

分类号: Q958
学号: 20222006064

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



梯级水库群河段典型产漂流性卵鱼类对微生境 变化响应机理研究

学位申请人

李文超

指导教师

王寒月 副教授

刘彤 教授

陈东 研究员

申请学位门类级别

理学硕士

学科、专业名称

生物学

研究方向

干旱区生物多样性科学

所在学院

生命科学学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

分类号: Q958
学号: 20222006064

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



梯级水库群河段典型产漂流性卵鱼类对微生境 变化响应机理研究

学位申请人	李文超
指导教师	王寒月 副教授
	刘彤 教授
	陈东 研究员
申请学位门类级别	理学硕士
学科、专业名称	生物学
研究方向	干旱区生物多样性科学
所在学院	生命科学学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

**Study on Response Mechanisms of Typical Drift-Spawning Fish to
Microhabitat Alterations in Cascade Reservoir River Reaches**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Natural Science

By

Li Wen-chao

(Biology)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Han-yue

May, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：李文超

时间：2025年5月21日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：李文超

时间：2025年5月21日

导师签名：王雪梅

时间：2025年5月21日

摘要

在梯级水库群背景下,水动力与微地貌变化对产漂流性卵鱼类繁殖的影响日益受到关注。鱼类的繁殖过程可划分为产卵与孵化两个关键阶段:产卵阶段中,适宜的底质对产卵行为具有重要的诱导和保障作用;孵化阶段,漂流性卵需依赖适宜的水动力条件完成漂流发育。目前,关于底质对产卵行为影响的研究仍较有限,尤其缺乏对水动力特征与微地貌耦合机制下产卵栖息地适宜性的系统评估。与此同时,孵化阶段的研究多聚焦于鱼卵在水体表层的悬浮与沉降过程,往往忽略了鱼卵在近底水层中的近底漂流现象,普遍将鱼卵沉降视为不可逆的死亡过程。

为系统探究梯级水库群对鱼类繁殖过程的影响,本研究从产漂流性卵鱼类的产卵行为与卵漂移特征两方面出发,结合栖息地模型构建与室内实验,建立了鱼卵近底漂流阈值的判别公式,并据此确定漂流性卵的近底漂流阈值。基于该阈值,本文对2020年3月至7月白鹤滩库区165 km河段开展了鱼卵漂流模拟。以典型产漂流性卵鱼类——圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)为研究对象,构建了考虑底质影响的产卵栖息地适宜性评价模型,并应用于2020年3-7月金沙江平地镇河段的产卵栖息地质量分析,进一步与不考虑底质影响的模型结果进行对比评估。研究结果如下:

(1) 建立了漂流性卵近底漂流的阈值公式,并确定近底漂流阈值。采用因次分析法(Π定律),基于水流速度、漂流性卵的物理特性(密度、卵密度、直径等)、水动力湍流特性(雷诺数)及床面特征(沙波波高、波长),推导出漂流性卵的近底漂流阈值公式: $\xi = \alpha \frac{U_b^2 DR_e}{\tau_s - \tau} g \lambda h_s$ 。该公式能够较全面地反映漂流性卵在水动力作用下的运动特性。进一步,利用分位数回归建立了近底漂流阈值 ξ 与近底漂流比例 R 的回归方程: $\xi = -6.6223 + 14.5922R$ ($\tau = 0.85, p < 0.05$)。计算得出漂流性卵的近底漂流阈值为0.6738。

(2) 建立了雍水河段的垂线流速模型:
$$\begin{cases} u = U_b + U(1 + m) \left(\frac{h-h_2}{h_1} \right)^m & y > h_2 \\ u = U_b & y < h_2 \end{cases}$$
, 并对2020年3-7

月白鹤滩库区进行不同粒径(4、6、8mm, 1.003 g/cm³)漂流性卵漂流模拟。上游区域为鱼卵漂流的适宜区域,6—7月为关键时段,此期间悬浮漂流与近底漂流区域占整个河段的比例达到100%,为鱼卵的存活提供了有利条件。相较而言,大粒径鱼卵(6 mm和8 mm)具有更强的悬浮能力,孵化成功率更高。相比仅基于悬浮—沉降阈值判定的适宜漂流区域,综合考虑近底漂流后,适宜漂流区域的比例显著增加,新增区域占模拟河段的10%—80%。

(3) 考虑底质后,5月上半月与下半月WUA、OSI均分别增加42.31%、38.73%,MSP增加236.04%、614.56%,这是由于河岸带栖息地适宜度的增加,增加区域主要为河岸带,HSI约增加0.25。5-7月为金沙江下游平地镇河段圆口铜鱼产卵期,6月为产卵盛期。适宜产卵区域主要为河岸

带，且随着时间推移，适宜圆口铜鱼产卵区域向河岸带收缩。

从管理实践的角度来看，纳入鱼卵近底漂流现象为生态流量优化调控提供了科学支撑；将底质因素引入产卵栖息地模型，有助于更全面、客观地评估生境质量。针对性地开展栖息地恢复措施——如对关键河段的底质改善或入流流量调控——有望进一步提升产卵栖息地的适宜性，为受控河流的生态保护与管理提供新的路径与策略。

关键词：梯级水库；漂流性卵；微地貌；近底漂流阈值；产卵栖息地模型

Abstract

Under the context of cascade reservoir systems, the impact of hydrodynamic and microtopographic changes on the reproduction of fish species that produce drifting eggs has attracted increasing attention. The reproductive process of such fish can be divided into two key stages: spawning and hatching. During the spawning stage, suitable substrate conditions play a critical role in triggering and supporting spawning behavior. In the hatching stage, drifting eggs rely on favorable hydrodynamic conditions to complete their developmental drift. However, current research on the effects of substrate on spawning behavior remains limited, particularly regarding the suitability of spawning habitats under the coupled influence of hydrodynamic features and microtopography. Meanwhile, studies on the hatching stage primarily focus on the suspension and settling of eggs in surface flowing water, often overlooking the potential for egg near-bed drift. Consequently, egg settlement is commonly regarded as an irreversible endpoint leading to egg mortality.

To systematically investigate the impact of cascade reservoirs on the reproductive processes of fish, this study focuses on two key aspects of rheophilic fish species that produce drifting eggs: spawning behavior and egg transport characteristics. By integrating habitat modeling and laboratory experiments, a threshold formula was developed to identify the near-bed drifting conditions of fish eggs, which was then used to define the near-bed drifting threshold for drifting eggs. Based on this threshold, a drifting egg transport simulation was conducted for a 165 km river reach in the Baihetan Reservoir from March to July 2020. Taking *Coreius guichenoti*, a representative rheophilic fish species, as the model organism, a spawning habitat suitability model incorporating substrate conditions was established. This model was applied to assess habitat quality in the Pingdizhen reach of the Jinsha River from March to July 2020 and was compared with a model that does not account for substrate influence. The main results are as follows:

1. A threshold formula for the near-bed drift of drifting eggs was developed, and the near-bed drift threshold was determined. Using dimensional analysis (Π theorem), a near-bed drift threshold formula was derived based on flow velocity, the physical properties of drifting eggs (water density, egg density, diameter, etc.), hydrodynamic characteristics (turbulence, Reynolds number), and bedform characteristics (ripple height, wavelength): $\xi = \alpha \frac{U_b^2 D R_e}{r_s - r} g \lambda h_s$. This formula comprehensively reflects the movement characteristics of drifting eggs under hydrodynamic forces. Furthermore, a regression equation between the near-bed drift threshold ξ and the near-bed drift ratio R was established using quantile regression: $\xi = -6.6223 + 14.5922R$ ($\tau = 0.85, p < 0.05$). The near-bed drift threshold was calculated as 0.6738.

2. A vertical velocity model for the backwater reach was established:

$$\begin{cases} u = U_b + U(1 + m) \left(\frac{h-h_2}{h_1} \right)^m & y > h_2 \\ u = U_b & y < h_2 \end{cases}$$

Egg drift simulations were conducted in the Baihetan Reservoir from March to July 2020 for drifting eggs of different diameters (4 mm, 6 mm, 8 mm) and a density of 1.003 g/cm³. The upstream area serves as a suitable region for fish egg drifting, with June to July identified as the critical period. During this time, the proportion of suspended drifting and near-bottom drifting zones reaches 100% of the river segment, providing favorable conditions for egg survival. Comparatively, fish eggs with larger diameters (6 mm and 8 mm) exhibit stronger suspension capabilities and higher hatching success rates. Compared to suitability assessments based solely on the suspension-settling threshold, incorporating near-bottom drifting significantly increases the proportion of suitable drifting areas, with the expanded zones accounting for 10% to 80% of the modeled river segment.

3. During early and late May, WUA and OSI increased by 42.31% and 38.73%, respectively, while MSP increased by 236.04% and 614.56%, respectively, When considering substrate conditions. This was attributed to the improved suitability of riparian habitats, with habitat suitability index (HSI) increasing by approximately 0.25. From May to July, the Pingdizhen reach of the Jinsha River served as the spawning ground for *Coreius guichenoti*, with a peak spawning period in June. Suitable spawning areas were primarily located in the riparian zone, and over time, these suitable areas gradually shifted toward the riverbanks.

From a management perspective, incorporating the near-bed drift behavior of fish eggs provides a scientific basis for optimizing ecological flow regulation. Integrating substrate characteristics into spawning habitat models enables a more comprehensive and objective evaluation of habitat quality. Targeted habitat restoration measures—such as substrate enhancement in key river sections or inflow regulation—can further improve the suitability of spawning habitats, offering new opportunities for ecological protection and management in regulated river systems.

Key words: Cascade reservoirs; drifting eggs; microtopography; near-bed drift threshold; spawning habitat model.

目录

摘要.....	I
Abstract	III
目录.....	V
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 漂流性卵研究现状的文献综述	2
1.2.1 影响鱼类产卵的研究方法	2
1.2.2 鱼类产卵影响因素的研究进展	4
1.2.3 底质与鱼类产卵机制的研究现状与进展	5
1.3 漂流性卵运动机理的研究现状	6
1.3.1 漂流性卵运动的研究成果与不足	6
1.3.2 鱼卵物理特性对漂流运动的影响	7
1.3.3 环境外在因素对鱼卵漂流运动的影响	8
1.3.4 漂流性卵运动的研究方法	9
1.4 研究内容	10
1.5 技术路线	11
第 2 章 研究材料与方法	12
2.1 实验水槽制备	12
2.1.1 水槽系统	12
2.1.2 观测系统	14
2.1.3 沙波模型制备	14
2.2 模型卵的制备	15
2.2.1 模型卵材料选取	16
2.2.2 制备方法	17
2.3 实验方法	17
2.3.1 模型卵静水沉降实验	17
2.3.2 漂流性卵近底漂流阈值确定	20
2.3.3 漂流性卵近底漂流阈值应用	22
2.3.4 研究河段栖息地模型的应用	28
第 3 章 漂流性卵近底漂流阈值	35

3.1 模型卵沉速结果	35
3.2 阈值公式	36
3.3 漂流性卵近底漂流阈值	37
3.4 本章小结	39
第4章 鱼卵漂流模拟	40
4.1 雍水河段的垂线流速模型	40
4.2 白鹤滩库区底层流速模拟	41
4.3 白鹤滩库区漂流性卵漂流状况	43
4.4 本章小结	46
第5章 栖息地模型参数优化	47
5.1 2020年3-7月平地镇河段水动力条件及底质特征	47
5.2 乌东德水电站蓄水运行后圆口铜鱼产卵栖息地评价	49
5.3 底质对模型的敏感性分析	50
5.4 本章小结	52
第6章 结论与展望	53
6.1 结论	53
6.2 创新点	54
6.3 展望	54
参考文献	55
作者简介	64
致谢	65

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

河流生境是维持鱼类种群生存和繁衍的客观载体。近年来,由于人类活动的不断加剧,尤其是水利工程的建设,众多河流面临自然生境丧失、改变、破碎化等一系列问题^[1-4]。在我国,尤其是长江上游地区的水电开发,已成为影响河流生态系统的重要因素之一。近年来,随着溪洛渡、向家坝、白鹤滩、乌东德等水电站的相继投入使用以及水库群建设的推进,金沙江流域的水库群河段生态系统的碎片化趋势日益加剧。这一变化导致产漂流性卵鱼类栖息地环境发生剧烈改变,严重威胁其种群的生存、繁殖^[5-7]。

鱼类繁殖的成功与否与水环境条件紧密相关^[8]。鱼类的繁殖过程主要包括产卵和孵化两个阶段,且这两个阶段受梯级水库群的影响存在显著差异。产漂流性卵的鱼类在产卵时,需要足够的积温来促使性腺发育成熟^[9,10],洪峰脉冲刺激也是触发产卵行为的必要条件^[11,12]。此外,适宜的底质可能是部分鱼类产卵的必要条件^[13-16]。然而,水库的运行导致库区水温变化、流速降低、水位变化和涨水过程趋于平缓^[17,18],同时底质也出现细化现象^[19-24],这些变化对鱼类产卵产生了不利影响^[25,26]。

与产卵阶段不同,孵化阶段的漂流性卵需要在水流的作用下漂流并发育,其孵化效果依赖于水流速度、水温以及河段长度等因素^[27-29]。但是,水库的蓄水作用改变了河流的自然流动性,部分河段水流变为静水或缓流水体^[17,18,30],这不仅影响了鱼卵的漂流和分布,还会减少孵化所需的氧气交换,进而降低鱼卵的孵化率^[27,31,32]。

目前,虽然已有不少关于漂流性卵产卵的定量研究,但大多聚焦于水温、流速等水动力特征对产卵的影响,而关于底质对产卵影响的报道较少,尤其是水动力特征与微地貌耦合对产卵栖息地的影响研究更为匮乏^[33-35]。尽管近年来有一些研究对漂流性卵的运动机理进行了探讨,但缺乏深入的定量分析,特别是对水动力特征与微地貌的耦合研究严重不足^[36,37]。大量研究主要关注鱼卵在表层水流中的漂流与沉降,却很少考虑鱼卵在实际水动力条件下的近底漂流过程^[27,28]。以往提出的漂流阈值实质上多为悬浮-沉降阈值,而真正的漂流阈值还应涵盖鱼卵在近底层水流中重新起动的临界条件,即近底漂流阈值。

为了更准确地理解水库群建设对鱼类繁殖的影响,特别是对产漂流性卵鱼类的产卵和卵运动的影响,现有研究需要突破传统的水动力学模型,进一步融入微地貌对鱼

类繁殖的综合影响。

圆口铜鱼产漂流性卵，其卵膜透明，无黏性，卵粒随水流漂流发育^[31]。它是长江上游特有鱼类，曾广泛分布于金沙江流域。受金沙江流域水库群建设的影响，圆口铜鱼栖息地受到了严重影响，种群数量急剧下降^[38-40]，成为河流生态恢复和水库生态调度的典型物种^[41, 42]。基于以上背景，圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)被选为研究对象。

本研究在前人研究的基础上，从漂流性卵鱼类产卵和卵运移的角度出发，通过栖息地模型及室内实验，分析不同水动力-微地貌条件下产漂流性卵鱼类产卵栖息地变化及卵的近底漂流规律，这一研究进一步揭示水库群对鱼类繁殖过程的影响机制，为实际生态保护和鱼类资源恢复提供科学依据，推动河流生态系统的健康发展。

1.2 漂流性卵研究现状的文献综述

鱼类产卵过程受水温、水文节律、底质特征等多维度环境因子的协同调控。相较而言，底质作为产卵场的物理基底，其作用机制更为复杂。因此探究底质对漂流性卵产卵影响至关重要。然而，目前底质对产卵影响的报道较少，尤其是缺乏对水动力特征与微地貌协同作用的量化认知。具体来说，梯级水库蓄水运行后库区底质特征与水温、流速、水深的非线性耦合机制对产卵栖息地的影响仍需进一步研究。

1.2.1 影响鱼类产卵的研究方法

鱼类产卵行为受到多种环境因子的影响，研究其产卵的环境适宜性与空间分布是水生态学中的重要课题。为了揭示影响鱼类产卵的关键因素，学者们从野外调查、室内试验、数学模拟等不同角度开展了大量的研究。近年来，随着栖息地模型，尤其是基于模糊逻辑的栖息地模型的出现，研究者在理解鱼类产卵的环境需求上取得了重要进展。

野外调查是了解鱼类产卵环境特征的传统研究方法，也是验证和补充实验室研究成果的基础。通过对鱼类产卵场的现场调查，研究人员能够直接获取鱼类产卵的实际水文气象数据、栖息地特征、底质类型等信息，揭示出自然环境下鱼类产卵与环境因子之间的关系^[43-45]。国内外对鱼类产卵环境的野外调查已有较多报道。早期的研究通过对四大家鱼及其他经济鱼类的产卵场所进行实地调查，发现水温、流速、底质和水深是影响鱼类产卵行为的重要环境因子^[46]。例如，长江流域的调查表明，四大家鱼的产卵场对水温有严格要求，一般在 18-22℃ 之间最为适宜^[35]。

然而，单一的野外调查往往难以全面反映鱼类产卵的复杂性，尤其是在大尺度的空间和时间变化下，野外数据的获取受到季节性和环境波动的限制^[47]。因此，近年来的研究开始结合野外调查与其他方法，如实验室试验和数学建模，以获得更为准确的

结论^[48, 49]。

室内试验作为一种控制变量的研究方法，能够模拟不同环境条件对鱼类产卵行为的影响。通过在实验室中控制水温、流速、光照、盐度等因素，研究人员能够探究这些因子对鱼类性腺发育、卵巢成熟及产卵行为的具体作用^[50-52]。例如，李修峰^[53]通过室内模拟实验研究了水温变化对四大家鱼卵巢发育及产卵行为的影响，结果表明水温的升高能显著促进性腺成熟，并加速产卵过程。

室内试验还可以在在一定程度上排除外部环境的干扰，更精确地分析不同因子对鱼类产卵的影响。然而，室内环境与自然环境存在较大差异，尤其是水流、栖息地类型及生态互作等因素的缺失，使得实验结果的推广性受到一定限制^[54]。因此，室内试验的结果通常需要与野外调查相结合，并通过模拟与数学模型进行验证。

随着计算机技术和数学建模方法的发展，数学模拟已成为研究鱼类产卵的重要手段之一。通过构建数学模型，研究者能够在不干扰自然环境的情况下，定量分析环境因子与鱼类产卵之间的关系。常见的数学模型包括回归模型、气候-水文模型和水流模拟等^[55, 56]。近年来，研究者还开始采用生态模型与栖息地选择模型，以更全面地分析不同环境因子对鱼类产卵的影响^[57, 58]。例如，张贤芳等^[59]采用回归模型分析了水温、流速、光照等因子对圆口铜鱼产卵的影响，结果表明，水温和流速对其产卵场的选择具有显著影响。此外，气候变化对鱼类产卵的潜在影响也被纳入模型中^[56]，许多研究探讨了水温升高、降水变化等因素对鱼类繁殖周期的干扰^[60, 61]。这些数学模拟为揭示环境因子对鱼类产卵的具体作用机制提供了重要的工具。

尽管传统的数学模型和统计分析方法能够揭示鱼类产卵的环境规律，但这些方法往往依赖于精确的输入数据，难以应对环境变化中的不确定性和模糊性^[62]。近年来，基于模糊逻辑的栖息地模型逐渐成为解决这些问题的有效方法^[57, 58]。模糊逻辑模型通过引入模糊集合理论，能够处理环境因子之间的不确定性与模糊性，尤其适用于鱼类栖息地选择和产卵行为的模拟^[62-65]。

基于模糊逻辑的栖息地模型可以整合多种环境因子，如水温、流速、底质、透明度等，对鱼类栖息地的适宜性进行综合评估^[56]。不同于传统的数值模型，模糊逻辑模型能够根据不同的输入条件，输出一个模糊值或适宜性评分，进而判断鱼类产卵场的适宜性^[66]。例如，研究者通过模糊逻辑模型结合水温、流速等因子，对长江流域不同鱼种的栖息地进行适宜性评估，发现这一方法能够更好地模拟不同环境因子的交互作用，并为保护鱼类产卵场提供科学依据^[67]。

此外，基于模糊逻辑的栖息地模型还能动态评估环境变化对鱼类产卵栖息地的潜在影响。通过引入气候变化情景和人类活动干扰，研究人员能够预测未来环境条件下鱼类栖息地的变化趋势，为水生态保护和管理工作提供前瞻性支持^[56]。

1.2.2 鱼类产卵影响因素的研究进展

鱼类的产卵行为是物种在长期环境适应过程中形成的特征性行为，既是性腺发育成熟的内在结果，也受到外界环境刺激的影响。鱼类完成产卵行为的前提是性腺发育的成熟，并且在水温、水流等环境因子的刺激下，选择合适的场所进行产卵。

其中，水温是影响鱼类性腺发育的关键因子。亲鱼需要足够的积温以促进性腺发育^[9, 10]。研究表明，在低温条件下，圆口铜鱼的性腺发育速率明显低于高温条件下的发育速率^[50]。水温与多种性腺发育参数，如性腺类固醇激素、卵母细胞直径和性腺指数之间存在显著相关性^[60, 68, 69]。此外，水温对产卵期脑-垂体-促性腺激素轴的刺激作用在大量实验中得到了验证^[60, 61, 70]。

水温不仅影响性腺发育，还直接决定了鱼类产卵行为的发生与持续。不同鱼种对产卵水温具有特定的阈值。例如，四大家鱼的产卵适宜温度为约 18℃^[35]，而铜鱼的适宜水温为 19.2℃^[71]。以乌东德水库为例，水库蓄水后，库区下游江段四大家鱼的产卵时间推迟了约 40 天^[72]。若水温超过某一临界值，鱼类的产卵活动将停止。圆口铜鱼的产卵临界温度为 17℃，在 19-22℃ 的温度范围内，产卵活动最为活跃，25℃ 时产卵则会完全停止^[59, 73]。

自然水文节律对鱼类产卵有重要诱导作用。水文节律，特别是涨水过程，对鱼类产卵有显著的诱导作用。对于产漂流性卵的鱼类，涨水被认为是触发产卵的重要因素^[11]。随着涨水持续时间的延长及流量、流速的增加，产卵量也呈现出显著增长的趋势^[53, 74]。此外，尽管产漂流性卵鱼类的产卵行为通常发生在涨水过程中，落水阶段的变化同样能促使产卵行为，特别是在洪水波动较大的情况下，洪峰过程显著刺激了这些鱼类的繁殖活动^[12, 75]。

流速对鱼类产卵行为也有重要影响。长江四大家鱼产卵场的调查显示，流速是影响产卵的主要水文因子之一^[46]。鲢鱼的产卵活动依赖于特定的流速条件，当流速为 1.4 m/s 时，产卵活动达到最大值；然而，流速超过 1.6 m/s 时，产卵活动会显著受到抑制^[51]。

此外，水深对不同鱼类的产卵行为也具有一定的偏好。例如，圆口铜鱼的最适产卵水深为 0.4-3.95 m^[43]，而四大家鱼则更适宜在 12.77-19.93m 的水深范围内产卵^[76]。水环境的其他因子也会影响产卵行为。例如，盐度影响性腺的成熟^[52, 77]。

透明度对鱼类产卵的影响也不容忽视。四大家鱼在水温和涨水条件满足的情况下，适宜的产卵透明度范围为 5.1-14.5 cm^[78]。高天珩等(2015)的研究表明，金沙江江段铜鱼的卵密度与水体透明度呈显著负相关，说明透明度过高可能会对产卵产生抑制作用^[79]。

底质是鱼类产卵的重要生境因素之一，在鱼类产卵繁殖中扮演着重要角色。适宜的底质条件对鱼类产卵行为具有显著影响^[13-16]；适宜河床底质形成的微生境可以为鱼

类受精卵提供孵化场所，降低孵化过程中受伤概率，同时底质中较大的空隙可以为产卵鱼类提供了庇护所^[80-84]。此外，底质的稳定性影响水生植物的生长，进而影响鱼类摄食^[85]。

1.2.3 底质与鱼类产卵机制的研究现状与进展

鱼类的产卵行为受到多种环境因子的影响，尤其是水温、流速、水深等水动力特征，这些因素一直是研究的重点^[86, 87]。现有的研究聚焦于鱼类水温等环境因素与鱼类性腺发育相关的机理研究，如性腺成熟所需的积温^[9, 10]、盐度对性腺成熟的影响等^[52, 77]、及其生物学机制^[60, 61, 70]。性腺成熟后鱼类需要达到特定的水温阈值^[35, 71]，并在洪峰、涨落水、流速变化等水文节律的作用下刺激产卵^[53, 74]。

尽管水温、流速等水动力因子对鱼类产卵场选择的影响已广受关注，但底质的作用却相对少有深入研究。有研究普遍认为，底质对黏沉性卵鱼类的产卵具有显著影响。适宜的底质条件不仅有助于鱼卵的附着和孵化，还能提供必要的保护，减少卵受损的风险^[80-84]。稳定的底质被认为是一些黏沉性卵鱼类产卵的关键因素^[86, 88]。尽管这一观点在黏沉性卵鱼类的研究中得到了验证，但对于漂流性卵鱼类的产卵，底质的影响却鲜有深入探讨。相关研究大多局限于定性分析，缺乏定量研究。例如，圆口铜鱼偏好石质或沙质底床^[43]，而四大家鱼则更喜欢沙质或泥沙混合的底质^[76]。但这些研究仅涉及底质类型对鱼类产卵偏好的描述，尚未深入量化底质对鱼类产卵的具体作用。

随着梯级水库群的开发，水库区河段的河床底质结构受到了深远的影响^[19-21, 89-92]。蓄水后，库区的泥沙淤积使得河床底质由天然的粗粒砾石逐渐转变为细沉积物层，底质分布逐步均匀化^[19-24]。这种变化对漂流性卵鱼类的产卵栖息地可能产生深远影响，但相关研究仍然匮乏。

此外，水动力特征与微地貌的耦合作用对鱼类产卵栖息地的影响目前也未得到充分研究。研究表明，在宏观尺度上，四大家鱼更偏爱在弯曲、分汊和矾头等具有特殊形态的河道水流环境中产卵繁殖，极少部分位于顺直型河道^[93]。微地貌特征，如水底的沟槽、岩石等与水流的交互作用，能够形成不同的水动力区域，这些区域为漂流性卵鱼类产卵提供了理想的环境^[94, 95]。因此，水流与底质相互作用对产卵栖息地的影响值得进一步关注，尤其是在复杂的水文条件下，微地貌对水动力区域的影响，可能在鱼类栖息地选择中发挥更为关键的作用。

总的来说，现有研究主要集中在水温、流速等水动力特征对鱼类产卵的影响，而对底质的研究仍相对较少，尤其是水动力特征与微地貌耦合对产卵栖息地的影响尚未得到充分的重视。未来的研究应更加注重水动力与微地貌交互作用的系统研究，深入探讨其对鱼类栖息地选择的影响，为栖息地保护与鱼类资源管理提供更为精准的理论支持。

1.3 漂流性卵运动机理的研究现状

鱼卵运动过程受到多种因素的综合影响，既包括其自身的物理属性，如密度、直径、卵膜黏性等，也受到外部环境条件的制约，如水动力、微地貌特征和水温等。在自然河流中，鱼卵的运动不仅由水流力学作用主导，还与水流速度、河床形态和水温等动态变化密切相关。因此，深入研究鱼卵运动过程中的运动机理，能够揭示鱼类繁殖行为的细节，为水资源管理和生态保护提供重要理论依据。然而，目前关于鱼卵运动机理的研究仍处于起步阶段，特别是在梯级水库群的影响下，研究尚未充分探讨鱼卵在不同水流条件下的“近底漂流”现象。具体来说，当水流发生变化或停止后，鱼卵能否恢复漂流状态以及其运动规律如何，这一问题仍存在较大不确定性，亟需进一步研究^[28, 34, 87, 96, 97]

1.3.1 漂流性卵运动的研究成果与不足

近年来，关于鱼卵运动机理的研究取得了一定进展，尤其是在水流与鱼卵相互作用的方面。大部分研究集中在鱼卵运动的基本规律、影响因素及其在水流中的行为模式，然而这些研究多停留在定性分析阶段，且仍面临一些未解问题，特别是在梯级水库群影响下，鱼卵的“近底漂流”现象尚未得到充分探讨。

现有研究普遍认为，鱼卵运动受水流速度的影响较大。流速较低时，鱼卵沉降到底部；流速较高时，鱼卵会悬浮并随水流漂移。刘雪飞等(2018)发现，在恒定流条件下，鱼卵的漂流速度约为水流速度的0.73倍，尤其在流速低于0.93m/s时，鱼卵表现出明显的滞后运动^[54]。这一发现表明鱼卵的运动不仅受水流速度的影响，还与水流变化密切相关。张堪瑞(2022)研究表明，在非均匀流动条件下，鱼卵的纵向速度为水流速度的0.83至0.84倍，说明鱼卵运动与流速变化和坡度等因素有密切关系^[98]。

尽管水流的影响得到了广泛研究，微地貌对鱼卵运动的作用尚未得到充分关注。河床的起伏、沙波形态及其与水流的相互作用，对鱼卵的运动轨迹和沉积过程至关重要。例如，低流速区域可能导致鱼卵沉积，而高流速区域则可能促使鱼卵跳跃或翻滚^[34]。然而，现有研究大多未量化这些微地貌特征对鱼卵运动的影响，导致研究结果的适用性受到限制^[33]。

另一个亟待解决的问题是鱼卵“近底漂流”现象。鱼卵“近底漂流”指的是鱼卵在靠近河床底部的水层中随水流移动的过程。其漂流阈值通常指在水动力条件发生变化时，已沉降或部分被覆盖的鱼卵能否重新进入漂移状态的临界条件。这一现象在水库群的动态调度中尤为重要，因为水流波动可能影响鱼卵的运动轨迹及孵化成功率^[98]。研究指出鱼卵安全漂流的临界阈值为0.2-0.7m/s，但这些研究未考虑鱼卵近底漂流过程^[96, 99-105]。随着梯级水库群建设，水流条件变得更加复杂，鱼卵“近底漂流”机制成为