

doi: 10.7541/2024.2023.0428

秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布模式及其栖息地环境特征

陶渝镇^{1,2} 王丽英^{1,2} 黄青峰^{1,2} 邓楚可^{1,2} 陈凡刚³ 夏继刚^{1,2}

(1. 重庆师范大学鱼类生态与保护研究中心, 重庆 401331; 2. 重庆师范大学生命科学学院进化生理与行为学实验室, 淡水鱼类资源保护与利用重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3. 四川律贝生物科技有限公司, 成都 610000)

摘要: 为揭示秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)仔稚鱼分布模式及其环境驱动因子, 从而推测产卵场并为该物种早期资源保护提供研究基础。研究选取陕西陇县秦岭细鳞鲑国家级自然保护区内蒲峪河及其支流木拉石沟河作为研究样地, 并设定100个样点(2 m×2 m)作为详细抽样调查生境。研究发现: (1)分布在支流的仔稚鱼数量显著多于干流($P<0.05$); (2)仔稚鱼种群数量随海拔变化呈先增后降的趋势, 在干流与支流的最适分布海拔分别是1460和1446 m; (3)仔稚鱼分布的环境驱动因子在干流与支流不尽相同, 干流仔稚鱼数量与流速和青苔数量显著负相关($P<0.05$)、与石蛾幼虫数量显著正相关($P<0.05$), 支流仔稚鱼数量与流速显著负相关($P<0.05$)、与蝌蚪和石蛾幼虫数量显著正相关($P<0.05$)。研究揭示了秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布模式及其栖息地环境特征, 并构建了栖息地各类环境驱动因子关系网络热图。研究结果可为秦岭细鳞鲑仔稚鱼种群调研与监测、栖息地适宜性评估、保护及生态修复提供必要且亟需的科学依据。

关键词: 仔稚鱼分布模式; 海拔; 底质; 产卵场; 秦岭细鳞鲑

中图分类号: S932.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)10-1716-08



鱼类早期生活史阶段对栖息地环境敏感性高、易损风险大, 但对鱼类种群数量补充具有最直接的影响^[1-3]。鱼类早期资源调查聚焦于揭示鱼类胚胎与仔稚鱼阶段的时空分布模式及其栖息地环境特征, 研究结果对渔业资源保护与管理具有重要的指导意义^[4], 并且鱼类早期资源调查还具有样本量大、对资源破坏小、采样简单、费用较低等优势, 使其成为鱼类种群丰度评估研究的核心内容^[5]。由于野外调研中胚胎不易被发现、识别及鉴定, 仔稚鱼作为处于早期生活史阶段的鱼类资源便成为渔业资源调查中最为重要的对象之一。一方面, 仔稚鱼资源量反映了鱼类的繁殖规模和群体变动趋势, 是引起种群数量变动和年龄结构变化的主要原因; 另一方面, 仔稚鱼自主游泳能力弱且较易被观察记录, 其种群分布模式又体现了自然水域鱼类繁

殖状况及早期生活史阶段栖息地(产卵场/育幼场)环境特征与生境适宜性^[6]。

鱼类种群分布受外部多种控制因素的影响, 亦称环境控制, 被认为是影响鱼类种群分布的主要因素^[7]。鲑科鱼类分布于北半球寒冷的气候域, 具有较强的冷水性特征。除气候条件外, 其种群分布还受到多种环境因子包括生物因素(底栖动物、浮游生物、水生植物等)和非生物因素(海拔、流速、溶氧、底质类型等)的影响^[8,9]。阐明物种种群分布模式及其栖息地环境驱动因子并建立科学有效的种群调研方法是开展珍稀濒危鱼类保护和渔业资源评估的基础与前提。目前针对鱼类资源的调查方法主要有网捞(捕)法^[10]、eDNA法^[11]、水声学调查法^[12]等。但相关研究方法在应用于早期渔业资源开展调查研究时往往具有很大的局限性, 特别是针

收稿日期: 2023-12-28; 修订日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31770442); 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-LZX0061); 重庆师范大学“博望学者”领军人才计划; 质兰基金会项目(2022100211B)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC31770442); the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2024NSCQ-LZX0061); the Leading Talent Program for BoWang Scholars of Chongqing Normal University; the Zhilan Foundation Program (2022100211B)]

作者简介: 陶渝镇(1998—), 男, 硕士研究生; 研究方向为鱼类保护生态学。E-mail: 1340889987@qq.com

通信作者: 夏继刚, 男, 教授, 博士生导师; 主要从事鱼类环境适应与保护生态学研究。E-mail: jiangxia@163.com

对具有复杂栖息地环境的山涧溪流珍稀鱼类难以开展精确调研。目视法^[13]是一种通过观察外观特征进行鱼类识别和计数的方法,该方法对渔业资源无损伤,是一种环境友好型调研方法,然而在实际应用中易受水体透明度、目标鱼类敏感性、研究设计的科学性 & 观察者主观经验等影响。

秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)为国家Ⅱ级重点保护水生野生动物,隶属于鲑形目(*Salmoniformes*)、鲑科(*Salmonidae*)、细鳞鲑属(*Brachymystax*),是目前世界上分布最南端的几种鲑科鱼类之一^[9, 14–17]。该物种是第四纪冰期自北南移的孑遗物种,分布地域范围狭窄,主要涉及长江流域汉江水系(涓水河、酉水河、子午河等)及黄河流域渭河水系(石头河、千河、黑河等),是秦岭溪流生态系统重要的旗舰物种与环境指示种^[14–18]。针对该物种的相关研究主要涉及热生物学^[14–17]、人工养殖与繁育^[19]、生理代谢^[14, 16, 17]及系统发育^[20, 21]等方面。近年来,由于气候变化和人为活动干扰等原因,秦岭细鳞鲑野生种群资源锐减。然而,长期以来一直缺乏对该物种种群科学有效的调查、监测与评估(更未见对其仔稚鱼分布模式及其栖息地环境特征的系统研究),成为制约该物种保护的瓶颈。本研究在团队前期研究的基础上采用目视法并通过严格的样方设计对秦岭细鳞鲑仔稚鱼资源状况开展调查研究,旨在探明该物种仔稚鱼分布模式及其环境驱动因子,以为秦岭细鳞鲑早期资源保护提供研究基础,并为未来开展产卵场及仔稚鱼栖息地立体化生态恢复提供理论依据和行动指南。

1 材料与方法

1.1 调查地点与时间

选取陕西陇县秦岭细鳞鲑国家级自然保护区内的蒲峪河(干流;调研起点106°37′09″E、34°41′35″N,终点106°40′09″E、34°50′42″N)及其支流(木拉石沟河;调研起点106°41′04″E、34°50′19″N,终点106°42′08″E、34°46′44″N)作为研究样地(图1)。调研时间为2023年6月17日至6月22日每日夜间(20:00—2:00),调研期间天气与河流环境状况情况保持一致(无显著日间变化且均为晴天),调研前1周无下雨天气。

1.2 调查方法

采用本团队建立的目视法开展调查工作。调研时观察者沿目标河段等距设置样点,统计样点区域内所观察到的仔稚鱼数量并采集记录样点内各种生物和非生物环境特征。将干流、支流分别按照等海拔梯度划分下、中下、中、中上、上5个河

段(调研样段),以相对海拔落差和观测点间距离作为选取标准,沿河段一侧边缘设置样点(图1),每河段均选取10个样点(2 m×2 m)作为详细抽样调查生境(共计100个样点),相邻样点间距100 m。从高海拔样段开始调研,沿河而下、徒步观测。基于对秦岭细鳞鲑光偏好与适应性的实验研究,在对各样点调研时从黑暗环境突然打开LED光源(300 W),详细记录样点内秦岭细鳞鲑仔稚鱼的数量及其栖息地环境特征并拍照,仔稚鱼体长20—28 mm(图2,由于调研期间某些样点同时分布有仔鱼和稚鱼或二者在野外生境难以精确区分,本文统称为仔稚鱼),环境特征包括生物因素(拉氏鲮*Phoxinus lagowskii*、石蛾幼虫、蝌蚪、鳅、青苔、野草数量等)及非生物因素(海拔、河宽、水深、温度、溶氧、pH、流速、底质等)。其中,对样点内的拉氏鲮、石蛾幼虫、蝌蚪、鳅进行逐个计数,若数量过多(50+),则采用估算法计数;而青苔、野草等由于

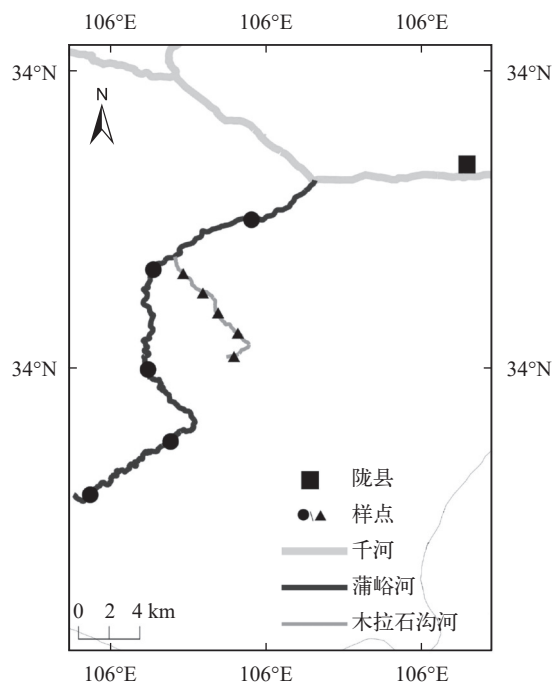


图1 调研样点设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling site

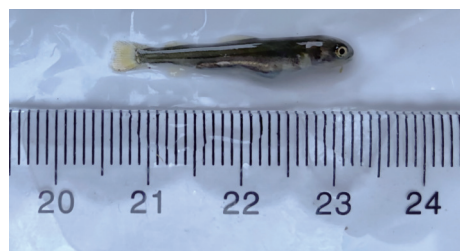


图2 秦岭细鳞鲑仔稚鱼

Fig. 2 Larval *Brachymystax tsinlingensis*

无法详细计数,则以有和无作为划分标准,有记为1、无记为0。海拔采用两步路户外助手APP测量,河宽和水深采用直接测量法,水温和溶氧则采用便携式溶氧仪(HQ40d, Hach Company, Loveland, CO, USA)测量, pH采用pH计(希玛PH848)测量,流速采用多普勒流速检测仪(DPL-LS10)测量,底质(泥、沙、砂、石)的划分以单个样方内某一底质面积超过70%为标准进行确定。

1.3 数据分析与处理

使用Excel 2010对数据进行整理后,采用SPSS 22.0进行统计分析,并使用Graphpad Prism 8.0软件作图。通过多项式回归曲线拟合建立仔稚鱼分布与海拔和温度的关系,不同环境驱动因子之间的关联使用R语言corrplot包进行分析。由于不同河流及其不同底质下仔稚鱼分布数据不满足正态分布,采用Mann-Whitney U检验比较干流和支流仔稚鱼数量分布的差异,采用Kruskal-Wallis H检验不同底质对仔稚鱼分布的影响,显著水平设为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 干流与支流秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量分布的差异

在干流和支流中分别观察到秦岭细鳞鲑仔稚鱼47和110尾,干流和支流中仔稚鱼数量分布差异显著($\chi^2=8.272$, $P=0.004$; 图3)。

2.2 海拔对秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布的影响

秦岭细鳞鲑仔稚鱼种群数量随海拔变化呈现先增后降的波动变化(图4)。在调研样段内,约50%的仔稚鱼分布于海拔1400—1600 m的干流中游河段,约50%的仔稚鱼分布在海拔1400—1500 m的支流中游河段。依据建立的仔稚鱼种群数量分

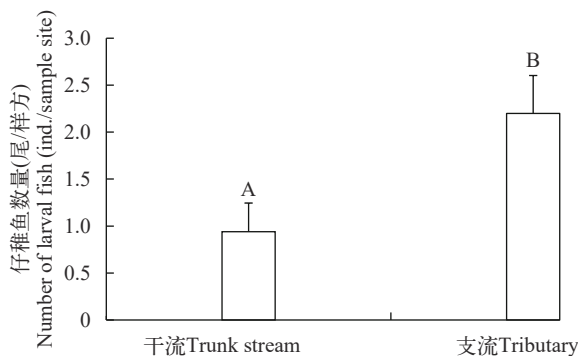


图3 秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量分布在干流与支流的比较(平均值±标准误)

Fig. 3 Distribution of larval *Brachymystax tsinlingensis* population in the trunk stream vs. tributary (mean±SE)

不同大写字母表示干流与支流差异显著($P<0.05$)

Different capital letters indicate significant differences between the trunk stream and tributary ($P<0.05$)

布与海拔的曲线关系方程(干流: $y = -7.534E-06x^2 + 0.022x - 14.567$; 支流: $y = -7.399E-05x^2 + 0.214x - 150.252$), 推导出秦岭细鳞鲑仔稚鱼在干流与支流的最适分布海拔分别是1460和1446 m。

2.3 底质对秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布的影响

干流和支流调查样方的底质占比如图5所示,干流中底质对秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量分布无显著影响($\chi^2=4.123$, $P=0.248$); 支流中底质对仔稚鱼数量分布影响显著($\chi^2=9.859$, $P=0.020$), 在沙、砂、石底质中的仔稚鱼数量显著高于泥底质的仔稚鱼数量(图6)。

2.4 秦岭细鳞鲑仔稚鱼栖息地不同环境驱动因子之间的关联

秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布的环境驱动因子在干流与支流中并不完全一致(表1)。在干流中, 秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量与流速显著负相关($R=-0.30$, $P=0.039$), 与青苔也显著负相关($R=-0.46$, $P=0.001$), 而与石蛾幼虫数量显著正相关($R=0.62$, $P<0.001$; 图7); 在支流中, 秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量与流速显著负相关($R=-0.39$, $P=0.005$), 与青苔无显著相关性($R=0.018$, $P=0.900$), 而与蝌蚪显著正相关($R=0.35$, $P=0.013$), 并且与石蛾幼虫也显著正相关($R=0.28$, $P=0.049$; 图8)。

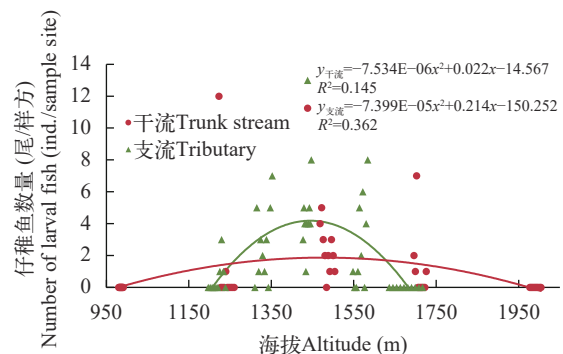


图4 秦岭细鳞鲑仔稚鱼在不同海拔的分布

Fig. 4 Distribution of larval *Brachymystax tsinlingensis* at different altitudes

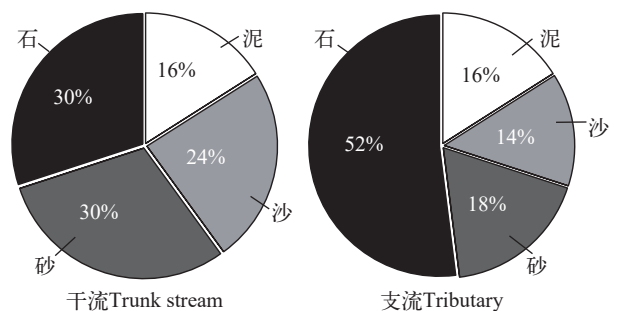


图5 干流和支流各底质类型的占比

Fig. 5 Percentage of each substrate type in trunk stream and tributary

3 讨论

本研究首次探究了秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布模式及其栖息地环境特征。研究发现, 秦岭细鳞鲑仔稚鱼种群在干流和支流的分布海拔较为接近, 分别为1460和1446 m。与干流相比, 支流秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量更多, 其分布的环境驱动因子可能涉及河流流速与底质类型以及群落中的石蛾幼虫、蝌蚪、青苔数量等。由于早期仔稚鱼游泳能力弱、不具备通过长途游泳改变栖息地环境的能力, 仔稚鱼种群的分布模式主要与秦岭细鳞鲑亲鱼选择的产卵场密切相关, 产卵场的环境条件决定了幼鱼生存的河段环境, 因此可通过仔稚鱼分布模式及其环境驱动因子推测产卵场环境, 为产卵场调查、保护及生态修复提供研究基础。

3.1 秦岭细鳞鲑仔稚鱼栖息地生物因素的作用

拉氏鲮是秦岭细鳞鲑栖息地最为常见同域分布鱼类, 该物种食性杂、分布范围较广、被认为是秦岭细鳞鲑主要的饵料生物之一^[22]。本研究拉氏鲮种群数量与秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量分布无显著相关性, 推测二者虽为同域分布物种、但在微生物

选择上存在显著生态位分化, 特别是为了避免生活史早期胚胎和仔稚鱼被捕食, 秦岭细鳞鲑在产卵场选择上可能趋于向更高海拔进化适应(拉氏鲮数量与海拔显著负相关, 图 7 和图 8)。此外, 鳅作为秦岭溪流生境偶见的底栖鱼类, 主要分布于干流中下游、在支流较为少见, 其种群数量与秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量无显著相关性, 但与蝌蚪数量却显著负相关, 推测干流中蝌蚪而非秦岭细鳞鲑仔稚鱼是鳅重要的捕食对象。

石蛾幼虫喜栖息于清洁无污染、低温且溶氧高的溪流中, 对水质指标具有指示意义^[23,24]。石蛾幼虫通常以腐叶和其他碎屑为食, 被誉为溪流水底的“建筑师”^[25], 然而, 本研究前期调研发现, 石蛾幼虫也经常取食秦岭细鳞鲑的胚胎, 对秦岭细鳞鲑早期资源造成捕食胁迫。值得注意的是, 本研究中秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量分布与石蛾幼虫数量显著正相关, 这种种间数量分布关系为秦岭细鳞鲑产卵场的保护及栖息地修复带来了新的启发与思考。例如, 未来人工繁育仿生态系统的构建以及自然河流秦岭细鳞鲑栖息地生态修复(特别是产卵场修复)如何考量石蛾幼虫的因素? 不同生活史阶段秦岭细鳞鲑与石蛾幼虫的种间互作及其环境应答机制有待于进一步研究。

青苔广泛存在于各种养殖及自然水体, 对自然水域生物多样性构成一定威胁。当水体中有大量青苔时, 水生动物苗种易受困于青苔中而死亡; 青苔夜间及死亡后分解有机物还会消耗水中大量溶解氧并生成有毒物质, 导致水质超标^[26,27]。在本研究中, 青苔与秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量显著负相关, 表明秦岭细鳞鲑仔稚鱼对栖息地水质需求高、青苔可能是抑制其分布的限制因子, 提示在秦岭细鳞鲑仔稚鱼栖息地保护与修复中应建立水质环境标准并注意控制青苔数量。

3.2 秦岭细鳞鲑仔稚鱼栖息地非生物因素的作用

物种的海拔分布及形成原因一直备受研究者关注^[28], 海拔梯度分布格局主要包括单调递减^[29]、先平台再递减、低平台伴中海拔峰值的偏峰分布格局^[30]和单峰分布格局^[31]。本研究发现, 秦岭细鳞鲑仔稚鱼种群在干流和支流随海拔变化均呈单峰

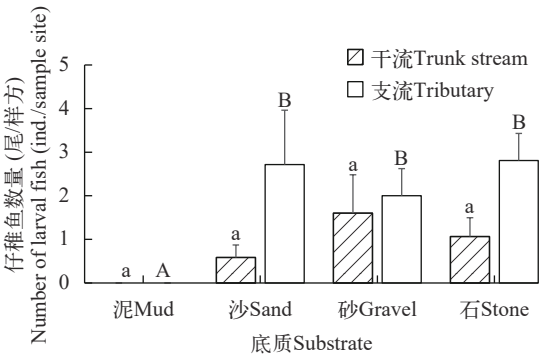


图 6 底质对秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量分布的影响(平均值±标准误)
Fig. 6 Effects of substrate on the number of larval *Brachymystax tsinlingensis* population (mean±SE)

图中小写字母相同表示干流不同底质间无显著差异($P>0.05$), 大写字母不同表示支流不同底质间差异显著($P<0.05$)

The same lowercase letter indicates no significant difference among different substrates in the trunk stream ($P>0.05$), and different capital letters indicate significant differences among different substrates in the tributary ($P<0.05$)

表 1 环境驱动因子与仔稚鱼数量分布的相关性水平(P值)

Tab. 1 Level of correlation (P-value) between environmental factor and the number of larval <i>Brachymystax tsinlingensis</i> population											
	海拔 Altitude	温度 Temperature	流速 Flow velocity	河宽 River width	河深 River depth	拉氏鲮 <i>Phoxinus lagowskii</i>	蝌蚪 Tadpole	石蛾幼虫 Caddis worm	鳅 Cobitidae	青苔 Green moss	野草 Weed
干流 Trunk stream	0.025	0.031	0.039	0.455	0.075	0.820	0.306	<0.001	0.566	0.001	0.405
支流 Tributary	<0.001	<0.001	0.005	0.948	0.363	0.058	0.013	0.049	0.314	0.900	0.748

分布格局。这种分布格局可能与不同海拔下溪流底质类型以及温度的变化有关。在达到秦岭细鳞

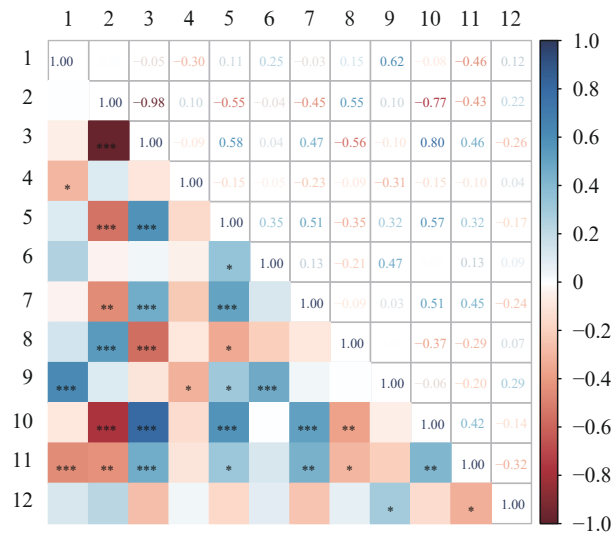


图7 干流秦岭细鳞鲑仔稚鱼栖息地不同环境驱动因子之间的相关性

Fig. 7 Correlations in different environmental factors of larval *Brachymystax tsinlingensis* habitat in trunk stream

1. 秦岭细鳞鲑仔稚鱼 *Brachymystax tsinlingensis*; 2. 海拔 Altitude; 3. 温度 Temperature; 4. 流速 Flow velocity; 5. 河宽 River width; 6. 河深 River depth; 7. 拉氏鲃 *Phoxinus lagowskii*; 8. 蝌蚪 Tadpole; 9. 石蛾幼虫 Caddis worm; 10. 鳅 Cobitidae; 11. 青苔 Green moss; 12. 野草 Weed

代表不同环境驱动因子之间显著相关 ($P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$); 下同

* represent significant correlations in different environmental drivers (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$); the same applies below

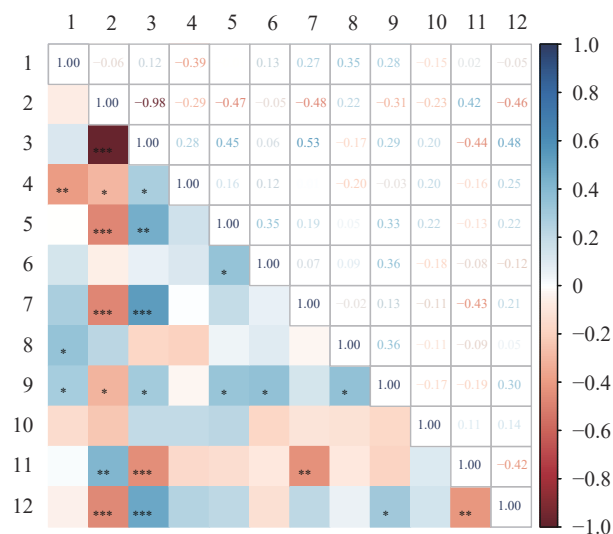


图8 支流秦岭细鳞鲑仔稚鱼栖息地不同环境驱动因子之间的相关性

Fig. 8 Correlations in different environmental factors of larval *Brachymystax tsinlingensis* habitat in tributary

鲑仔稚鱼数量分布的峰值前,随着海拔的上升,溪流底质类型由以泥为主逐渐转变为以沙和砂石为主,而峰值后随着海拔增加底质类型又变成以泥沙为主。有研究表明,繁殖期鲑一般选择粗砂底质筑巢产卵^[9, 32]。例如,繁殖期樱花钩吻鲑(*Oncorhynchus masou formosanus*)选择栖息于砂石底质^[32],韩国洛东河细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)喜栖于基岩或者漂石区域^[33]。这种繁殖期亲鱼对富含砂、石等复杂粗糙底质的选择,有助于满足其繁殖后胚胎及仔稚鱼藏匿的生态需求。本研究也发现,支流中秦岭细鳞鲑仔稚鱼在沙、砂、石底质中的数量分布显著高于其在泥底质的分布。值得注意的是,调研中在海拔1600 m以上的支流中未发现秦岭细鳞鲑仔稚鱼,而在海拔1600 m以上的干流中仍观测到一定数量的仔稚鱼分布。这可能与人类活动和工程建设导致海拔1600 m以上的支流主要为泥底质有关。

流速是影响溪流鱼类种群分布的重要生态因子,特别是处于生活史早期的仔稚鱼自主游泳能力弱,适宜的水流速度是其存活与生长发育的关键^[34-38]。通常情况下,一定的水流速度刺激有利于鱼类的生长及生理代谢稳态,而过高的流速将导致生长和免疫性能下降^[34]。在本研究中,秦岭细鳞鲑仔稚鱼数量分布与流速显著负相关,干流和支流仔稚鱼分布的观测阈值分别为22—128和6—184 mm/s,这可能是因为较缓的流速有利于仔稚鱼减少运动耗能^[9],从而保障其在摄食、生长^[35]、逃避敌害^[36-38]等方面的能量供给。进一步深入探究不同环境以及不同发育状态下秦岭细鳞鲑仔稚鱼对流速的选择偏好及其适应性是必要的。

综上,本研究揭示了秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布模式,建立了仔稚鱼数量分布与海拔的拟合方程,阐明了影响该物种仔稚鱼分布的核心环境参数,并构建了秦岭细鳞鲑仔稚鱼栖息地各类环境驱动因子关系网络热图。研究结果可为未来开展秦岭细鳞鲑种群持续调研与保护、栖息地适宜性评估与生态修复提供了必要且亟需的研究基础。然而,值得注意的是,尽管仔稚鱼生存环境相对固定、难以长距离洄游,但其仍然具有一定的微生境选择能力,因此真实的产卵场环境可能与仔稚鱼栖息地环境存在一定的差异、二者并不完全等同。此外,物种栖息地各类环境因子并非孤立存在,它们彼此联系、相互制约且非简单的两两相关关系,未来研究中有必要结合秦岭细鳞鲑仔稚鱼种群分布模式及其数量变动特征深入探究各环境因子的生态作用及作用途径。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Rodriguez J M. Temporal and cross-shelf distribution of ichthyoplankton in the central Cantabrian Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **79**(3): 496-506.
- [2] Wan R J, Zeng D Y, Bian X D, *et al.* Species composition and abundance distribution pattern of ichthyoplankton and their relationship with environmental factors in the East China Sea ecosystem [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, **38**(9): 1375-1398. [万瑞景, 曾定勇, 卞晓东, 等. 东海生态系统中鱼卵、仔稚鱼种类组成、数量分布及其与环境因素的关系 [J]. 水产学报, 2014, **38**(9): 1375-1398.]
- [3] Li Z G, Ye Z J, Wan R. Spatial and seasonal patterns of ichthyoplankton assemblages in the Haizhou Bay and its adjacent waters of China [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, **14**(6): 1041-1052.
- [4] Li Y F, Li X H, Yang J P, *et al.* Status of *Elopichthys bambusa* recruitment stock after the impoundment of Changzhou Hydro-junction in Pearl River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 917-924. [李跃飞, 李新辉, 杨计平, 等. 珠江干流长洲水利枢纽蓄水后珠江鳊鱼 (*Elopichthys bambusa*) 早期资源现状 [J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 917-924.]
- [5] Li X F, Ding L Q, He X H, *et al.* The community characteristics of larvae and juvenile fish in the Anqing section of the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(6): 1300-1310. [李新丰, 丁隆强, 何晓辉, 等. 长江安庆段仔稚鱼群落特征调查研究 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(6): 1300-1310.]
- [6] Dai P, Zhou Y, Ren P, *et al.* Spatial and temporal distributions of fish larvae and juveniles in Lake Wuli, Lake Taihu [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(3): 577-586. [代培, 周游, 任鹏, 等. 太湖五里湖仔稚鱼时空分布特征 [J]. 水生生物学报, 2020, **44**(3): 577-586.]
- [7] Planque B, Loots C, Petitgas P, *et al.* Understanding what controls the spatial distribution of fish populations using a multi-model approach [J]. *Fisheries Oceanography*, 2011, **20**(1): 1-17.
- [8] Smialek N, Pander J, Geist J. Environmental threats and conservation implications for Atlantic salmon and brown trout during their critical freshwater phases of spawning, egg development and juvenile emergence [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2021, **28**(5): 437-467.
- [9] Wu J M, Yang H C, Shao J, *et al.* Habitat environmental characteristics of *Brachymystax lenok tsinlingensis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(1): 214-219. [吴金明, 杨焕超, 邵俭, 等. 秦岭细鳞鲑栖息地环境特征研究 [J]. 水生生物学报, 2017, **41**(1): 214-219.]
- [10] Song C, Liu Y Y, Lv Y, *et al.* Distribution of *Salanx ariakensis* larvae in the Yangtze Estuary and its relationship with environmental factors [J]. *Marine Fisheries*, 2015, **37**(4): 318-324. [宋超, 刘媛媛, 吕杨, 等. 长江口有明银鱼仔鱼的分布及其与环境因子的关系 [J]. 海洋渔业, 2015, **37**(4): 318-324.]
- [11] Lacoursière-Roussel A, Côté G, Leclerc V, *et al.* Quantifying relative fish abundance with eDNA: a promising tool for fisheries management [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2016, **53**(4): 1148-1157.
- [12] Lee H, Choi J H, Moon S Y, *et al.* Small-scale spatiotemporal pattern in the spawning of Pacific herring (*Clupea pallasii*) in the Jinhae Bay, Korea, estimated using hydroacoustic survey [J]. *Applied Sciences*, 2021, **11**(5): 2058.
- [13] Ferreira C E L, Gonçalves J E A, Coutinho R. Community structure of fishes and habitat complexity on a tropical rocky shore [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2001, **61**(4): 353-369.
- [14] Zhao Y H, Zhang C G. Threatened fishes of the world: *Brachymystax lenok tsinlingensis* Li, 1966 (Salmonidae) [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, **86**(1): 11-12.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Peng M R, Zheng X L, Li P, *et al.* Effects of temperature and repeat measurement on fast-start, swimming performance and post-exhaustion metabolic characteristics in *Brachymystax lenok tsinlingensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(6): 2505-2514. [彭敏锐, 郑雪丽, 李平, 等. 温度和重复测定对秦岭细鳞鲑快速启动反应、游泳性能及力竭后代谢特征的影响 [J]. 生态学报, 2021, **41**(6): 2505-2514.]
- [18] Xia J G, Chen M, Xiao J, *et al.* The metabolism and hypoxia tolerance of *Brachymystax lenok tsinlingensis* in relation to temperature acclimation [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(1): 201-205. [夏继刚, 陈梅, 肖静, 等. 秦岭细鳞鲑代谢及低氧耐受能力对温度驯化的响应 [J]. 水生生物学报, 2017, **41**(1): 201-205.]
- [19] Li P, Wang F, Wen S E. Study on parent fish cultivation and artificial propagation of *Brachymystax lenok tsinlingensis* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, **24**(6): 841-846. [李平, 王丰, 问思恩. 秦岭细鳞鲑亲鱼培育和人工繁育技术研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2015, **24**(6): 841-846.]
- [20] Zhang Y P, Wang T, Du Y Y, *et al.* Analysis of the genetic diversity of cultured and wild *Brachymystax lenok tsinlingensis* populations based on mtDNA D-loop and Cyt b [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38**(5): 828-833. [张艳萍, 王太, 杜岩岩, 等. 秦岭细鳞鲑人工繁育群体与野生群体遗传变异分析 [J]. 水生生物学报, 2014,

- 38(5): 828-833.]
- [21] Zhang Y P, Du Y Y, Wang T, *et al.* Population genetic structure of *Brachymystax lenok tsinlingensis* as inferred from mtDNA D-loop sequence [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(17): 4950-4956. [张艳萍, 杜岩岩, 王太, 等. 秦岭细鳞鲑群体遗传结构 [J]. 生态学报, 2014, **34**(17): 4950-4956.]
- [22] Gou N N, Jin T Z, Zhang J L, *et al.* Population characteristics and seasonal variation of *Brachymystax lenok tsinlingensis*'s main bait organism *Lagowskiella lagowskii* in national nature reserves of rare aquatic wildlife of Heihe River [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, **27**(9): 1258-1264. [苟妮娜, 靳铁治, 张建禄, 等. 黑河国家级自然保护区秦岭细鳞鲑主要饵料生物——拉氏鲢种群特征及其季节变化 [J]. 西北农业学报, 2018, **27**(9): 1258-1264.]
- [23] Long J G, Zhang J Y. Ecological characteristics of *Amphipsyche proluta* MacLachlan [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(3): 25-28. [龙建国, 张建云. 兼长角纹石蛾的生态特征 [J]. 生态学杂志, 2002, **21**(3): 25-28.]
- [24] He Y C, Yang G J, Wang X P. Diversity and stability of terrestrial insect community in different wetlands in Yinchuan, Ningxia, Northwest China [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2018, **61**(12): 1439-1452. [何云川, 杨贵军, 王新谱. 银川不同湿地陆生昆虫群落多样性与稳定性 [J]. 昆虫学报, 2018, **61**(12): 1439-1452.]
- [25] Hu Y L. Larval taxonomy of caddisfly in Zhejiang provinces, China (Insecta: Trichoptera) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 10-13. [胡燕利. 中国浙江毛翅目幼虫分类研究(昆虫纲: 毛翅目) [D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 10-13.]
- [26] Vahteri P, Mäkinen A, Salovius S, *et al.* Are drifting algal mats conquering the bottom of the Archipelago Sea, SW Finland [J]? *AMBIO*, 2000, **29**(6): 338-343.
- [27] Norkko J, Bonsdorff E, Norkko A. Drifting algal mats as an alternative habitat for benthic invertebrates: species specific responses to a transient resource [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2000, **248**(1): 79-104.
- [28] Gaston K J. Global patterns in biodiversity [J]. *Nature*, 2000, **405**(6783): 220-227.
- [29] Askeyev A, Askeyev O, Yanybaev N, *et al.* River fish assemblages along an elevation gradient in the eastern extremity of Europe [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2017, **100**(5): 585-596.
- [30] Li J, He Q X, Hua X, *et al.* Climate and history explain the species richness peak at mid-elevation for *Schizothorax* fishes (Cypriniformes: Cyprinidae) distributed in the Tibetan Plateau and its adjacent regions [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, **18**(2): 264-272.
- [31] McCain C M. Global analysis of reptile elevational diversity [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, **19**(4): 541-553.
- [32] Honda K, Kagiwada H, Tojo N, *et al.* Riverine environmental characteristics and seasonal habitat use by adult Sakhalin taimen *Hucho perryi* [J]. *Journal of Fish Biology*, 2010, **77**(7): 1526-1541.
- [33] Yoon J D, Kim J H, Jo H B, *et al.* Seasonal habitat utilization and movement patterns of the threatened *Brachymystax lenok tsinlingensis* in a Korean River [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2015, **98**(1): 225-236.
- [34] Jonsson B, Jonsson N. A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow [J]. *Journal of Fish Biology*, 2009, **75**(10): 2381-2447.
- [35] Nislow K H, Armstrong J D. Towards a life-history-based management framework for the effects of flow on juvenile salmonids in streams and rivers [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2012, **19**(6): 451-463.
- [36] McHenry M J, Feitl K E, Strother J A, *et al.* Larval zebrafish rapidly sense the water flow of a predator's strike [J]. *Biology Letters*, 2009, **5**(4): 477-479.
- [37] Love S A, Phelps Q E, Tripp S J, *et al.* The importance of shallow-low velocity habitats to juvenile fish in the middle Mississippi River [J]. *River Research and Applications*, 2017, **33**(3): 321-327.
- [38] Riley W D, Maxwell D L, Pawson M G, *et al.* The effects of low summer flow on wild salmon (*Salmo salar*), trout (*Salmo trutta*) and grayling (*Thymallus thymallus*) in a small stream [J]. *Freshwater Biology*, 2009, **54**(12): 2581-2599.

DISTRIBUTION PATTERNS AND HABITAT ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF *BRACHYMYSTAX TSINLINGENSIS* LARVAL FISH

TAO Yu-Zhen^{1,2}, WANG Li-Ying^{1,2}, HUANG Qing-Feng^{1,2}, DENG Chu-Ke^{1,2}, CHEN Fan-Gang³ and XIA Ji-Gang^{1,2}

(1. Fish Ecology and Conservation Research Center, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Key Laboratory of Conservation and Utilization of Freshwater Fishes, Chongqing 401331, China; 3. Sichuan Aquabase Biotechnology Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Qinling lenok *Brachymystax tsinlingensis*, a threatened salmonid species endemic to the Qinling Mountain Range, is currently experiencing a population decline and holds the status of a second-class state-protected wild animal in China Red Data Book of Endangered Animals. Scientific and effective investigation and assessment of the population size of this species have been lacking for an extended period, along with systematic research on the distribution patterns of its larval fish and the environmental characteristics of its habitats. This study aims to elucidate the distribution patterns of larval *B. tsinlingensis* and the environmental drivers, thereby providing a research basis for early resource conservation efforts for the species. In this study, the trunk stream Puyu River and its tributary Mulashigou River in the Qinling Lenok National Nature Reserve, Longxian, Shaanxi Province, China, were selected as the study sites. 100 sample squares (2 m×2 m) were set up as detailed sampling habitats. The results showed that: (1) The number of larval *B. tsinlingensis* distributed in tributary was significantly higher than that in the trunk stream ($P<0.05$). (2) The population size of larval *B. tsinlingensis* showed an increasing and then decreasing trend with altitude. The optimal distribution altitudes in the trunk stream and tributary were 1460 and 1446 m, respectively. (3) Environmental drivers influencing larval *B. tsinlingensis* distribution varied between the trunk stream and tributary, with larval *B. tsinlingensis* abundance in trunk stream significantly negatively correlated ($P<0.05$) with flow velocity and green moss abundance, while positively correlated ($P<0.05$) with larval caddis worm abundance. In contrast, larval *B. tsinlingensis* abundance was significantly negatively correlated ($P<0.05$) with flow velocity and positively correlated ($P<0.05$) with tadpole and larval caddis worm abundance in the tributary. This study revealed the distribution patterns of larval *B. tsinlingensis* and the environmental characteristics of their habitats. Additionally, it constructed a heat map illustrating the relationships between various environmental drivers in larval *B. tsinlingensis* habitats. These findings will provide the necessary scientific basis for the investigation and monitoring of Qinling lenok populations, as well as for habitat suitability assessment, conservation, and ecological restoration for this species.

Key words: Distribution patterns of larval fish; Altitude; Substrate; Spawning ground; *Brachymystax tsinlingensis*