

胚胎孵化环境影响秦岭细鳞鲑初孵仔鱼几何形态特征*

赵灵芝^{1,2}, 王丽英¹, 赵浩翔^{1,2}, 张宏³, 吴逊涛³, 夏继刚^{1,2}

(1. 重庆师范大学 鱼类生态与保护研究中心; 2. 重庆师范大学 进化生理与行为学实验室
动物生物学重庆市高校重点实验室 淡水鱼类资源保护与利用重庆市重点实验室, 重庆 401331;
3. 陕西太白山国家级自然保护区管理局, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究群落中不同物种环境化学信息对国家二级重点保护水生野生动物、中国特有种秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)胚胎发育的影响,以通过人工授精法获得的该鱼种受精卵为实验对象,设置了4个环境化学信息处理组:潜在捕食风险信息(predatory risk cues, PC)组、同伴胚胎化学预警信息(chemical alarm cues, CAC)组、潜在捕食风险信息与同伴胚胎化学预警信息(PC & CAC)组、新奇植物信息(non-common plant cues, N-PC)组,以及以溪流水进行处理的对照组,比较了各处理组初孵仔鱼的几何形态特征差异。结果显示:CAC组个体严重畸形,无正常个体孵化;与对照组相比,PC组、PC & CAC组和N-PC组体长均有统计学意义上的缩短($p < 0.05$),且PC & CAC组的相对头长、相对头高和相对眼径也有统计学意义上的减小($p < 0.05$);环境化学信息处理对相对卵黄囊体积和卵黄囊长宽比无统计学意义上的影响,各处理组的体长与卵黄囊体积均无统计学意义上的相关性。研究结果提示,秦岭细鳞鲑栖息地中的上述环境化学信息能对该鱼种的早期发育形态产生明显影响,其中同伴胚胎化学预警信息具有强烈的致畸效应,而潜在捕食风险信息和新奇植物信息也可能诱发胚胎产生以个体变小为代价的形态响应。

关键词:秦岭细鳞鲑; 胚胎; 初孵仔鱼; 形态特征; 化学通讯

中图分类号: Q175; S932.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2025)06-0045-09

秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)为鲑科(Salmonidae)细鳞鲑属(*Brachymystax*)鱼类,是国家二级重点保护水生野生动物、中国特有种,主要栖息于秦岭山涧溪流中,被视为秦岭溪流生态系统的顶级捕食者、重要的旗舰物种与环境指示种^[1-4]。野外调查发现:秦岭细鳞鲑的群落结构相对简单;拉氏鳊(*Phoxinus lagowskii*)是秦岭细鳞鲑的栖息地中最为常见的伴生鱼类,与之存在复杂的种间关系。尽管拉氏鳊通常被认为是秦岭细鳞鲑主要的猎物鱼^[5-6],但杂食性的拉氏鳊成体往往对处于生活史早期的秦岭细鳞鲑胚胎及初孵仔鱼造成较大的捕食威胁。这一种间相互作用不仅影响秦岭细鳞鲑早期资源的生存率,也可能对它的种群动态平衡产生深远影响^[7]。此外值得注意的是,秦岭细鳞鲑栖息地中下游区域也散见一定数量的蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)^[5],而栖息地上游的产卵场则罕有蒲公英分布。由此推测,蒲公英的存在与秦岭细鳞鲑对产卵场的选择以及胚胎发育可能存在负向关联,它可能是驱动秦岭细鳞鲑向中高海拔区域繁殖洄游的一个重要环境因素。然而,这一推测尚需进一步验证。

胚胎及初孵仔鱼阶段是鱼类生长发育的关键时期,两者的发育情况直接影响到后续的生长、繁殖乃至种群动态^[8-10]。在此期间,鱼类生理系统尚未发育完善,对外界环境变化的适应和抵抗能力较弱^[11]。研究发现:经过24~30℃的不同温度处理,棘颊雀鲷(*Premnas biaculeatus*)胚胎在30℃下的孵化时间最短,在26和28℃下的孵化率最高^[12];斑马鱼(*Danio rerio*)胚胎暴露于缺氧环境时,发育过程明显延迟,并且缺氧条件下胚胎尾部的发育速度快于头部,导致畸形率明显上升^[13]。由此可见,发育环境直接影响了胚胎发育进程与孵化表现^[14]。然而,与物理环境因素相比,鱼类胚胎对环境化学信息(尤其是栖息地生态相关的不同生物信息)应答的研究较为少见。

信息素是鱼类生存环境中重要的化学信号,在种内和种间信息传递中发挥着关键作用,特别是在早期发育

* 收稿日期:2025-09-25 修回日期:2025-11-07 网络出版时间:2026-01-22T18:40

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 32470511);重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(No. CSTB2024NSCQ-LZX0061)

第一作者简介:赵灵芝,女,研究方向为水生生物学, E-mail: 1723870780@qq.com; 通信作者简介:夏继刚,男,教授,博士生导师, E-mail: jiangxia@163.com

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260122.1719.004>

阶段对个体的发育轨迹和生存策略具有明显的影响^[15]。信息素通过水体传播,可有效诱导鱼类在行为、生理和形态上发生一系列反应^[16]。已有研究表明,鱼类在早期发育阶段可通过感知周围环境中各类动、植物的化学信息来响应环境变化^[17-20]。例如,辣木(*Moringa oleifera*)叶甲醇提取物能引起斑马鱼胚胎尾部弯曲和卵黄囊肿^[21];荆芥叶狮耳花(*Leonotis nepetifolia*)提取物可导致斑马鱼胚胎孵化延迟^[22]。此外,斑马鱼胚胎还被证实能够响应同种胚胎释放的化学预警信息而提前孵化——这被看作是一种适应性策略,使胚胎在面临捕食威胁时有可能尽早脱离高风险环境^[23]。然而,过早孵化的仔鱼往往体型较小、各项生理功能发育不完善,使得它们在后续生长过程中可能面临更高的生存风险。因此,探究胚胎如何对群落不同环境化学信息作出应答是一个值得探究的科学问题。

基于上述背景,本研究以通过人工授精法获得的秦岭细鳞鲑受精卵为实验对象,探究了不同环境化学信息处理下初孵仔鱼的几何形态特征,旨在为秦岭细鳞鲑的栖息地保护以及人工繁育提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 实验胚胎获取

秦岭细鳞鲑亲鱼来自人工繁育基地的室外生态池,为基地长期建立的人工种群。于 2024 年 3 月底至 4 月中旬在秦岭细鳞鲑种群的繁殖窗口期随机选取体质健康、性腺发育良好的 3~4 龄雌鱼,称量体质量后采用一针注射进行催产,注射部位为胸鳍下 1 cm 处。注射的催产药物为绒毛膜促性腺激素(HCG)和促黄体激素释放激素类似物(LHRH-A3)的混合物,用药剂量为每 1 kg 鱼体质量注射 HCG 1 000 IU、LHRH-A3 10 μg 。将注射了催产药物的雌鱼转移至基地内的流水养殖水槽中(直径 2 m、水深 0.35 m)暂养 48 h,在此期间以来自实验鱼自然栖息地并经充分沉淀过滤的山涧溪流水作为饲养水体,水温为(8 \pm 0.2) $^{\circ}\text{C}$,溶解氧质量浓度大于 8.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,光照周期为 12 h 光照:12 h 黑暗。暂养结束后采用干法人工授精^[24],轻压亲鱼腹部收集卵子和精液。为减少亲本个体差异的潜在效应,将来自 3 尾雌鱼的卵和 1 尾雄鱼的精液混合并用羽毛进行搅拌,使精液与卵子充分混匀,再迅速倒入少量溪流水搅拌 30 s,使鱼卵充分受精。之后,用羽毛挑去杂质,更换溪流水并重复数次,直至将受精卵冲洗干净。

1.2 实验设计

将收集到的秦岭细鳞鲑受精卵置于孵化槽中使用溪流水(采用微水流模式,流量为 106 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$)培养 24 h,之后再分别转移至装有不同环境化学信息液的培养皿中进行孵化。基于秦岭细鳞鲑群落结构状况设置了以下 4 个环境化学信息处理组:潜在捕食风险信息(predatory risk cues, PC)组、同伴胚胎化学预警信息(chemical alarm cues, CAC)组、潜在捕食风险信息与同伴胚胎化学预警信息(PC & CAC)组和新奇植物信息(non-common plant cues, N-PC)组。各处理组均设置 24 个培养皿,培养皿直径为 4.6 cm,将单个培养皿中放入 10 枚胚胎并加入 100 mL 相应的环境化学信息液进行处理。孵化期间水温、溶解氧质量浓度、光周期等环境条件与亲鱼饲养时的水体环境条件一致,且每隔 24 h 更换培养皿中 50% 体积的环境化学信息液。另设置 1 个对照组,处理方式同上,仅将环境化学信息液换成溪流水。

1.3 环境化学信息液制备

1.3.1 新奇植物信息液制备

在人工繁育基地的室外生态池旁随机采集生长正常、健康无病虫害的蒲公英,使用剪刀切断埋于泥土中的根茎,保证地上部分的完整性。将蒲公英地上部分去除泥土杂质后首先测定质量,然后依据预备实验结果将蒲公英与溪流水按 1 g:100 mL 的比例采用浸泡法^[25]处理 24 h,制得新奇植物信息液。

1.3.2 潜在捕食风险信息液制备

在人工繁育基地随机选取健康状态良好的成体拉氏鲮并称量它们的体质量,然后将拉氏鲮与溪流水按照 1 g:500 mL 的比例^[26]进行浸泡处理。为了使捕食风险信息采集标准化,首先将拉氏鲮浸泡 24 h,消除拉氏鲮排泄物信息对后续实验的影响;然后再将拉氏鲮转移至溪流水(体积与第 1 次浸泡时间相同)中再次浸泡 24 h;浸泡期间对拉氏鲮进行禁食处理,最终收集第 2 次浸泡液作为潜在捕食风险信息液。

1.3.3 同伴胚胎化学预警信息液制备

选择与 CAC 组胚胎来源相同且处于相同发育阶段的胚胎,按照 1 枚胚胎加入 50 mL 溪流水的比例将两者混合后研磨并过滤,取滤液作为同伴胚胎化学预警信息液^[25]。

1.3.4 潜在捕食风险与同伴胚胎化学预警信息混合液制备

将潜在捕食风险信息液与同伴胚胎化学预警信息液按照 1:1 的体积比进行混合,制成含有上述 2 种环境化学信息的混合液。

1.4 初孵仔鱼几何形态特征测量

收集 4 个环境化学信息处理组和对照组处于孵化后 2 h 内的初孵仔鱼,用吸管将初孵仔鱼转移至直径为 3.5 cm 的细胞培养皿中,随即将细胞培养皿放置于带有刻度尺的蓝色背景板上,用显微镜观察初孵仔鱼形态,并拍摄照片和录像。使用 TpsDig 软件对拍摄照片中每尾初孵仔鱼的形态学特征点进行标记(图 1)。测量的主要形态体征参数包括体长、头长、头高、眼径、卵黄囊长度和卵黄囊宽度(单位均为 mm),并计算卵黄囊体积和卵黄囊长宽比,计算公式如下^[27]:

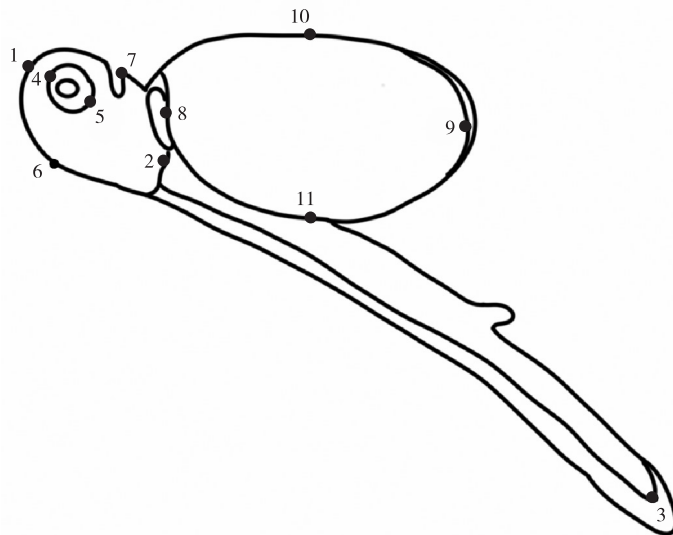
$$V = \frac{\pi LH^2}{6}, R = \frac{L}{H},$$

其中: L 为卵黄囊长度, H 为卵黄囊宽度, V 为卵黄囊体积(单位: mm^3), R 为卵黄囊长宽比。

为减小初孵仔鱼体长对头长、头高、眼径和卵黄囊体积的影响,用以下公式对体型参数进行校正^[28]:

$$Y = \frac{\lg A'}{\lg A},$$

其中: A' 为参数的实测值, A 为体长的实测值, Y 为参数的校正值。校正后的 4 个参数分别称为相对头长、相对头高、相对眼径和相对卵黄囊体积。



注:体长为 1,3 点间距离,头长为 1,2 点间距离,眼径为 4,5 点间距离,头高为 6,7 点间距离,卵黄囊长度为 8,9 点间距离,卵黄囊宽度为 10,11 点间距离。

图 1 秦岭细鳞鲑初孵仔鱼几何形态学测量特征点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of feature points for geometric morphometry of newly hatched *B. tsinlingensis* larvae

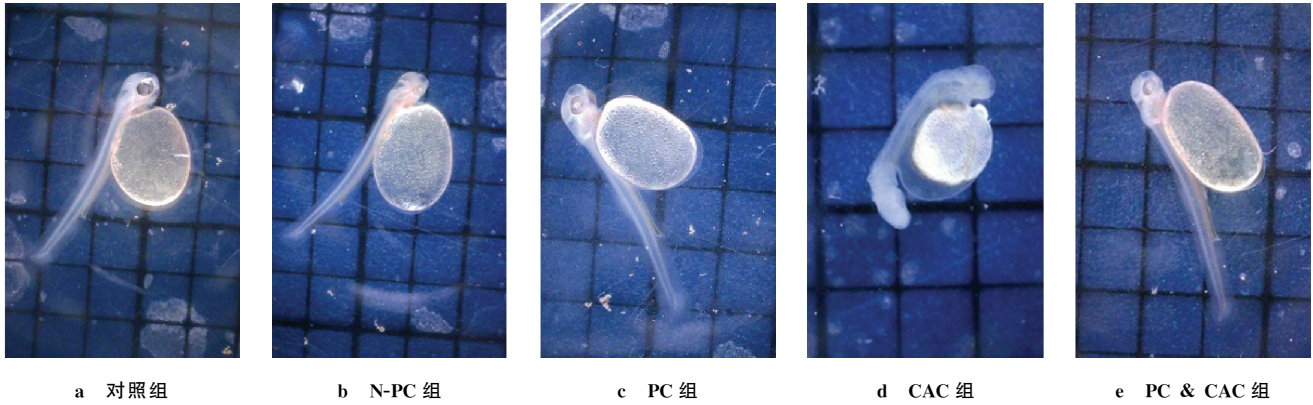
1.5 数据分析

由 TpsDig 软件所获得的特征点坐标数据经 Excel 2010 软件计算得到初孵仔鱼形态参数,以“平均值±标准误”形式表示。使用 SPSS 19.0 软件对不同处理组形态参数的差异进行统计学分析:如数据符合正态分布且方差具有齐性,进行单因素方差分析并用 Tukey 法进行多重比较;如数据不符合正态分布或方差不具齐性,采用非参数检验(Kruskal-Wallis 法)。当 $p < 0.05$ 时,统计学分析结果具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 不同孵化环境下初孵仔鱼的外观形态差异

由图 2 可见:不同孵化环境下秦岭细鳞鲑初孵仔鱼的外观形态差异明显,特别是 CAC 组个体严重畸形,且在该组中未发现有正常孵出个体。因此,CAC 组不再进行后续的几何形态特征比较。



注: N-PC、PC 和 CAC 分别指新奇植物信息、潜在捕食风险信息 and 同伴胚胎化学预警信息, 下同。

图 2 不同孵化环境下秦岭细鳞鲑初孵仔鱼的形态示例

Fig. 2 Instanced morphological characteristics of newly hatched *B. tsinlingensis* larvae under different incubation environments

2.2 环境化学信息对初孵仔鱼几何形态特征的影响

表 1 显示, 环境化学信息对秦岭细鳞鲑初孵仔鱼体长、相对头长、相对头高、相对眼径均有统计学意义上的影响 ($p < 0.05$)。如图 3a~d 所示, 与对照组相比, 不同环境化学信息处理均导致初孵仔鱼的体长有统计学意义上的缩短 ($p < 0.05$), 并导致相对头长、相对头高和相对眼径均有减小的趋势, 特别是 PC & CAC 组的相对头长、相对头高和相对眼径与 PC 组和对照组相比均有统计学意义上的减小 ($p < 0.05$)。而结合表 1 和图 3e、f 可知, 不同环境化学信息处理对秦岭细鳞鲑初孵仔鱼的相对卵黄囊体积和卵黄囊长宽比没有统计学意义上的影响。

表 1 环境化学信息对秦岭细鳞鲑初孵仔鱼几何形态特征影响的统计分析结果

Tab. 1 The statistic analysis of environmental chemical cue effects on geometric morphological characters of newly hatched *B. tsinlingensis* larvae

参数	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>p</i>	参数	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>p</i>
体长	5.996		0.001	相对眼径	10.784		<0.001
相对头长	2.195		<0.001	相对卵黄囊体积		6.354	0.096
相对头高		28.263	<0.001	卵黄囊长宽比		4.972	0.174

注: 根据正态性和方差齐性检验结果, 环境化学信息对秦岭细鳞鲑初孵仔鱼体长、相对头长和相对眼径的影响采用单因素方差分析进行考察, 对相对头高、相对卵黄囊体积和卵黄囊长宽比的影响采用非参数检验 (Kruskal-Wallis 法) 进行分析。

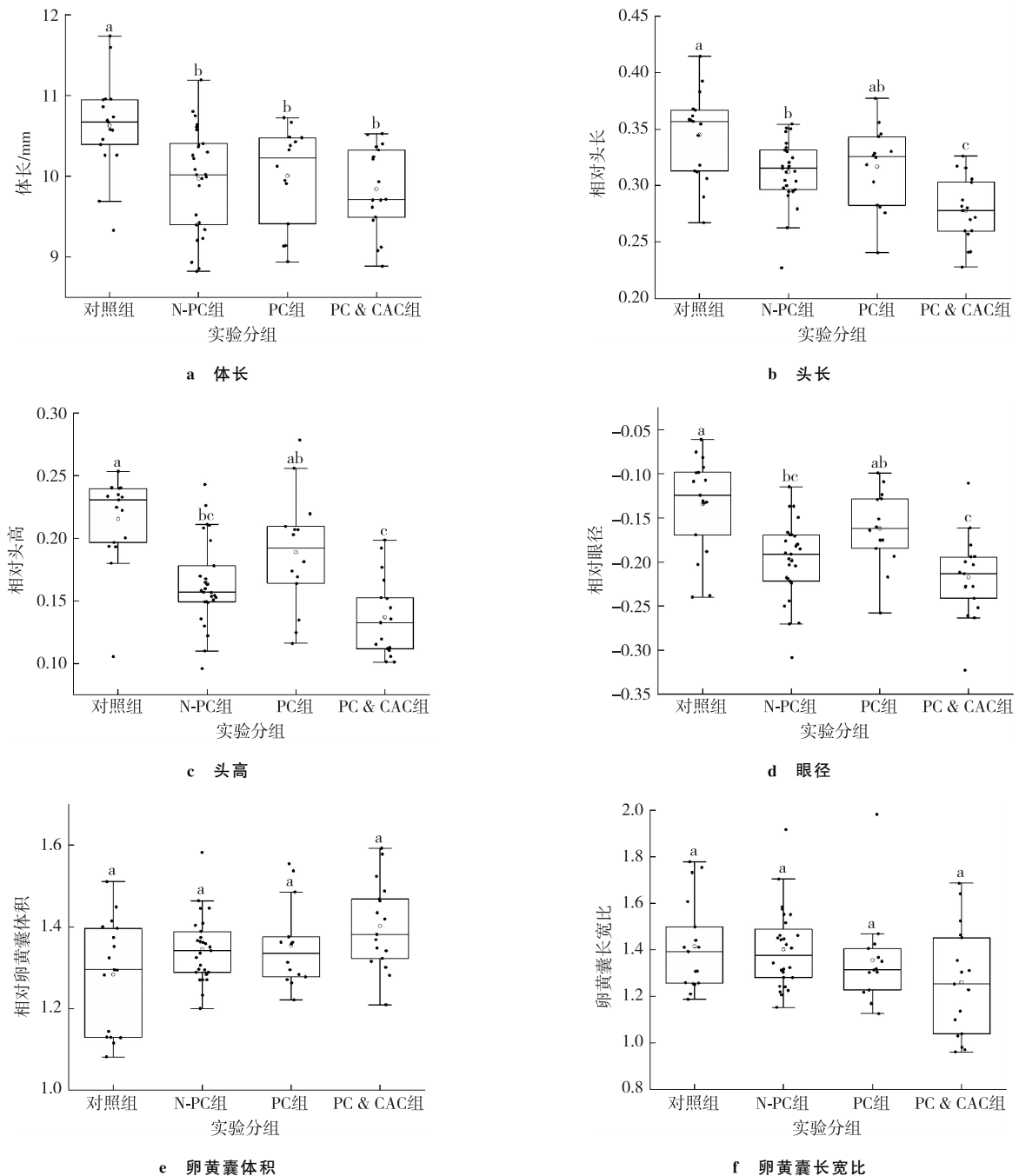
进一步分析发现, 环境化学信息对初孵仔鱼体长和相对卵黄囊体积的影响呈相反趋势 (图 3a、e), 即随着初孵仔鱼体长缩短, 卵黄囊体积则有增大的趋势。据此进一步分析了不同孵化环境下秦岭细鳞鲑初孵仔鱼体长与卵黄囊体积的相关性, 回归分析结果显示不同处理组中这 2 个参数均无统计学意义上的相关性 (图 4)。

3 讨论

产卵场环境对鲑科鱼类的繁殖与生长发育至关重要, 鲑科鱼类通常需要经历长距离洄游来完成产卵场选择^[29]。在本研究中, 产卵场环境化学信息对秦岭细鳞鲑初孵仔鱼的体长、相对头长、相对头高、相对眼径等几何形态特征有明显影响, 尤其是同伴胚胎化学预警信息处理导致初孵仔鱼孵化率明显降低且身体严重畸形, 未出现正常的孵化个体。

胚胎和早期仔鱼发育涵盖细胞分化、形态发生、胚胎组织间相互作用等过程。在这些过程中, 除了基因表达起着决定性作用之外, 内外部环境因素的影响也不可忽视^[30]。研究表明, 水生动物胚胎能够通过提前加速或延迟孵化以适应外部压力源^[31]。然而, 用于胚胎孵化的能量成本往往是固定的, 一个性状的改变可能是与其他性状发育进行交换的结果^[32]。例如, 温度升高促使点纹斑竹鲨 (*Chiloscyllium punctatum*) 胚胎快速生长发育, 但却导致孵化后仔鱼的体质状况和存活率下降^[33]; 当大底鲮 (*Fundulus grandis*) 胚胎培养水体盐度为 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 仔鱼的平均孵化时间和体长均比水体盐度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时更长^[34]; 在褐鳟 (*Salmo trutta*) 胚胎发育过程中, 暴露于有毒化合物异硫氰酸苯乙酯的胚胎孵化过程明显延迟, 并且初孵仔鱼的体长明显缩短, 体质量明显下

降^[35]。此外,动物个体在胚胎阶段能够通过化学感觉线索感知周围环境的信息^[36-37],环境中的捕食线索可促使胚胎产生形态和行为反应^[18]。Wisenden 等人^[23]发现,同伴胚胎化学预警信息虽然能够明显影响斑马鱼仔鱼的形态发育,但对它们的存活率无明显影响;Kusch 等人^[38]则发现,当黑头鲈鱼(*Pimephales promelas*)胚胎暴露于以该鱼种胚胎为食的虾类 *Orconectes virilis* 所产生的气味中时,孵化后的初孵仔鱼体长更短。与上述研究结果相似,本研究中 PC 组以及 PC & CAC 组的体长明显短于对照组,证明暴露于捕食线索下的秦岭细鳞鲑胚胎确实产生了形态响应。CAC 组未出现正常孵化的个体,这与 Wisenden 等人^[23]的研究结果不同,其中原因可能与同伴胚胎化学预警信息液配制时胚胎数量与溪流水体积的比例有关。在未来研究中有必要进一步探究不同配制比例的同伴胚胎化学预警信息对秦岭细鳞鲑胚胎发育的生态学效应。



注:对照组、N-PC组、PC组和PC & CAC组的样本量分别为 17、27、14 和 17;不同上标字母表示不同处理间数据差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

图 3 环境化学信息对秦岭细鳞鲑初孵仔鱼几何形态特征的影响

Fig. 3 Effects of environmental chemical cues on morphological characters of newly hatched *B. tsinlingensis* larvae

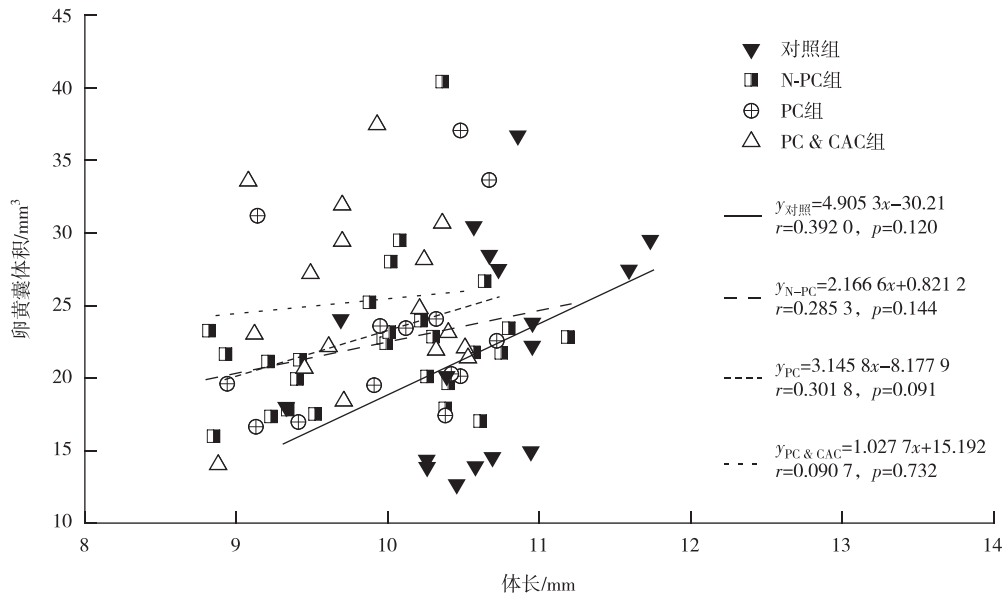


图 4 秦岭细鳞鲑初孵仔鱼体长与卵黄囊体积的相关性

Fig. 4 Correlations between body length and yolk sac volume in newly hatched *B. tsinlingensis* larvae under different incubation environments

异速生长是胚胎早期发育的一个共同特征,它能够确保行使主要功能的最重要器官优先发育,而生存优先级较低的器官发育则相对延后^[39]。头部在早期发育阶段具有发育优先权,这是因为头部不仅与鳃呼吸、外源性营养获取等重要功能相关^[39],还与神经和感觉系统的分化及发育有关^[40-41]。Eagderi 等人^[42]以及 Kupren 等人^[43]的研究均发现,鱼类胚胎在感知到环境压力时往往会通过异速生长来优先发育头部、眼部等重要器官。与上述研究结果不同的是,本研究中 PC & CAC 组的相对头长、相对头高和相对眼径均明显比对照组更短,而 PC 组和对照组的这 3 个参数则无明显差异,提示在这些器官发育过程中潜在捕食风险信息可能并不是一种高风险信息。此外,新奇植物信息处理导致秦岭细鳞鲑初孵仔鱼体长明显缩短,在对初孵仔鱼多个几何形态特征的影响上几乎和潜在捕食风险信息处理一致。推测蒲公英中存在某种特殊物质,对秦岭细鳞鲑胚胎发育有着负面影响,但具体机理机制有待于进一步探究。

卵黄囊是初孵仔鱼内源性营养的核心重要来源,卵黄囊体积大小与初孵仔鱼的生长发育直接相关。Kamler 等人^[44]发现,卵黄囊体积大小在鱼类早期发育过程中相对稳定,主要受遗传因素控制,但环境因素是否或如何影响卵黄囊的形态和体积尚待验证。本研究中,相对卵黄囊体积以及卵黄囊长宽比在不同环境化学信息处理组间无明显差异,并且卵黄囊体积与初孵仔鱼体长无统计学意义上的相关性,该结果总体上与上述已有研究结果相似。卵黄囊体积大小的相对稳定性表明,早期发育阶段胚胎和初孵仔鱼在面对群落不同环境化学信息时,可能通过能量储备的供给稳定来优先支持整体器官的发育。

参考文献:

- [1] XIA J G, PENG M R, HUANG Y, et al. Acute warming in winter eliminates chemical alarm responses in threatened Qinling lenok *Brachymystax lenok tsinlingensis*[J]. Science of the Total Environment, 2021, 764: 142807.
- [2] XIA J G, MA Y J, FU C, et al. Effects of temperature acclimation on the critical thermal limits and swimming performance of *Brachymystax lenok tsinlingensis*: a threatened fish in Qinling Mountain region of China[J]. Ecological Research, 2017, 32(1): 61-70.
- [3] 吴奇, 王洪, 王丽英, 等. 秦岭细鳞鲑与拉氏鲃代谢特征及游泳能力的比较[J]. 水生生物学报, 2025, 49(7): 31-38.
WU Q, WANG H, WANG L Y, et al. Comparative study of metabolic characteristics and swimming performance between *Brachymystax tsinlingensis* and *Phoxinus lagowskii*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025, 49(7): 31-38.
- [4] 夏继刚, 彭姜岚, 付世建. 秦岭细鳞鲑幼鱼对升温胁迫的行为响应[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 32-35.
XIA J G, PENG J L, FU S J. The behavioral response of juvenile *Brachymystax lenok tsinlingensis* to heating stress[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2017, 34(2): 32-35.

- [5] 陶渝镇,王丽英,黄青峰,等. 秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布模式及其栖息地环境特征[J]. 水生生物学报,2024,48(10):1716-1723.
TAO Y Z,WANG L Y,HUANG Q F,et al. Distribution patterns and habitat environmental characteristics of *Brachymystax tsinlingensis* larval fish[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2024,48(10):1716-1723.
- [6] 黄青峰,邓楚可,夏静怡,等. 秦岭细鳞鲑与同域物种拉氏鱈几何形态学特征:生活史阶段效应及种间差异[J]. 生态学杂志,2024,43(4):922-929.
HUANG Q F,DENG C K,XIA J Y,et al. Geometric morphology of *Brachymystax tsinlingensis* and sympatric *Phoxinus lagowskii*: life-history stage effects and interspecific differences[J]. Chinese Journal of Ecology,2024,43(4):922-929.
- [7] 邓楚可,黄青峰,李平,等. 不同生活史阶段秦岭细鳞鲑与同域物种拉氏鱈爆发游泳能力比较研究[J]. 生态学报,2024,44(9):3999-4008.
DENG C K,HUANG Q F,LI P,et al. Comparative studies on burst swimming performance of *Brachymystax tsinlingensis* and sympatric *Phoxinus lagowskii* in different life history stages[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(9):3999-4008.
- [8] 郑雪丽,黄艳,付世建,等. 胚胎孵化温度和初孵仔鱼发育温度对斑马鱼仔鱼热适应性的影响[J]. 生态学杂志,2022,41(10):1962-1968.
ZHENG X L,HUANG Y,FU S J,et al. Effects of embryonic and newly hatched larval development temperatures on thermal adaptability of zebrafish larvae[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(10):1962-1968.
- [9] MARENTETTE J R,SULLIVAN C A,LAVALLE C,et al. Effects of multi-well plate incubation on embryo-larval development in the fathead minnow (*Pimephales promelas*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology,2015,167:173-182.
- [10] LIM M Y,MANZON R G,SOMERS C M,et al. The effects of fluctuating temperature regimes on the embryonic development of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology,2017,241:19-29.
- [11] RIDDLE M R,HU C K. Fish models for investigating nutritional regulation of embryonic development[J]. Developmental Biology,2021,476:101-111.
- [12] 王珊珊. 环境因子对棘颊雀鲷的产卵及胚胎发育的影响[D]. 舟山:浙江海洋学院,2015.
WANG S S. The impact of environmental factors on *Premnas biaculeatus* spawning and embryonic development [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University,2015.
- [13] SHANG E H H,WU R S S. Aquatic hypoxia is a teratogen and affects fish embryonic development[J]. Environmental Science & Technology,2004,38(18):4763-4767.
- [14] 郑雪丽,付世建,夏继刚. 亲本繁殖和胚胎孵化温度对斑马鱼孵化表现的影响[J]. 生态学杂志,2022,41(5):979-984.
ZHENG X L,FU S J,XIA J G. Effects of temperature in parental reproduction and embryo incubation on hatching performance of zebrafish[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(5):979-984.
- [15] BOWERS J M,LI C Y,PARKER C G,et al. Pheromone perception in fish: mechanisms and modulation by internal status[J]. Integrative and Comparative Biology,2023,63(2):407-427.
- [16] SHARMA M. Behavioural responses in effect to chemical stress in fish: a review[J]. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies,2019,7(1):1-5.
- [17] HORN M E,CHIVERS D P. Embryonic exposure to predation risk and hatch time variation in fathead minnows[J]. PLoS One,2021,16(8):e0255961.
- [18] OULTON L J,HAVILAND V,BROWN C. Predator recognition in rainbowfish, *Melanotaenia duboulayi*, embryos[J]. PLoS One,2013,8(10):e76061.
- [19] WARKENTIN K M. Plasticity of hatching in amphibians: evolution, trade-offs, cues and mechanisms[J]. Integrative and Comparative Biology,2011,51(1):111-127.
- [20] RESTU A,KUSUMANINGTYAS A,WIDATAMA D,et al. The effects of the plant extract on embryonic development of zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Tropical Genetics,2021,1(1):6-11.
- [21] MOHAMAD SHARIFF N F S,SINGGAMPALAM T,NG C H,et al. Antioxidant activity and zebrafish teratogenicity of hydroalcoholic *Moringa oleifera* L. leaf extracts[J]. British Food Journal,2020,122(10):3129-3137.
- [22] ADOLPHO L,PORTALANZA D,AMES J,et al. Comprehensive analysis of *Leonotis nepetifolia* flower extracts: phytochemical composition and toxicity in zebrafish embryos[EB/OL]. (2025-01-29)[2025-09-25]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786419.2025.2457123>
- [23] WISENDEN B D,PAULSON D C,ORR M. Zebrafish embryos hatch early in response to chemical and mechanical indicators of

- predation risk, resulting in underdeveloped swimming ability of hatchling larvae[J]. *Biology Open*, 2022, 11(12): bio059229.
- [24] 李海珠, 刘良兴, 刘兴隆, 等. 中国大鲵人工授精方法的效果比较[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(11): 128-129.
LI H Z, LIU L X, LIU X L, et al. Compared study on artificial insemination methods of *Andrias davidianus* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(11): 128-129.
- [25] 张宁, 夏继刚. 不同生活史阶段高体鲮化学预警通讯及其环境依赖性[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(10): 1303-1310.
ZHANG N, XIA J G. Chemical alarm communication and its environmental dependency in *Rhodeus ocellatus* during different life history stages[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(10): 1303-1310.
- [26] 李秦蕾. 繁殖模式不同的两种淡水鱼胚胎对环境化学信息的识别研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2023.
LI Q L. Study on embryo recognition to chemical cues of two freshwater fish with different reproductive models [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2023.
- [27] JENSEN L F, HANSEN M M, PERTOLDI C, et al. Local adaptation in brown trout early life-history traits; implications for climate change adaptability[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2008, 275(1653): 2859-2868.
- [28] 夏静怡, 郑雪丽, 李平, 等. 秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)与细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)当年幼鱼几何形态学特征的比较[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(4): 905-910.
XIA J Y, ZHENG X L, LI P, et al. A comparative study on geometric morphology between current-year juvenile *Brachymystax tsinlingensis* and *Brachymystax lenok* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(4): 905-910.
- [29] 庄平, 赵峰, 罗刚, 等. 水生生物资源增殖放流的发展历程与问题思考[J]. *水生生物学报*, 2025, 49(1): 43-54.
ZHUANG P, ZHAO F, LUO G, et al. Progress and problem on the stock enhancement of aquatic biological resources [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(1): 43-54.
- [30] 施兆鸿, 夏连军, 王建钢, 等. 盐度对黄鲈胚胎发育及早期仔鱼生长的影响[J]. *水产学报*, 2004, 28(5): 599-602.
SHI Z H, XIA L J, WANG J G, et al. Effect of salinity on embryonic development and larval growth of *Dentex tumifrons* Temminck et Schlegel [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(5): 599-602.
- [31] COWAN Z L, GREEN L, CLARK T D, et al. Global change and premature hatching of aquatic embryos [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(9): e17488.
- [32] WEST-EBERHARD M J. *Developmental plasticity and evolution* [M]. New York: Oxford University Press, 2003.
- [33] ROSA R, BAPTISTA M, LOPES V M, et al. Early-life exposure to climate change impairs tropical shark survival [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2014, 281(1793): 20141738.
- [34] BROWN C A, GOTHREAUX C T, GREEN C C. Effects of temperature and salinity during incubation on hatching and yolk utilization of Gulf killifish *Fundulus grandis* embryos [J]. *Aquaculture*, 2011, 315(3/4): 335-339.
- [35] WHITE A B, PERNETTA A P, JOYCE C B, et al. Increased mortality, delayed hatching, development aberrations and reduced activity in brown trout (*Salmo trutta*) exposed to phenethyl isothiocyanate [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(11): 231.
- [36] MATHIS A, FERRARI M C O, WINDEL N, et al. Learning by embryos and the ghost of predation future [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2008, 275(1651): 2603-2607.
- [37] GARCIA T S, URBINA J C, BREDEWEG E M, et al. Embryonic learning and developmental carry-over effects in an invasive anuran [J]. *Oecologia*, 2017, 184(3): 623-631.
- [38] KUSCH R C, CHIVERS D P. The effects of crayfish predation on phenotypic and life-history variation in fathead minnows [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2004, 82(6): 917-921.
- [39] GIBBERT E, RODRIGUEZ A, CASTELLÓ-ORVAY F, et al. A histological study of the development of the digestive tract of Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*) during early ontogeny [J]. *Aquaculture*, 1998, 167(3/4): 195-209.
- [40] FUIMAN L A. Growth gradients in fish larvae [J]. *Journal of Fish Biology*, 1983, 23(1): 117-123.
- [41] KOUMOUNDOUROS G, DIVANACH P, ANEZAKI L, et al. Temperature-induced ontogenetic plasticity in sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. *Marine Biology*, 2001, 139(5): 817-830.
- [42] EAGDERI S, MOSHAYEDI F, MOUSAVI-SABET H. Allometric growth pattern and morphological changes of *Pterophyllum scalare* (Schultze, 1823) during the early development [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 2017, 41(4): 965-970.
- [43] KUPREN K, TRĄBSKA I, ŻARSKI D, et al. Early development and allometric growth patterns in burbot *Lota lota* L. [J]. *Aquaculture International*, 2014, 22(1): 29-39.
- [44] KAMLER E. Ontogeny of yolk-feeding fish: an ecological perspective [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2002, 12(1): 79-103.

Animal Sciences

Embryonic Incubation Environment Affects the Geometric Morphological Characteristics of Newly Hatched *Brachymystax tsinlingensis* LarvaeZHAO Lingzhi^{1,2}, WANG Liying¹, ZHAO Haoxiang^{1,2}, ZHANG Hong³, WU Xuntao³, XIA Jigang^{1,2}

(1. Fish Ecology and Conservation Research Center, Chongqing Normal University;

2. Chongqing Key Laboratory of Conservation and Utilization of Freshwater Fishes, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

3. Shaanxi Taibaishan National Nature Reserve Administration, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: The *Brachymystax tsinlingensis*, a nationally protected aquatic wild animal in China, is an endangered fish species endemic to Qinling Mountains region. It is highly susceptible to environmental factors in field habitats during early developmental stages. To investigate the effects of chemical cues from different species within the community on the embryonic development of *B. tsinlingensis*, artificially fertilized eggs were used as experimental subjects. Four experimental treatments were established: potential predatory risk cues (PC), chemical alarm cues from conspecific embryos (CAC), a combination of potential predatory risk cues and chemical alarm cues (PC & CAC) and non-common plant cues (N-PC), with stream water as the control group. The geometric morphological characteristics of newly hatched larvae under these experimental treatments were then examined. The results revealed that the CAC treatment resulted in severe embryonic malformations with no normal individuals hatching. Compared to the control group, the PC, PC & CAC, and N-PC treatments all significantly reduced the body length of newly hatched larvae ($p < 0.05$). Additionally, the PC & CAC treatment led to reductions in relative head length, relative head height, and relative eye diameter ($p < 0.05$). However, the environmental chemical cues had no significant effect on relative yolk sac volume or yolk sac aspect ratio, and no statistically correlation was observed between body length and yolk sac volume across any treatment group. These results indicate that chemical cues in field habitat can significantly influence the early developmental morphology of *B. tsinlingensis*. Specifically, CAC, representing high-risk information, exerted strong teratogenic effects, while PC and N-PC induced morphological responses in embryos characterized by reduced body size. The findings offer insights and guidance for the artificial breeding and habitat conservation of *B. tsinlingensis*.

Keywords: *Brachymystax tsinlingensis*; embryo; newly hatched larvae; morphological characteristics; chemical communication

(责任编辑 方 兴)