雌雄群体的年龄跨度均为 1~5 a,体长-体质量关系式为 $W_T=8.520\times10^{-6}L^{3.203}$($R^2=0.898$,$n=715$). 采用 von Bertalanffy 生长方程拟合得到,雌、雄杂色杜父鱼渐进体长(L_∞)分别为 148.50、134.20 mm,渐进体质量(W_∞)分别为 72.34、54.67 g,生长系数(k)分别为 0.352、0.418,理论上体长等于 0 时的年龄(t_0)分别为 -0.156、-0.124 a. 通过生长加速度方程推算,雌、雄个体的生长拐点年龄分别约为 3.01、2.59 a,对应体长分别为 99.80、91.10 mm,体质量分别为 21.37、16.22 g. 综上,辽宁杂色杜父鱼具有年龄结构简单、生长迅速的特点,属于小型淡水鱼类.

[关键词]　杂色杜父鱼,年龄,生长,生长拐点,生长参数
[中图分类号]S917.4　[文献标志码]A　[文章编号]1001-4616(2026)05-0067-12

Preliminary Study on Age Structure and Growth Characteristics of *Cottus poecilopus* Heckel in Liaoning Province

Jian Zicong[1,2],Luo Xiaonian[1,2],Duan Youjian[1,2],Li Jiao[1,2],Dong Ruixin[1,2],
Zhao Linzhi[1,2],Tian Jiangrunsong[1,2],Li Jianqiao[1,2],Wang Meiqi[1,2]

(1.College of Fisheries and Life Science,Dalian Ocean University,Dalian 116023,China)
(2.Key Laboratory of Fish Applied Biology and Aquaculture in North China,Liaoning Province,Dalian 116023,China)

Abstract:To investigate the age structure and growth characteristics of *Cottus poecilopus* Heckel in Liaoning Province, a total of 715 specimens were collected from the Suzi River(SZH),Pushi River(PSH),and Taizi River(TZH) during October-November 2024 and April-May 2025. Sagittal otoliths were used as the primary material for age determination. The results showed that the standard length of females ranged from 52.00 mm to 121.50 mm,with body mass ranging from 2.65 g to 30.37 g;for males,the standard length ranged from 54.50 mm to 136.00 mm,and body mass ranged from 2.71 g to 47.60 g. The age span of both sexes was 1-5 years. The length-weight relationship was expressed as $W_T=8.520\times10^{-6}L^{3.203}$($R^2=0.898$,$n=715$). The von Bertalanffy growth function was applied to estimate growth parameters,including asymptotic length(L_∞)and asymptotic weight(W_∞)were 148.50 mm and 72.34 g for females,134.20 mm and 54.67 g for males,respectively; the growth coefficient(k)was 0.352 for females and 0.418 for males;the theoretical age at zero length(t_0)was -0.156 years for females and -0.124 years for males. Based on the growth acceleration equation,the inflection point ages were approximately 3.01 years for females and 2.59 years for males,corresponding to lengths of 99.80 mm and 91.10 mm,and body masses of 21.37 g and 16.22 g,respectively. In conclusion,*Cottus poecilopus* Heckel in Liaoning Province exhibits a simple age structure and rapid growth,characteristic of a small-sized fish species.

Key words:*Cottus poecilopus* Heckel,age,growth,growth inflection point,growth parameters

收稿日期:2026-01-03.
基金项目:2025 年辽宁省科技重大专项(2025JH1/11700001)、2024 年辽宁省科技计划联合计划项目(技术攻关计划项目)(2024JH2/102600084)、"兴辽英才计划"项目(XLYC2413055).
通讯作者:骆小年,博士,研究员,研究方向:鱼类增养殖及遗传育种. E-mail:luoxiaonian@dlou.edu.cn

杂色杜父鱼(*Cottus poecilopus* Heckel),别称花杜父鱼,隶属于鲉形目(Seonpaeniformes),杜父鱼科(Cottidae),杜父鱼属(*Cottus*)[1],是我国东北地区溪流生态系统中典型的亚冷水性底栖鱼类,主要分布于鸭绿江、黑龙江及辽河等水系[2]. 杂色杜父鱼喜栖息于水质清澈、砾石底质且水温较低的山涧溪流,适宜水温范围为 8~16 ℃,对水质变动极为敏感[3-4]. 该物种多集中于每年 4 月下旬至 6 月上旬在砾石底质的浅水区筑巢产卵,亲鱼具有护卵行为,繁殖后摄食与活动模式随环境水文条件变化而调整,是研究亚冷水性鱼类生态适应与生活史策略的理想对象之一.

近年来,受水利工程建设、栖息地破碎化及人为干扰等因素影响,杂色杜父鱼野生种群资源呈衰退趋势,需系统开展其种群生物学研究,为资源保护与可持续利用提供科学依据[5]. 鱼类年龄结构与生长特征是资源评估与生态管理的基础,能够揭示个体生长规律、种群结构特征及其动态变化,为制定针对性保护与管理策略提供关键参数[6]. 段友健等[7]利用耳石解析了岗更湖瓦氏雅罗鱼(*Leuciscus waleckii*)的年龄结构,明确了其合理捕捞规格;陈一竹等[8]基于微耳石研究发现热裸裂尻鱼(*Schizopygopsis thermalis*)种群在高海拔地区的年龄范围和个体平均年龄均显著大于低海拔地区,年龄结构存在明显差异;廖传松等[9]则通过耳石分析等方法,对三峡水库光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus* Sauvage et Dabry)的年龄结构与生长特征进行研究,为三峡水库鱼类资源的科学管理提供依据. 这些研究均凸显了年龄与生长分析在渔业资源管理中的实践意义.

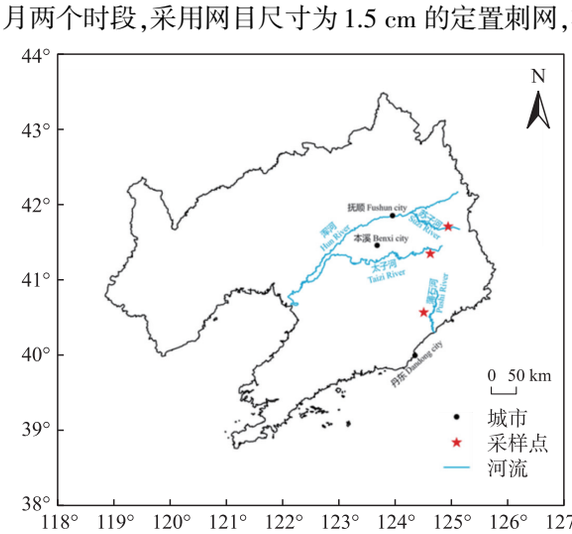
围绕杂色杜父鱼,国内外学者已在多方面开展了系列研究. 在寄生虫与宿主关系方面,Bakke 等[10]发现其可作为鲑三代虫(*Gyrodactylus salaris* Malmberg)的潜在庇护宿主;Winger 等[11]进一步揭示了不同地理种群中三代虫寄生差异,反映了寄生关系的地域特异性;在杂交育种方面,Vítek 等[12]在捷克斯夫拉特卡河鉴定出杂色杜父鱼与欧杜父鱼(*Cottus gobio*)的天然杂交个体,为该属鱼类杂交与基因渗透提供了实例. 国内研究则多集中于基础生物学与遗传多样性,霍堂斌等[13]对蒲石河流域杂色杜父鱼形态、繁殖力与食性进行了初步研究;肖志国等[14]开展了杂色杜父鱼的初步人工繁殖试验;闫春梅等[15]基于 AFLP 标记发现漫江种群遗传多样性最高,为种质资源保护提供了分子依据.

综上所述,尽管其生物学研究已取得了一定进展,但关于杂色杜父鱼年龄结构与生长特征的系统研究尚属空白. 为此,本研究以辽宁省主要河流采集的杂色杜父鱼为样本,以矢耳石作为年龄鉴定材料,旨在系统解析该地区种群的年龄组成、生长方程与生长拐点等关键特征,旨在完善该物种的基础生态学数据,为其种质资源保护、科学管理及可持续开发利用提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　材料来源

本研究于 2024 年 10 月—11 月以及 2025 年 4 月—5 月两个时段,采用网目尺寸为 1.5 cm 的定置刺网,在辽宁省境内的苏子河(SZH)、蒲石河(PSH)和太子河(TZH)3 个水域进行杂色杜父鱼捕捞作业,共计获得有效样本 715 尾. 所有样本均现场测量体长(*L*)、全长(*TL*)及体质量(*W*),长度测量精度为 0.01 mm,体质量精度为 0.01 g. 随后剪开颅骨,取出位于脑后听囊内的耳石,用 75%乙醇清洗去除表面附着的软组织,自然风干后分别置于 1 mL 离心管中,逐一编号并低温保存待用. 采样点的地理位置如图 1 所示.



SZH:41°49′17″N,125°04′06″E;PSH:40°35′27″N,124°30′23″E;TZH:41°14′30″N,124°28′30″E.

图 1　杂色杜父鱼采样点图

Fig. 1　Sampling sites of *Cottus poecilopus* Heckel

1.2　雌雄鉴别

通过解剖观察性腺形态进行性别鉴定:雄性个体的精巢呈乳白色、扁平带状或叶片状,结构较为简单;雌性个体卵巢的卵巢膜下布满黄色或橙黄色颗粒状卵粒,肉眼可见大量卵细胞. 典型形态特征见图 2.

1.3　年龄鉴定

摘取每尾鱼的左右两侧矢耳石,经 75%乙醇清洗后置于离心管中保存备用. 在 Olympus BX63 光学显

微镜下对耳石进行全视野拍摄,随后利用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析软件测量各年轮的轮径长度. 耳石的处理和年龄判读方法参考鸭绿沙塘鳢(*Odontobutis yaluens*)[16]的相关研究,即耳石不需要打磨,直接在解剖镜下计数清晰可见的年轮带,以确定每尾鱼的年龄.

1.4 体长-体质量关系

采用幂函数模型 $W=aL^b$ 对体长与体质量之间的关系进行拟合,其中 W 为体质量(g),L 为体长(mm),a 为条件因子,b 为异速生长指数. 利用协方差分析(ANCOVA)检验雌雄个体间体长-体质量回归方程的差异性.

1.5 体长退算

通过 Image-Pro Plus 6.0 软件逐一测量耳石上各年轮的轮径宽度,将轮径对数值与体长对数值进行线性回归,获取斜率 a,再代入 Francis 退算公式推算各年龄对应的体长[17]. 计算公式:



图 2 杂色杜父鱼雌雄鉴别

Fig. 2 Sexual identification of *Cottus poecilopus* Heckel

$$L_n=L\times(R_n/R)^a. \tag{1}$$

式中,L_n 为 n 龄时的退算体长(mm),L 为实测体长(mm),R_n 为 n 龄时的耳石轮径(mm),R 为耳石总半径(mm),a 为前述回归斜率.

1.6 生长方程

分别选用 VBGF、Gompertz GF、Logistic GF 3 种理论生长方程,对杂色杜父鱼的年龄-生长关系进行拟合[18-20],3 种方程的具体表达式如下:

VBGF $$L_t=L_\infty(1-e^{-k(t-t_0)}), \tag{2}$$

Gompertz GF $$L_t=L_\infty e^{-e(-k(t-t_0))}, \tag{3}$$

Logistic GF $$L_t=L_\infty/(1+e^{-k(t-t_0)}). \tag{4}$$

其中,L_t 为 t 龄时的体长,L_∞ 为渐进体长,k 为生长系数,t 为年龄,t_0 为理论初始年龄. 利用赤池信息量准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC)和决定系数 R^2 筛选最优模型[21-22].

1.7 数据处理

数据统计与图像绘制分别采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 19.0、OriginPro 8.0、Image-Pro Plus 6.0 及 Photoshop CS4 Extended 软件完成. 所有统计检验的显著性水平设为 $P=0.05$.

2 结果与分析

2.1 年轮特征

杂色杜父鱼的矢耳石外形不规则,轮廓特征明显. 在透射光下观察耳石,可见自核心区向外缘延伸的轮纹结构. 显微镜下,轮纹由宽窄交替的明带与暗带组成,宽而明亮的条带对应于夏季的快速生长期,窄而较暗的条带则为冬季的缓慢生长期,二者交界处即被认定为年轮. 靠近核心区的年轮间距较窄,向边缘逐渐变宽,这一规律有助于辅助判定生长周期. 图 3 展示 3 龄个体耳石的典型轮纹特征.

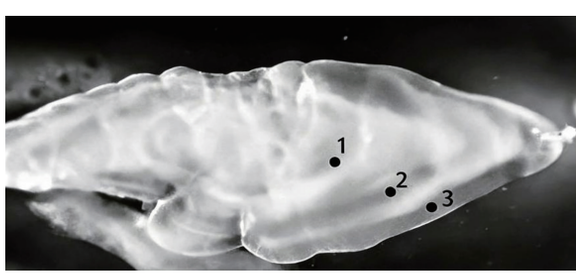


图 3 杂色杜父鱼 3 龄耳石的轮纹特征

Fig. 3 Otolith annulus characteristics of 3-year-old *Cottus poecilopus* Heckel

2.2 样本组成

2.2.1 杂色杜父鱼体长与体质量分布

本研究共采集 715 尾样本,其中雌性 462 尾,

雄性 253 尾. 统计结果显示(图 4),雌性个体体长范围为 52.00~121.50 mm,平均值 74.30 mm;雄性为 54.50~136.00 mm,平均值 80.50 mm. 以 10 mm 为组距划分,雌性优势体长组为 70.00~79.00 mm(占雌性总数的 39.6%);雄性优势体长组为 80.00~89.00 mm(占雄性总数的 28.1%). 雌性个体体质量范围为 2.65~30.37 g,平均值 8.75 g;雄性为 2.71~47.60 g,平均值 12.26 g. 以 5 g 为体质量组距,雌性与雄性优势体质量范围均为 5~9 g,雌性和雄性的优势体质量组个体数分别占雌性和雄性总数的 65.6%和 37.6%.

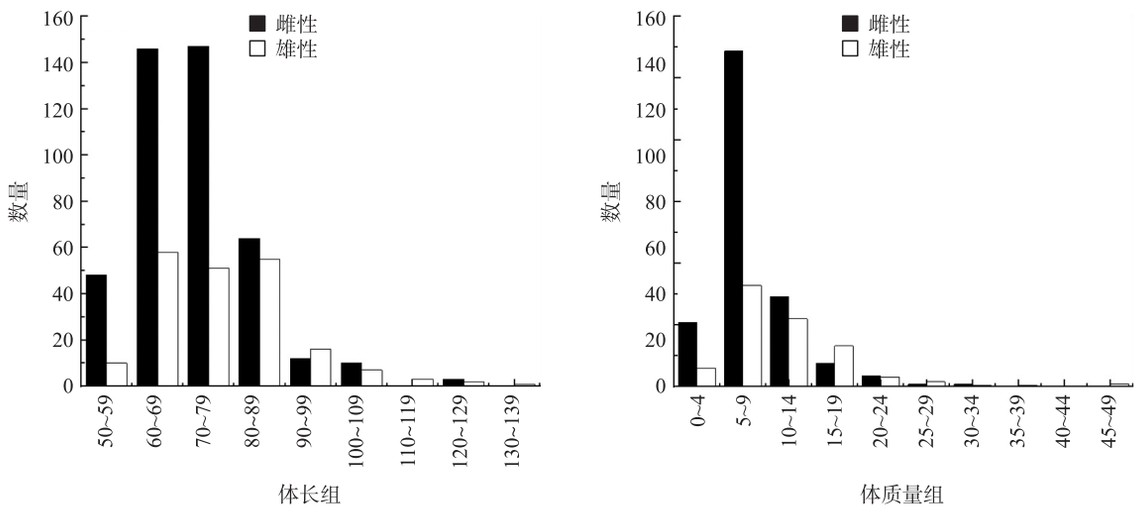


图 4　杂色杜父鱼体长与体质量分布

Fig. 4　Body length and body mass distribution of *Cottus poecilopus* Heckel

2.2.2　杂色杜父鱼不同地理群体体长与体质量特征

2.2.2.1　杂色杜父鱼不同地理群体体长特征

苏子河(n=208)、太子河(n=234)、蒲石河(n=273)3 个群体的雌性比例均高于雄性(雌雄比分别为 SZH 2.25∶1、TZH 1.75∶1、PSH 1.63∶1). 以 10 mm 为体长组距分析,苏子河与蒲石河雌鱼优势体长组均为 70.00~79.00 mm,太子河雌鱼优势体长组为 60.00~69.00 mm. 苏子河与蒲石河雄鱼优势体长组均为 80.00~89.00 mm,太子河雄鱼优势体长组为 70.0~79.0 mm. 各水域均呈现雌性数量占优、雄性平均体长更大的性二态特征,如图 5 所示.

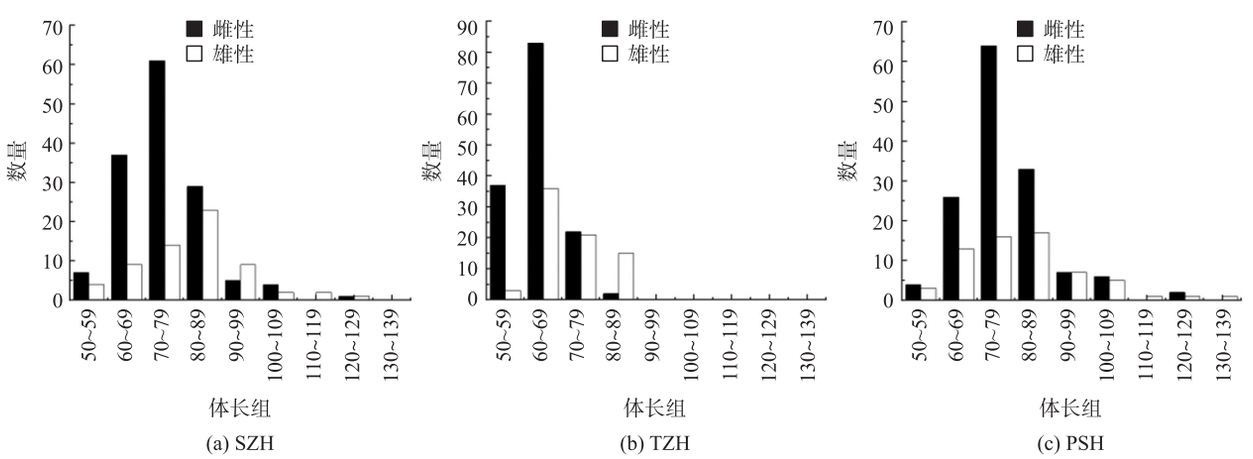


图 5　不同地理群体杂色杜父鱼体长组分布

Fig. 5　Body length frequency distribution of *Cottus poecilopus* Heckel in different geographic populations

2.2.2.2　杂色杜父鱼不同地理群体体质量特征

3 个地理群体的雄性体质量均值(10.72~13.42 g)均高于雌性(7.05~10.05 g),且雄性体质量分布范围更宽. 以 5 g 为组距分析,三地雌、雄个体的优势体质量组均集中于 5~9 g,但雌性该组占比(65.6%~68.3%)显著高于雄性(35.5%~46.7%),体现出雌、雄个体在核心体质量区间的聚集度差异,如图 6 所示.

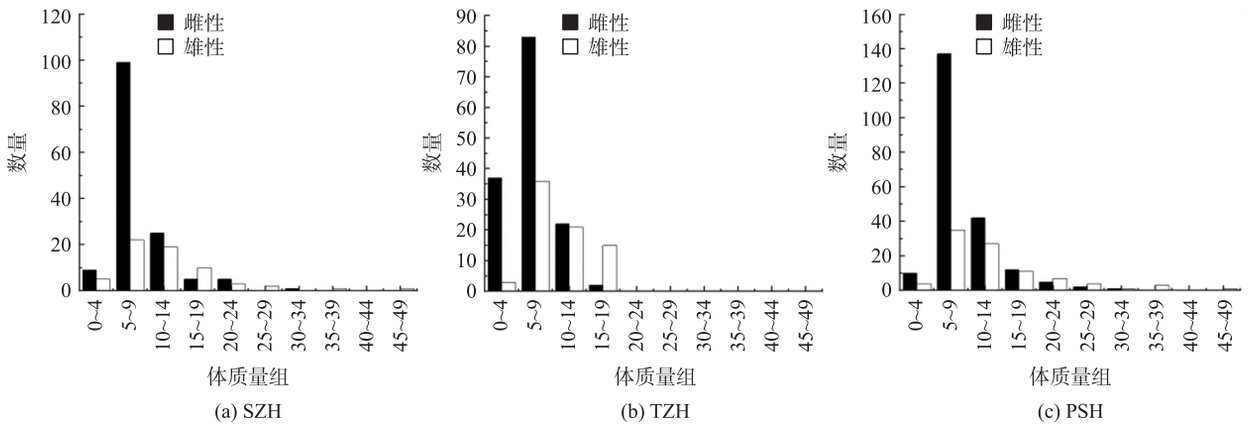


图 6　不同地理群体杂色杜父鱼体质量组分布

Fig. 6　Distribution of body mass groups of *Cottus poecilopus* Heckel in different geographic populations

2.2.3　年龄组成

随机选取 296 尾样本进行耳石年龄判读,结果显示雌、雄个体的最高年龄均为 5 a,优势年龄组均为 2~3 a,分别占雌性和雄性样本总数的 84.1%和 71.7%,年龄组成呈正态分布(图 7).

2.3　生长特征

2.3.1　体长与体质量的关系

基于 715 尾样本的实测数据,采用幂函数拟合体长(L)与体质量(W)的关系(图 8),公式为 $W=aL^b$,其中常数 b 表示鱼类生长过程中的体型变化[23],得到以下方程:

$$W_{总}=8.520\times10^{-6}L^{3.203},R^2=0.898,n=715. \tag{5}$$

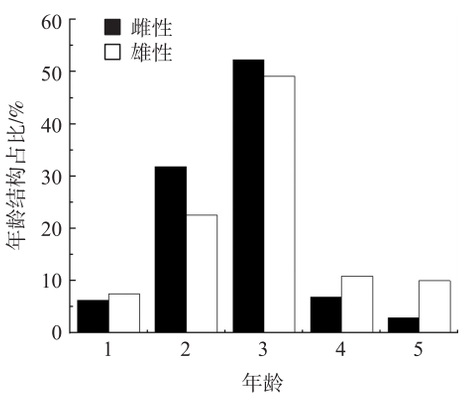


图 7　杂色杜父鱼雌雄种群年龄结构比较

Fig. 7　Age structure comparison between female and male *Cottus poecilopus* Heckel

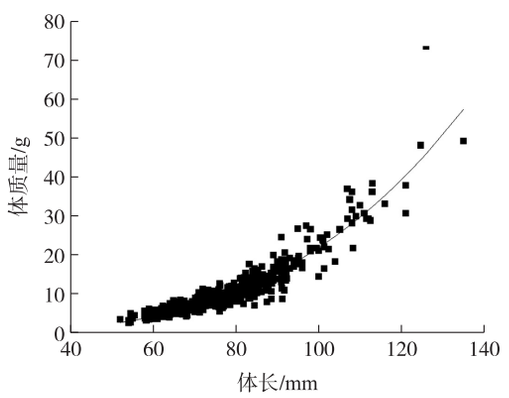


图 8　体长与体质量散点图

Fig. 8　Scatter diagram of body length and body mass

2.3.2　杂色杜父鱼不同地理群体体长与体质量的关系

分别将苏子河($n=208$)、太子河($n=234$)、蒲石河($n=273$)杂色杜父鱼样本的体长与体质量基本参数使用幂函数拟合体长与体质量关系散点图,如图 9 所示.

$$W_{SZH}=2.017\times10^{-5}L^{3.010},R=0.876,n=208, \tag{6}$$

$$W_{TZH}=1.164\times10^{-5}L^{3.134},R=0.960,n=234, \tag{7}$$

$$W_{PSH}=4.238\times10^{-6}L^{3.357},R=0.871,n=273. \tag{8}$$

2.3.3　体耳石半径与体长的关系

对 261 尾样本的耳石半径(r)和鱼体体长(L)进行回归分析,获得雌、雄个体的幂函数方程并制作散点图(图 10):

$$L_{♀}=35.038r^{1.512},R^2=0.796\ 7,n=166, \tag{9}$$

$$L_{♂}=40.405r^{1.255},R^2=0.836\ 7,n=95. \tag{10}$$

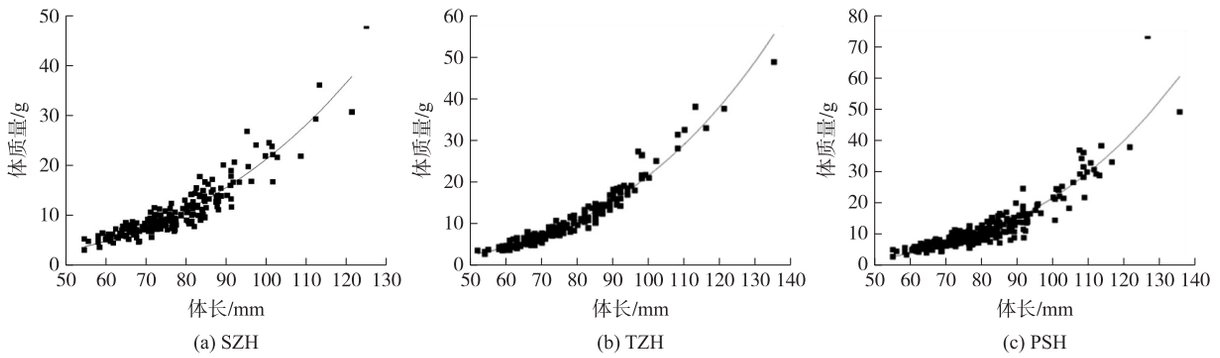


图 9　不同地域体长与体质量关系散点图

Fig. 9　Scatter plot of the relationship between body length and body mass across different geographical population

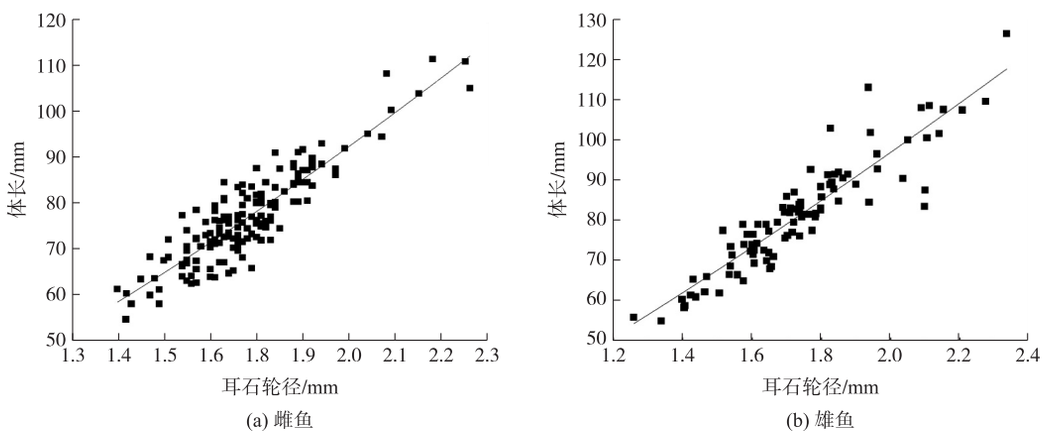


图 10　杂色杜父鱼耳石半径与体长关系散点图

Fig. 10　Scatter plot of the relationship between otolith radius and body length of *Cottus poecilopus* Heckel

2.3.4　体长退算

采用 Francis 公式对各龄鱼体长进行退算,结果见表 1 和表 2. 对比各龄组的退算体长与实测体长均值可知,退算值普遍低于实测值,呈现典型的李氏现象(Lee's phenomenon),反映出该种群可能承受较高的捕捞压力.

表 1　雌性杂色杜父鱼的退算体长

Table 1　Back-calculated body length for female *Cottus poecilopus* Heckel

年龄	数量/ind.	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	L_4/mm	L_5/mm
1	9	29.20				
2	54	44.30	40.20			
3	90	49.70	65.50	60.20		
4	10	49.90	67.80	81.90	70.90	
5	6	55.70	69.80	86.30	103.00	107.20
平均值		45.76	60.82	76.13	86.95	107.20
实测值		60.40	67.20	80.80	89.0	114.00

表 2　雄性杂色杜父鱼的退算体长

Table 2　Back-calculated body length for male *Cottus poecilopus* Heckel

年龄	数量/ind.	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	L_4/mm	L_5/mm
1	10	26.00				
2	18	44.00	41.50			
3	49	48.50	64.70	56.80		
4	14	52.80	70.40	84.90	70.00	
5	11	48.80	69.70	86.70	101.70	104.50
平均值		44.02	61.58	66.13	85.85	104.50
实测值		57.40	66.70	79.40	98.30	108.00

2.3.5 鱼类生长方程

分别采用 von Bertalanffy、Logistic、Gompertz 3 种模型拟合年龄-体长关系. 基于 AIC、BIC 及 R^2 的比较(表 3),von Bertalanffy 模型拟合效果最好(表 3、图 11、图 12),由此得到雌雄个体的体长生长方程:

雌性

$$L_t = 148.5\times(1-e^{-0.352(t+0.156)}),R^2=0.981,n=176. \quad (11)$$

雄性

$$L_t = 134.2\times(1-e^{-0.418(t+0.124)}),R^2=0.976,n=120. \quad (12)$$

其中,整体、雌、雄渐进体长(L_∞)分别为 148.50、134.20 mm,理论上体长等于 0 时的年龄(t_0)分别为-0.156、-0.124 a,生长系数(k)分别为 0.352、0.418. 将体长方程代入体长-体质量关系式,得到体质量生长方程:

雌性 $$W_t = 0.0215\times[14.85\times(1-e^{-0.352(t+0.156)})]^{3.052}, \quad (13)$$

雄性 $$W_t = 0.0187\times[13.42\times(1-e^{-0.418(t+0.124)})]^{3.112}. \quad (14)$$

雌、雄渐进体质量(W_∞)分别为 72.34、54.67 g,年龄与退算体长的拟合曲线见图 11、图 12.

表 3 杂色杜父鱼的生长模型检验对比

Table 3 Comparison and validation of growth models for *Cottus poecilopus* Heckel

生长方程模型	AIC	BIC	R^2
von Bertalanffy	♀:118.9 ♂:114.2	♀:128.6 ♂:123.5	♀:0.981 ♂:0.976
Logistic	♀:121.7 ♂:116.8	♀:131.4 ♂:126.1	♀:0.979 ♂:0.975
Gompertz	♀:127.1 ♂:120.5	♀:136.8 ♂:129.8	♀:0.974 ♂:0.971

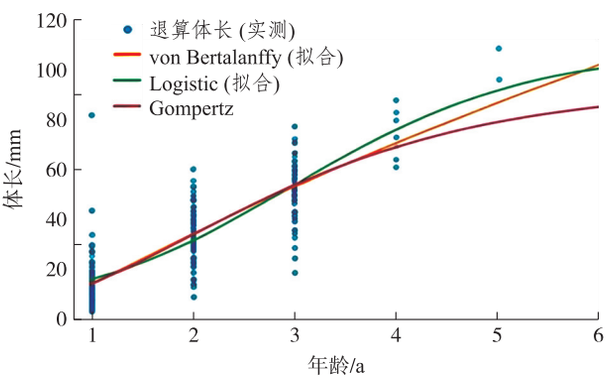


图 11 杂色杜父鱼雌鱼年龄与与退算体长的关系

Fig. 11 The relationship between age and back-calculated body length of female *Cottus poecilopus* Heckel

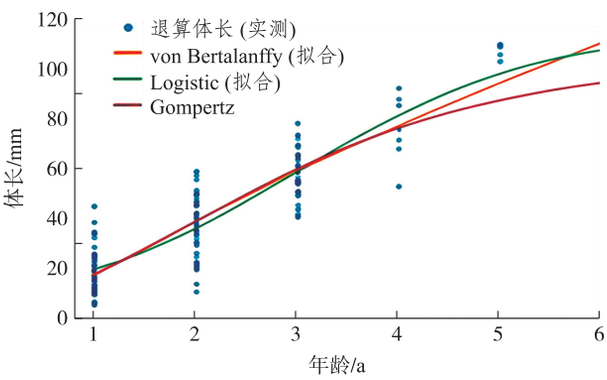


图 12 杂色杜父鱼雄鱼年龄与与退算体长的关系

Fig. 12 The relationship between age and back-calculated body length of male *Cottus poecilopus* Heckel

2.3.5.1 杂色杜父鱼不同地理群体生长方程

分别对苏子河、太子河、蒲石河群体拟合 von Bertalanffy 生长方程,结果显示,三者渐进体长(L_∞)分别为 148.50、124.60、135.80 mm,理论初始年龄(t_0)分别为-1.443、-1.411、-1.544 a,生长系数(k)分别为 0.231、0.237、0.200.

$$L_{t\mathrm{SZH}} = 148.5\times(1-e^{-0.231(t+1.443)}),R^2=0.860,n=97; \quad (15)$$

$$L_{t\mathrm{TZH}} = 124.6\times(1-e^{-0.237(t+1.411)}),R^2=0.706,n=84; \quad (16)$$

$$L_{t\mathrm{PSH}} = 135.8\times(1-e^{-0.200(t+1.544)}),R^2=0.894,n=115. \quad (17)$$

2.4 生长速度和生长加速度

对体长和体质量的生长方程分别求一阶和二阶导数[24],得到生长速度与加速度方程:

雌性 $$\mathrm{d}L/\mathrm{d}t = 5.2272\times e^{-0.352(t+0.156)}, \quad (18)$$

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}t = 0.343\times[14.85\times(1-e^{-0.352(t+0.156)})]^{2.052}\times e^{-0.352(t+0.156)}, \quad (19)$$

$$\mathrm{d}^2L/\mathrm{d}t^2 = -1.840\times e^{-0.352(t+0.156)}, \quad (20)$$

$$\mathrm{d}^2W/\mathrm{d}t^2 = 0.343\times e^{-0.352(t+0.156)}\times[56.02\times(14.85\times(1-e^{-0.352(t+0.156)}))^{1.052}\times e^{-0.704(t+0.156)}-0.352\times(14.85\times(1-e^{-0.352(t+0.156)}))^{2.052}]. \quad (21)$$

雄性 $$\mathrm{d}L/\mathrm{d}t = 5.6196\times e^{-0.418(t+0.124)}, \quad (22)$$

$$\mathrm{d}W/\mathrm{d}t = 0.326\times[13.42\times(1-e^{-0.418(t+0.124)})]^{2.112}\times e^{-0.418(t+0.124)}, \quad (23)$$

$$\mathrm{d}^2L/\mathrm{d}t^2 = -2.349\times e^{-0.418(t+0.124)}, \quad (24)$$

$$d^2W/dt^2=0.326\times[2.112\times(13.42\times(1-e^{-0.418(t+0.124)}))^{1.112}\times(5.610\times e^{-0.418(t+0.124)})^2\times e^{-0.418(t+0.124)}-0.418\times(13.42\times(1-e^{-0.418(t+0.124)}))^{2.112}\times e^{-0.418(t+0.124)}]. \quad (25)$$

根据生长加速度方程,令体质量生长的二阶导数为 0,可求解得到生长拐点年龄,即 $t_i=\ln b/k+t_0$. 计算结果显示,雌性拐点年龄约为 3.01 a,相应体长为 99.80 mm,相应体质量为 21.37 g;雄性拐点年龄为 2.59 a,相应体长为 91.10 mm,相应体质量为 16.22 g.

图 13 进一步表明,当体质量生长加速度为 0 时,体质量生长速度达到最大值(即拐点);对于杂色杜父鱼体长而言,其生长速度随年龄增加持续下降,生长加速度始终为负值且逐渐趋近于 0,因此其体长生长不存在拐点.

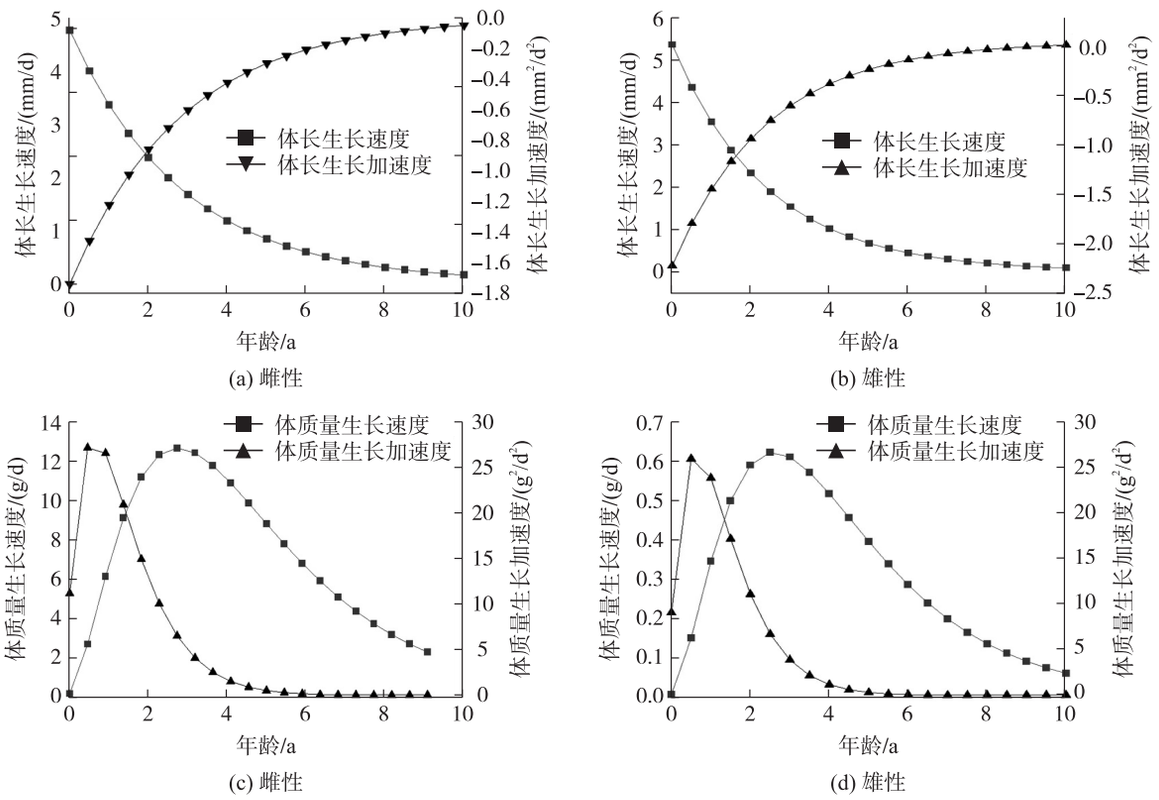


图 13　杂色杜父鱼体质量、体长的生长速度和生长加速度

Fig. 13　Growth rate and growth acceleration of body mass and body length of *Cottus poecilopus* Heckel

3　讨论

3.1　杂色杜父鱼年龄材料的选择

鱼类年龄鉴定是生活史研究与种群动态评估的基础,常用方法包括长度分析法和硬组织鉴定法,其中硬组织鉴定法因准确性高、重复性好而被广泛应用于现代渔业生物学研究中[25]. 常用硬组织材料主要有鳞片、耳石、脊椎骨和鳃盖骨等,其适用性取决于年轮在该组织中的清晰度与判读可靠性[26]. 鱼类年龄数据的准确性,不仅是开展其生活史研究与种群生态学分析的重要根基,更是科学评价鱼类资源现状的必备基础资料[27].

研究表明,不同鱼类的年龄鉴定材料需根据其形态特征和轮纹清晰度进行选择. 花羔红点鲑(*Salvelinus malma*)因其鳞片轮纹清晰,常以鳞片作为年龄鉴定材料[28];黄斑褶鮈(*Pseudecheneis sulcatus*)则因耳石轮纹模糊,脊椎骨在反射光下清晰可辨,故选用脊椎骨作为年龄鉴定材料[29];银鲫(*Carassius auratus gibelio*)在透射光下微耳石磨片呈现明暗相间的清晰轮纹,效果优于脊椎骨与鳃盖骨,因此以微耳石为鉴定依据[30];同为鲉形目的许氏平鲉(*Sebastes schlegelii*)[31]亦因矢耳石轮纹清晰而采用矢耳石进行年龄分析(表 4).

表 4　不同鱼类的年龄鉴定材料选择

Table 4　Selection of age determination material for different fish species

种类	年龄鉴定材料选择	文献来源	年份
花羔红点鲑(*Salvelinus malma*)	鳞片	黄权等[28]	1999
黄斑褶鲆(*Pseudecheneis sulcatus*)	脊椎骨	金洪宇等[29]	2020
银鲫(*Carassius auratus gibelio*)	微耳石	刘成杰等[30]	2015
许氏平鲉(*Sebastes schlegelii*)	矢耳石	李军[31]	2005
杂色杜父鱼(*Cottus poecilopus* Heckel)	矢耳石	本试验	2025

Campana[32]通过研究指出,在众多硬组织材料中,耳石因其不可重吸收、连续生长、高龄个体仍具清晰轮纹等特性,被视为记录鱼类生活史信息最可靠的材料之一. 本研究中,杂色杜父鱼体表鳞片细小且退化,脊椎骨脆弱且无明显年轮,而矢耳石在未打磨状态下即呈现清晰、连续的年轮结构. 基于上述比较及耳石在年龄鉴定中的显著优势,本研究选用矢耳石作为杂色杜父鱼的年龄鉴定材料. 年龄鉴定结果表明,雌、雄个体最高年龄均为 5 龄,年龄结构以 2~3 龄为主,说明矢耳石适用于该物种的年龄鉴定,所获数据可为后续生长、死亡等种群参数估算提供可靠基础.

3.2　杂色杜父鱼的生长参数分析

在鱼类生长模式的研究中,体长与体质量之间的幂函数关系及其参数 b(异速生长指数)是区分不同生长类型的常用指标[33]. 若 $b>3$,说明体质量的累积速度超过体长的增加速度,即正异速生长;若 $b<3$,则为负异速生长;当 $b\approx3$ 时,则为匀速生长. 本研究结果显示,辽宁地区杂色杜父鱼总体 b 值为 3.203,表现为正异速生长模式. 进一步分析不同水系种群发现,蒲石河与太子河种群 b 值分别为 3.357 和 3.134,均为正异速生长模式,反映两者生长模式相似;苏子河种群 b 值为 3.010,接近匀速生长模式,与霍堂斌等[13]此前在蒲石河种群中测得的 b 值 2.966 相近,说明同一物种在不同环境下生长模式可呈现一定可塑性. 与同域分布的其他杜父鱼属种类相比,辽宁杂色杜父鱼的生长模式与太平洋绒杜父鱼[34](*Hemitripterus villosus*)相同,而与黑龙江中杜父鱼[35](*Mesocottus haitej* Dybowski)、阿尔泰杜父鱼[36](*Cottus sibiricus altaicus* Li et Ho)匀速生长模式存在差异(表 5). 这种差异可能与不同种类对水温、底质、饵料资源等环境因子的适应性响应相关,也反映出杜父鱼属鱼类在东北地区不同生境中的生活史策略多样性.

表 5　同属鱼类的生长参数对比

Table 5　Comparative analysis of growth parameters among congeneric fish species

种类	b	k	L_∞	t_0	采样区域	年份	文献来源
太平洋绒杜父鱼(*Hemitripterus villosus*)	3.856	—	—	—	大连黄海沿岸	2006	杜佳垠[34]
黑龙江中杜父鱼(*Mesocottus haitej* Dybowski)	3.039	0.343	182.46	−0.613	三道沟河	2016	霍堂斌等[35]
阿尔泰杜父鱼(*Cottus sibiricus altaicus* Li et Ho)	3.075	—	—	—	卡依尔特河	2011	霍堂斌等[36]
杂色杜父鱼(*Cottus poecilopus* Heckel)	2.966	0.331	143.97	−1.443	蒲石河	2015	霍堂斌等[13]
	3.080	0.200	—	—	挪威地区	2001	Hesthagen 等[39]
杂色杜父鱼(整体样本)(*Cottus poecilopus* Heckel)	3.203	♀:0.352 :0.418	148.50 134.20	−0.156 −0.124	辽宁省河流	2025	本试验
杂色杜父鱼(苏子河样本)(*Cottus poecilopus* Heckel)	3.010	0.231	148.50	−1.443	苏子河	2025	本试验
杂色杜父鱼(太子河样本)(*Cottus poecilopus* Heckel)	3.134	0.237	124.60	−1.411	太子河	2024	本试验
杂色杜父鱼(蒲石河样本)(*Cottus poecilopus* Heckel)	3.357	0.200	135.80	−1.544	蒲石河	2025	本试验

生长系数 k 是评价鱼类生长速率的重要参数之一. 根据 Branstetter[37]与 Musick[38]提出的分类标准,鱼类生长类型可分为缓慢型($0.05\leqslant k<0.1$)、中等速率型($0.1\leqslant k<0.2$)和快速型($0.2\leqslant k<0.5$). 本研究拟合的 von Bertalanffy 生长方程显示,辽宁杂色杜父鱼雄鱼与雌鱼 k 值分别为 0.352、0.418,均属于快速生长类型,表明其在当前生境中具有较高的生长速率. 该结果与 Hesthagen 等[39]对挪威亚高山河流中杂色杜父鱼的研究($b=3.080$,$k=0.200$)及霍堂斌等[13]对蒲石河种群的研究($b=2.996$,$k=0.331$)结论相符,进一步印证了该物种在适宜条件下具备快速生长的生物学基础. 与过往研究相比,本研究 k 值略有升高,这一变化可能与近年来杂色杜父鱼种群数量下降、种内竞争减弱及饵料资源相对充裕有关[40],反映了杂色杜父鱼在不同资源条件下的生长可塑性. 基于生长方程推算,辽宁杂色杜父鱼雄鱼与雌鱼的生长拐点年龄分别为 3.01、2.59a,对应体长分别为 99.80、91.10 mm. 与辽宁地区其他小型鱼类如鸭绿沙塘鳢[16]相比,杂色杜父鱼的生长拐点出现较早,反映出其更快的生长速率. 另外,尽管苏子河、太子河、蒲石河 3 个流域的杂

色杜父鱼种群生长节律整体趋同,但其生长核心参数存在显著分化. 3 个种群的渐进体长(L_∞)分别为 148.50、124.60 和 135.80 mm,生长系数(k)分别为 0.231、0.237 和 0.200,理论体长为 0 时的年龄(t_0)分别为−1.443、−1.411 和−1.544 a. 其中,苏子河种群兼具最高的 L_∞ 和相对较高的 k 值,呈现出高生长速率与大体型上限的生长特征. 该流域平均海拔 300~500 m、年均水温 7.5~9.5 ℃,处于杂色杜父鱼生长的最适区间,且底栖动物平均密度 1 000~1 500 个/m^2、生物量 25~35 g/m^2,为 3 个流域最高,适宜的温度环境与充足的饵料供给共同支撑了该种群高生长速率下的持续体长积累[40-41]. 相比之下,太子河种群的 k 值最高但 L_∞ 最低,形成快速生长与小体型上限的繁殖优先策略. 该流域为 3 个流域中海拔最低(上游采样段平均 511 m)、生长季水温最高 12~18 ℃的流域,高温虽提升了种群基础代谢与生长效率,但也驱动性成熟年龄提前,使能量分配从体型增长向繁殖过程偏移,同时流域内较快的水流流速、较高的环境扰动与捕食压力,进一步驱动种群通过快速生长保障生存与繁殖成功率[42]. 而蒲石河种群则表现为 k 值最低、L_∞ 居中的“慢生长、大体型上限”的体型积累策略. 该流域为 3 个流域中海拔最高(平均 400~600 m)、生长季水温 11~17 ℃的流域,水温季节波动平缓,种群生长周期更长,稳定的水文环境与较低的捕食压力为体型积累提供了有利条件,但偏低的水温也限制了种群的基础生长效率[43]. 海拔介导的水温分异是驱动生长策略分化的基础环境变量,而饵料丰度与栖息地复杂度则进一步强化了种间差异.

渔获物分析表明,当前种群中多数个体体长低于拐点体长,表明部分流域可能存在过度捕捞或开发强度偏高的情况. 根据渔业资源评估理论,过度捕捞往往导致鱼类种群年龄结构趋向低龄化,并使大量个体在达到最适生长阶段前即被利用[33],这与本研究所观察到的趋势吻合. 该现象不仅影响了辽宁杂色杜父鱼种群的资源补充潜力,也对区域溪流生态系统的结构与功能稳定性构成潜在威胁. 因此,建议结合其生长特性与种群现状,在关键繁殖期实施捕捞限额与尺寸管制,并加强栖息地保护与生态流量调控,以实现其资源的可持续利用与种群长期恢复.

3.3 杂色杜父鱼渔业管理建议

杂色杜父鱼作为典型的亚冷水性溪流鱼类,其生存与繁殖高度依赖水质清澈、溶氧充足且水流较急的山涧溪流环境,对水文情势、底质组成及栖息地连续性具有较高敏感性[44]. 近年来,辽宁省部分流域由于水利工程兴建与水资源调配,造成局部河段自然水文过程改变、水量减少及连通性下降,此类生境扰动已被证实会对依赖流水生境的鱼类造成负面影响[45]. 与此同时,非可持续性捕捞压力,尤其是繁殖期垂钓强度增加与非合规渔具使用,进一步加剧了种群衰退,引发密度下降、年龄结构简化及繁殖补充不足等问题,形成了“捕捞压力超越资源再生能力”的恶性循环. 研究表明,过度捕捞与非法渔法可直接导致小型淡水鱼类种群数量下降与年龄结构退化[46]. 在上述多重人为干扰叠加作用下,杂色杜父鱼的栖息地范围呈逐步萎缩态势,其种群规模也呈现下降趋势. 作为我国北方亚冷水溪流生态系统的指示物种及区域代表性珍稀鱼类,杂色杜父鱼的有效保护对于区域水生生物多样性维持及特有物种研究具有重要价值. 然而,目前针对该物种的生态习性与种群动态研究仍相对缺乏,需系统开展其栖息地动态监测、分布勘测与生物学研究. 结合本研究揭示的生长特性,杂色杜父鱼具有较快的生长速率与较早的生长拐点,反映出资源已面临较大捕捞压力.

为促进其种群恢复与可持续利用,提出以下针对性管理建议:制定捕捞规范与标准,对捕捞强度建议调控. 经研究表明,杂色杜父鱼的起捕年龄最小应设定为 2~3 龄以上,开展渔业资源评估,严禁过度捕捞;强化渔政执法,严打非法捕捞,严格限定渔具规格,禁用违规渔具,打击违法捕捞行为,并规范垂钓活动;推进栖息地修复与水文连通性恢复,在水利工程影响河段,推动生态化改造,通过建设生态鱼道、恢复河道自然形态与底质结构,改善水流条件与栖息地异质性;在重点河段布设人工鱼巢与适宜粒径的砾石,提供稳定繁殖场所;通过有序实施增殖放流,实现杂色杜父鱼种群数量的回升. 建立专项增殖设施,生产优质苗种,保障放流后的高存活率. 通过以上栖息地保护、繁殖期管控、基于生长的捕捞限制及人工恢复相结合的综合管理策略,可在科学评估的基础上逐步实现杂色杜父鱼种群的资源恢复与可持续利用,也为我国类似小型溪流性鱼类的保护与管理提供参考.

4 结论

本文研究了辽宁省杂色杜父鱼的年龄结构及生长特征. 结果显示,辽宁省杂色杜父鱼雌鱼体长范围

为 52.0~121.5 mm,雌鱼优势体长范围为 70.0~79.0 mm,雄鱼体长范围为 54.5~136.0 mm,雄鱼优势体长范围为 80.0~89.0 mm;雌鱼个体体质量范围为 2.65~30.37 g,雄鱼个体体质量范围为 2.71~47.60 g,雌鱼与雄鱼优势体质量范围均为 5~9 g;年龄结构不复杂,优势年龄组 2~3 a,雌、雄鱼最高年龄均为 5 a;杂色杜父鱼属于生长速度较快的鱼类. 未来将进一步开展其最小性成熟年龄、食性分析及规模化人工繁殖等研究,以完善该物种的生活史资料,为资源保育、可持续管理及长效利用奠定更系统的科学基础.

[参考文献]

[1] 解玉浩. 东北地区淡水鱼类[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2007.

[2] 张觉民. 黑龙江省鱼类志[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1995.

[3] 黄胜君. 辽东花杜父鱼小水面养殖初探[J]. 科学养鱼,2007(1):20.

[4] Никольский Г В. Рыбы бассейна Амура[M]. Москва:Академии наук СССР,1956.

[5] 骆小年,赵兴文,段友健. 辽宁省淡水土著鱼类开发利用研究进展[J]. 大连海洋大学学报,2020,35(2):155-160.

[6] 尹邦一,代应贵,范家佑,等. 长脂拟鲿年龄与生长研究[J]. 水生态学杂志,2017,38(1):94-100.

[7] 段友健,张雯娟,骆小年,等. 内蒙古岗更湖瓦氏雅罗鱼年龄结构及生长特征[J]. 大连海洋大学学报,2022,37(1):140-147.

[8] 陈一竹,朱峰跃,刘明典,等. 怒江上游热裸裂尻鱼年龄结构与生长特性[J]. 水生态学杂志,2022,43(4):111-118.

[9] 廖传松,李为,苑晶,等. 三峡水库光泽黄颡鱼年龄、生长与死亡特征研究[J]. 水生生物学报,2022,46(1):29-36.

[10] Bakke T A, Paterson R A, Cable J. Alpine bullhead (*Cottus poecilopus* Heckel): a potential refuge for *Gyrodactylus salaris* Malmberg, 1957 (Monogenea).[J]. Folia Parasitologica, 2019, 66: 18.

[11] Winger C A, Hansen H, Bachmann L, et al. Gyrodactylus species (Monogenea) infecting alpine bullhead (*Cottus poecilopus* Heckel, 1837) in Norway and Slovakia, including the description of Gyrodactylus mariannae sp. nov.[J]. Acta Parasitologica, 2008, 53(3): 240-250.

[12] Vítek T, Halačka K, Bartoňová-Marešová E, et al. Identification of natural hybrids between *Cottus poecilopus*, Heckel, 1837, and *Cottus gobio*, Linnaeus, 1758, at a hybrid zone on the Svratka River (Czech Republic) [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2014, 30(1): 102-108.

[13] 霍堂斌,宋雪松,王振洋,等. 杂色杜父鱼生物学初步研究[J]. 水产学杂志,2015,28(3):16-20.

[14] 肖志国,王秀兰,康学会,等. 杂色杜父鱼驯化及规模化繁殖技术[J]. 河北渔业,2021(12):18-21.

[15] 闫春梅,高春山,陈伟强,等. 基于 AFLP 分子标记的杂色杜父鱼遗传多样性分析[J]. 水产科技情报,2022,49(4):206-211.

[16] 段友健,骆小年,韩牧轩,等. 辽宁鸭绿沙塘鳢年龄与生长的研究[J]. 水产科学,2025,44(3):484-489.

[17] Francis R I C C. Back-calculation of fish length: a critical review[J]. Journal of Fish Biology, 1990, 36(6): 883-902.

[18] Von Bertalanffy L. Quantitative laws in metabolism and growth[J]. The Quarterly Review of Biology, 1957, 32(3): 217-231.

[19] Von Bertalanffy L. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws.II) [J]. Human Biology, 1938, 10(2): 181-213.

[20] Urban H J. Modeling growth of different developmental stages in bivalves[J]. Marine Ecology Progress Series, 2002, 238: 109-114.

[21] Schwarz G. Estimating the dimension of a model[J]. Annals of Statistics, 1978, 6: 461-464.

[22] Bermejo S, Monegal B. Fish age analysis and classification withkernl methods[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(10): 1164-1171.

[23] 殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京:中国农业出版社,1995.

[24] 窦新杰,常玉梅,唐然,等. 瓦氏雅罗鱼群体基于 *CO* Ⅰ序列的遗传多样性分析[J]. 华北农学报,2014,29(增刊 1):29-34.

[25] 张学健,程家骅. 鱼类年龄鉴定研究概况[J]. 海洋渔业,2009,31(1):92-99.

[26] 段友健,骆小年,康漪,等. 辽东地区北方须鳅种群结构分析[J]. 水产科学,2024,43(5):817-821.

[27] 窦硕增. 鱼类的耳石信息分析及生活史重建:理论、方法与应用[J]. 海洋科学集刊,2007(1):93-113.

[28] 黄权,张东鸣,吴莉芳,等. 鸭绿江上游花羔红点鲑(*Salvelinus malma*)的食性分析及生态位[J]. 吉林农业大学学报,1999(4):55-58.

[29] 金洪宇,李雷,金星,等. 雅鲁藏布江下游墨脱江段黄斑褶鮡的年龄结构与生长特征[J]. 淡水渔业,2020,50(2):10-17.

[30] 刘成杰,张志明,马徐发,等. 新疆额尔齐斯河银鲫年龄鉴定比较与生长特征研究[J]. 水生态学杂志,2015,36(6):

51-58.
[31] 李军. 许氏平鲉(*sebastes schlegeli*)的年龄和生长及耳石图像识别系统的设计[D]. 青岛:中国海洋大学,2005.
[32] Campana S E. Accuracy,precision and quality control in age determination,including a review of the use and abuse of age validation methods[J]. Journal of Fish Biology,2001,59(2):197-242.
[33] 詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京:中国农业出版社,1995.
[34] 杜佳垠. 太平洋绒杜父鱼生态学特点与增养殖前景[J]. 北京水产,2006(5):12-15.
[35] 霍堂斌,王野,栗铁柱,等. 图们江黑龙江中杜父鱼生物学初步研究[J]. 水产学杂志,2016,29(5):1-6.
[36] 霍堂斌,蔡林刚,阿达可白克·可尔江,等. 阿尔泰杜父鱼生物学初步研究[J]. 淡水渔业,2011,41(1):16-21.
[37] Branstetter S. Age and growth estimates for blacktip, *Carcharhinus limbatus*, and spinner, *C. brevipinna*, sharks from the northwestern Gulf of Mexico[J]. Copeia,1987,4(9):964-974.
[38] Musick J A. Ecology and conservation of long-lived marine animals[J]. American Fisheries Society Symposium,1999,23:1-10.
[39] Hesthagen T,Hegge O,Skurdal J,et al. Age and growth of Siberian sculpin(*Cottus poecilopus*) and young brown trout(*Salmo trutta*)in a subalpine Norwegian river[J]. Hydrobiologia,2004,521(1/3):107-115.
[40] 王琼,李法云,范志平,等. 大伙房水库入库河流物理生境评价及其对水质状况的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(9):2850-2859.
[41] 韩洁,宋蒙蒙,张杰,等. 浑河流域大型底栖动物摄食功能群对栖息地环境的选择适应性[J]. 生态学报,2019,39(6):2013-2020.
[42] 殷旭旺,韩洁,王博涵,等. 太子河流域底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水产学杂志,2017,30(3):40-44.
[43] 姜永伟,丁振军,袁俊斌,等. 辽宁省主要河流底栖动物群落结构及水质评价研究[J]. 生态环境学报,2023,32(5):969-979.
[44] 刘其根,沈建忠,陈马康,等. 天然经济鱼类小型化问题的研究进展[J]. 上海水产大学学报,2005(1):79-83.
[45] 潘建军,周鹏. 赤石河流域水利工程对鱼类的影响分析[J]. 海河水利,2025(8):27-32.
[46] 韦宏军. 人类活动对山区溪流鱼类多样性的影响[J]. 安徽农学通报,2020,26(5):81-85.

[责任编辑:黄　敏]