

# Effect of Precise Water Temperature Regulation on Gonadal Development and White Quality Formation in Salmon

Jianjun Han<sup>1</sup> Jiubo Cui<sup>1\*</sup> Fuqiang Teng<sup>2</sup> Fengtai An<sup>2</sup> Shudao Huang<sup>2</sup>

1. Rizhao Tianwang Aquatic Products Co., Ltd., Rizhao, Shandong, 276805, China

2. Rizhao Zhongbang Aquatic Science and Technology Co., Ltd., Rizhao, Shandong, 276805, China

## Abstract

This study focuses on the critical role of water temperature regulation technology in high-efficiency salmon (*Salmo salar*) roe (testis) farming, systematically analyzing the mechanisms by which water temperature influences gonadal development, sperm quality, and reproductive efficiency. By establishing a precision temperature control system tailored to temperature requirements at different growth stages, we investigated its optimization effects on key indicators including roe yield, sperm motility, and fertilization rates. Results demonstrate that optimal temperature regulation significantly promotes gonadal maturation, enhances sperm density and motility, reduces malformation rates, shortens reproductive cycles, and improves roe production efficiency. This research provides theoretical foundations and technical support for large-scale salmon roe farming, advancing the green and efficient development of high-value-added products from cold-water fish species.

## Keywords

water temperature regulation; salmon; whitefish farming; gonadal development; sperm quality

## 精准水温调控对三文鱼性腺发育及鱼白品质形成的影响机制

韩见军<sup>1</sup> 崔久博<sup>1\*</sup> 滕富强<sup>2</sup> 安丰太<sup>2</sup> 黄书道<sup>2</sup>

1. 日照天旺水产有限公司, 中国·山东日照 276805

2. 日照市众邦水产科技有限公司, 中国·山东日照 276805

## 摘要

本文聚焦水温调控技术在三文鱼（大西洋鲑, *Salmo salar*）鱼白（精巢）高效养殖中的关键作用, 系统分析水温对三文鱼性腺发育、精子质量及繁殖效率的影响机制。通过构建精准水温调控体系, 结合不同生长阶段的温度需求, 探究其对鱼白产量、精子活力、受精率等核心指标的优化效应。结果表明, 适宜的水温调控可显著促进三文鱼性腺成熟, 提升精子密度与活力, 降低畸形率, 同时缩短繁殖周期, 提高鱼白生产效率。本研究为三文鱼鱼白规模化养殖提供理论依据与技术支持, 推动冷水鱼类高附加值产品的绿色高效发展。

## 关键词

水温调控; 三文鱼; 鱼白养殖; 性腺发育; 精子质量

## 1 引言

三文鱼作为全球高经济价值冷水鱼类, 其鱼白（精巢）富含优质蛋白、不饱和脂肪酸及多种活性物质, 在高端食品、保健品及生物制药领域具有广阔应用前景<sup>[1]</sup>。然而, 传统三文鱼养殖多聚焦于肌肉生长, 对鱼白高效养殖的技术研究相对滞后, 尤其在水温调控方面缺乏系统性方案。水温作为影响鱼类生殖生理的核心环境因子, 直接调控性腺发育速率、

激素分泌及配子质量<sup>[2]</sup>。现有研究表明, 水温波动过大或偏离适宜范围会导致三文鱼性腺发育迟缓、精子活力下降甚至繁殖失败<sup>[3]</sup>。

当前, 我国三文鱼鱼白养殖面临三大挑战: 一是水温调控粗放, 难以匹配性腺发育的动态需求; 二是繁殖周期长, 鱼白产量不稳定; 三是精子质量参差不齐, 制约受精效率与后代品质。针对上述问题, 本文基于生态养殖理念, 构建精准水温调控技术体系, 解析其对三文鱼鱼白生产性能的调控机制, 旨在为高附加值鱼白产品的规模化养殖提供科学路径。

## 2 水温调控技术的核心原理与技术架构

### 2.1 水温对三文鱼生殖生理的影响机制

水温通过以下途径调控三文鱼鱼白形成:

【作者简介】韩见军（1976-），男，中国山东日照人，从事水产养殖研究。

【通讯作者】崔久博（1981-），男，中国山东日照人，从事鲑鳟冷水鱼苗种繁育研究。

激素分泌调节: 适宜水温促进促性腺激素 (GTH) 释放, 加速精原细胞分裂与精子发生<sup>[4]</sup>;

代谢效率优化: 温度升高可提升酶活性, 但超过临界值 (如 >18°C) 将导致能量耗散与氧化应激;

性腺发育同步性: 稳定水温可减少个体间发育差异, 实现群体同步成熟。

## 2.2 技术架构设计

### ①分阶段水温调控模型

生长阶段	适宜水温范围 (°C)	调控目标
幼鱼期 (0-6 月)	8-10	基础体质构建, 性腺启动
育成期 (6-18 月)	10-12	精原细胞增殖, 性腺快速发育
成熟期 (18-24 月)	12-14	精子成熟, 活力峰值维持
采收期	10-12	减少应激, 保障精子质量

### ②智能温控系统组成

热源模块: 深井冷水、制冷机组、太阳能辅助加热;

监测网络: 分布式温度传感器 (精度  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ );

反馈控制: 基于物联网的自动调温算法, 动态匹配生理需求。

## 2.3 水温调控的生理生化响应机制深度解析

水温对三文鱼生殖系统的调控不仅体现在宏观的生长速率上, 更深入到细胞分子层面。研究表明, 水温通过影响下丘脑-垂体-性腺轴 (HPG 轴) 的激素分泌节律, 直接决定精巢发育的启动与进程。在适宜温度区间 (10-14°C), 促性腺激素释放激素 (GnRH) 的合成与释放频率显著增加, 进而刺激垂体分泌促卵泡激素 (FSH) 和促黄体生成素 (LH)。FSH 主要促进精原细胞的有丝分裂增殖, 而 LH 则主导精母细胞的减数分裂及精子变态过程。

当水温低于 8°C 时, 酶活性受到抑制, 类固醇激素 (如 11-酮睾酮, 11-KT) 的合成受阻, 导致精巢发育停滞在精原细胞阶段, 无法进入减数分裂期; 反之, 若水温长期高于 16°C, 虽然初期代谢加快, 但会诱导热休克蛋白 (HSP70) 的过表达, 引发氧化应激反应, 导致生精小管上皮细胞凋亡, 精子畸形率急剧上升。此外, 水温还调控着精巢内芳香化酶 (Cyp19a1a) 的活性, 该酶负责将雄激素转化为雌激素, 其活性的温度敏感性直接影响雌雄激素的比例平衡, 进而决定性腺分化的方向与成熟度。因此, 精准的水温调控本质上是通过关键酶活性和激素受体的微调, 实现生殖生理过程的最优化。

## 3 水温调控对三文鱼鱼白生产性能的影响

### 3.1 性腺发育速率与鱼白产量提升

实验数据显示, 在 12-14°C 恒温条件下, 三文鱼性腺指数 (GSI) 较自然水温组提高 32.5%, 鱼白平均重量增加 28.7% ( $p < 0.05$ )。精准控温缩短了性腺成熟周期约 45 天, 实现年度内两批次鱼白采收。

### 3.2 精子质量显著优化

精子密度: 控温组达  $(8.5 \pm 0.6) \times 10^9$  cells/mL, 对照组为  $(6.2 \pm 0.8) \times 10^9$  cells/mL;

活力持续时间: 控温组精子激活后有效运动时间延长至 90 分钟, 对照组仅为 65 分钟;

畸形率降低: 从对照组的 18.3% 降至控温组的 7.6%。

### 3.3 繁殖效率与经济效益分析

水温调控使受精率从 72% 提升至 89%, 孵化率提高 15 个百分点。按年产 10 吨鱼白计算, 技术实施后新增产值约 420 万元, 投资回收期缩短至 1.8 年。

### 3.4 不同水温波动模式对鱼白品质的差异化影响

除了平均水温外, 水温的波动模式 (如昼夜温差、季节性变温速率) 也是影响鱼白品质的关键变量。本研究设计了三种波动模式进行对比实验:

恒温模式: 全天水温波动范围控制在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  以内;

自然模拟模式: 模拟自然界昼夜温差 ( $\pm 2-3^\circ\text{C}$ ) 及季节性缓慢升温;

剧烈波动模式: 模拟设备故障或极端天气导致的短时剧烈温差 ( $\pm 5^\circ\text{C}$  以上)。

实验结果显示, 恒温模式下的三文鱼鱼白色泽最为洁白, 质地紧实, 精子密度最高, 但性腺成熟时间相对较长, 且鱼体应激指标 (皮质醇水平) 略高于自然模拟组。自然模拟模式虽然精子密度略低 (约降低 5%), 但精子活力持续时间最长, 受精后胚胎的存活率最高, 表明适度的温度波动能够增强配子的环境适应能力, 符合“生态养殖”的理念。剧烈波动模式则造成了灾难性后果, 不仅导致大量雄性个体出现性腺退化 (吸收现象), 且存留精子的线粒体膜电位显著下降, 畸形率高达 25% 以上, 完全丧失商业价值。

这一发现提示我们, 在高效养殖中不应盲目追求绝对恒温, 而应根据养殖阶段构建“动态稳态”模型: 在性腺快速增殖期采用恒温以最大化生物量积累, 在精子成熟后期引入适度温差以激活精子潜能, 提升最终产品的综合品质。

## 4 关键技术难点与优化方向

### 4.1 现存挑战

能耗平衡: 低温水体加热成本较高, 需开发余热回收技术;

区域适应性: 不同纬度水域的基础水温差异大, 需定制化方案;

多因子耦合: 水温与溶氧、光照的协同调控机制尚不明确。

### 4.2 优化路径

新能源整合: 利用地热、工业余热降低温控能耗;

数字孪生模型: 构建水温-生理响应预测系统, 实现超前调控;

生态联动设计: 结合水生植物遮荫、微生物产热等生

物调控手段。

### 4.3 水温调控系统的工程实施与能耗优化策略

在实际工程应用中,大规模三文鱼鱼白养殖面临巨大的能耗挑战,尤其是在夏季高温或冬季极寒地区。为实现经济效益与生态效益的双赢,必须构建多维度的能耗优化策略。

#### ① 梯级利用与余热回收技术

针对工厂化循环水养殖系统(RAS),可引入热泵技术与余热回收装置。夏季利用深层地下水或海水作为冷源,通过板式换热器直接冷却养殖水体,减少制冷机组运行时间;冬季则收集养殖废水中的余热,经热泵提温后回用于进水加热。数据显示,采用梯级温控系统可使整体能耗降低35%-40%。此外,结合太阳能光热系统,在白天光照充足时辅助加热,进一步减少对化石能源的依赖。

#### ② 分区控温与流场优化

传统养殖池往往采用整体控温,导致能耗巨大且池内温度分布不均。新型设计采用“微环境分区控温”理念,利用计算流体力学(CFD)模拟池内水流场,在投喂区、休息区和排泄区设置差异化的温度传感器与调节喷嘴。通过构建特定的温度梯度流场,引导鱼群自主选择最适温度区域,既满足了生理需求,又降低了全池均匀控温的能耗成本。同时,优化进出水口布局,消除死角,确保水温在分钟级时间内达到全域均衡,避免局部高温对鱼白发育造成不可逆损伤。

#### ③ 基于人工智能的预测性调控

引入机器学习算法,建立“水温-气象-生理”耦合预测模型。系统实时采集室外气温、光照强度、养殖密度、摄食量及鱼体生理指标,提前预测未来24小时的水温变化趋势,并自动生成最优调控策略。例如,在预计夜间气温骤降前,系统提前2小时缓慢提升水温,利用水体的热惯性缓冲温度冲击,避免设备高频启停造成的能源浪费和设备损耗。这种从“被动响应”到“主动预测”的转变,是未来智慧渔业的核心方向。

## 5 结论与展望

### 5.1 水温调控对鱼白营养成分的微观修饰作用

水温调控不仅影响鱼白的产量和繁殖性能,还深刻改变了其微观营养组成。高效液相色谱(HPLC)与质谱联用分析表明,在12-14℃最佳温区培育的三文鱼鱼白,其多不饱和脂肪酸(PUFA)含量显著高于其他温区,特别是EPA(二十碳五烯酸)和DHA(二十二碳六烯酸)的比例分别提升了12.8%和15.3%。这可能与低温环境下鱼类为了维持细胞膜流动性而进行的脂质重塑机制有关。

此外,适宜水温还促进了鱼白中活性肽与微量元素的富集。研究发现,控温组鱼白中的牛磺酸、肌肽含量较高,这些物质具有显著的抗氧化和抗疲劳功能,极大提升了鱼白作为功能性食品原料的价值。相反,高温胁迫会导致蛋白质变性聚集,必需氨基酸利用率下降,且重金属(如汞、镉)在性腺中的富集系数略有上升,增加了食品安全风险。因此,水温调控不仅是生产手段,更是提升产品营养价值与安全性的关键质量控制点(CCP)。

### 5.2 产业推广前景与社会生态效益

随着消费升级,三文鱼鱼白已从传统的副产品转变为高端食材和生物医药原料,市场需求年增长率超过20%。水温调控技术的成熟应用,将使我国三文鱼鱼白产能突破现有瓶颈,预计可使单产提升30%以上,大幅降低进口依赖度。

从生态角度看,精准控温减少了因温度不适导致的病害发生,从而降低了抗生素和化学药物的使用量,减轻了养殖尾水的环境负荷。同时,通过提高饲料转化率(FCR),减少了残饵粪便的排放,契合国家“绿色水产”的发展战略。在社会效益方面,该技术体系的推广将带动相关智能装备、冷链物流及深加工产业的发展,形成完整的冷水鱼高值化产业链,为北方寒冷地区及山区乡村振兴提供强有力的产业支撑。

水温调控技术是突破三文鱼鱼白高效养殖瓶颈的核心抓手。通过分阶段精准控温,可显著提升性腺发育效率、精子质量及繁殖成功率,推动鱼白产业从“经验驱动”向“数据驱动”转型。未来需进一步开展:多环境因子耦合调控模型研究;低成本智能温控装备研发;鱼白高值化加工技术链整合。随着技术成熟与政策支持,水温调控有望成为冷水鱼类高附加值产品养殖的标准化配置,助力我国水产养殖业绿色升级。

### 参考文献

- [1] 陈志强, 刘伟. 三文鱼精巢营养成分分析及保健功能研究进展[J]. 水产学报, 2023, 47(5): 112-120.
- [2] Hansen T, et al. Temperature effects on gonadal development in Atlantic salmon[J]. Aquaculture, 2022, 548: 737-745.
- [3] 王晓琳, 等. 水温波动对虹鳟精子活力的影响机制[J]. 中国水产科学, 2024, 31(2): 205-213.
- [4] Taranger G L, et al. Control of puberty in farmed fish[J]. General and Comparative Endocrinology, 2021, 305: 113-125.
- [5] 李建国, 等. 冷水鱼类工厂化养殖水温调控技术规程[S]. NY/T 3845-2021.
- [6] 张立新. 三文鱼鱼白提取工艺及产业化应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 33-40.