

# 淡水-海洋耦合系统中鲑鱼的生态功能

孙诗涵 李楠

大连海洋大学

DOI:10.12238/eep.v8i3.2557

**[摘要]** 鲑鱼作为典型的溯河洄游性鱼类,其生命周期横跨淡水与海洋生态系统,是研究淡水-海洋耦合系统物质循环与能量传递的典型模式生物。本文系统综述了鲑鱼在跨生态系统尺度上的生态功能及其调控机制,重点关注其在生态系统功能、营养级联效应及跨界生态系统中的关键作用。研究表明,鲑鱼通过溯河产卵行为将海洋来源的氮、磷等营养物质向淡水系统迁移,显著提升河岸带生产力并改变底栖生物群落结构。同时,鲑鱼种群动态通过“自上而下”的捕食调控和“自下而上”的资源供给双重机制,影响河口区浮游生物-鱼类食物网稳定性。当前研究多聚焦于成鱼洄游阶段,对幼鱼降海过程中的行为适应机制及其对海洋食物网的贡献仍存认知空白。本研究为流域-海岸带综合管理提供了理论依据。未来研究亟需构建包含鲑鱼行为可塑性的动态生态系统模型,并加强微塑料、新兴污染物等新型压力因子对营养级联效应的干扰机制解析,这将为全球变化背景下跨界生态系统的韧性管理提供理论支撑。

**[关键词]** 鲑鱼生态功能; 淡水-海洋耦合系统; 营养传输; 跨界生态系统

中图分类号: P7 文献标识码: A

## The Ecological Functions of Salmon in the Freshwater-Ocean Coupled System

Shihan Sun Nan Li

Dalian Ocean University

**[Abstract]** Salmon, as a quintessential upstream migratory fish, possesses a life cycle that spans both freshwater and marine ecosystems. It serves as an exemplary model organism for investigating material cycling and energy transfer within coupled freshwater and marine systems. This article systematically reviews the ecological functions and regulatory mechanisms of salmon at the cross-ecosystem scale, emphasizing their pivotal roles in ecosystem functionality, trophic cascade effects, and transboundary ecosystems. Research has demonstrated that salmon facilitate the migration of marine nutrients—such as nitrogen and phosphorus—into freshwater systems through riverine spawning behaviors. This process significantly enhances the productivity of riparian zones while altering the structure of benthic biological communities. Concurrently, salmon population dynamics influence the stability of plankton-fish food webs in estuarine areas via dual mechanisms: "top-down" predation regulation and "bottom-up" resource supply. Current research predominantly concentrates on the migratory phase of adult salmon; however, there remains a knowledge gap concerning juvenile fish behavioral adaptation mechanisms during their descent to sea and their contributions to marine food webs. This study provides a theoretical foundation for integrated management strategies pertaining to river basins and coastal zones. Future research must prioritize constructing dynamic ecosystem models that incorporate salmon's behavioral plasticity while enhancing analyses regarding interference mechanisms posed by novel stressors such as microplastics and emerging pollutants on trophic cascade effects. Such efforts will offer theoretical support for resilient management practices within transboundary ecosystems amid global change.

**[Key words]** Ecological functions of salmon; Freshwater-ocean coupling system; Nutrient transport; Cross-border ecosystem

洄游性鲑鱼凭借其跨越淡水与海洋的独特生命周期,构建起物质循环与能量传递的“生态桥梁”,在全球生态系统中扮演

着不可替代的角色。其从淡水孵化、降海索饵,到溯河产卵、死亡归还的生命历程,不仅驱动了氮、磷等营养元素的跨界输送,

还深刻影响着河口食物网的稳定性与生态系统服务功能。然而，气候变化、水利工程、污染压力等人类干扰正持续削弱这一耦合机制，使鲑鱼的生态功能面临多重威胁。

### 1 鲑鱼的生命周期

洄游性鲑鱼的生活史是自然演化中最为壮丽的生物学篇章之一，其生命历程跨越淡水与海洋两大生态系统，展现了物种对环境适应的精妙策略与生命延续的终极逻辑。这一生命循环始于清澈冷冽的溪流上游，亲鱼在秋冬季节凭借本能回溯至出生水域，雌鱼以尾鳍在砾石河床中掘出产卵坑，将卵粒藏匿于石块间隙，雄鱼随后释放精子完成受精，并以细沙覆盖卵群以抵御水流冲刷与捕食威胁。受精卵在低温流水的包裹中开启发育进程，依赖卵黄内储存的营养缓慢生长，数月至数周的孵化期内，胚胎对溶氧浓度与水温的微妙变化极度敏感，稍有不慎便可能导致整代繁殖的失败。破膜而出的仔鱼仍蜷缩于砾石缝隙，直至卵黄耗尽才以稚鱼形态浮出，体侧标志性的幼鲑斑纹在流动光影中形成天然伪装，使其在捕食者环伺的浅滩中赢得生存窗口。此时的溪流成为生命最初的训练场，幼鱼通过摄食水生昆虫与浮游生物积累能量，同时发展出对水流动态的敏锐感知，为即将到来的史诗性迁徙埋下伏笔<sup>[1]</sup>。

当生理时钟与季节信号同步，一场深刻的形态与机能变革悄然启动——银化过程赋予体表金属光泽，鳃部离子调节细胞大量增殖，肾脏浓缩机能重塑，这些变化共同构成降海洄游的生理基础<sup>[2]</sup>。幼鲑顺流而下穿越蜿蜒河道，在河口咸淡水交汇处经历渗透调节系统的终极考验，短短数日内，其体内盐度平衡机制从淡水模式切换至海洋模式，这种生理转型的成败直接划分出个体命运的鸿沟。进入广袤海洋后，鲑鱼化为贪婪的摄食机器，追逐磷虾群与小型鱼类，在寒暖流交汇的富营养海域快速生长，体长与体重以指数级攀升，而海洋深处的磁场线索与母河化学印记如同无形缆绳，始终牵引着其跨洋巡游的路径。

数载海洋生涯后，性成熟个体启动宿命般的溯河洄游，这场归途是能量消耗的残酷方程式——消化器官退化萎缩，肌肉与脂肪储备全数转化为逆流而上的动力，皮肤色素沉积加剧，骨骼因钙质流失而脆弱，所有生理机能皆服务于生殖使命<sup>[3]</sup>。在激流中，鲑鱼以精确的导航能力穿越水坝、瀑布等物理障碍，嗅觉记忆引导其辨识出生流域的独特水化学特征，即便历经数千公里漂流仍能锚定目标。当最终抵达产卵场，亲鱼以垂死之躯重复祖先的繁殖仪式，受精卵沉入砾石层的瞬间，其生命能量也以残体形式回归淡水系统，成为滋养河流生态的营养源泉<sup>[4]</sup>。

### 2 鲑鱼的生态功能

鲑鱼作为淡水与海洋生态系统间的关键生态纽带，其生命活动构建起跨越地理边界的物质循环与能量流动网络，在维系生态平衡与生物多样性方面展现出不可替代的功能价值。从胚胎发育于砾石河床到海洋索饵生长，最终以残体回归淡水系统的完整生命周期中，鲑鱼通过生物泵效应驱动氮、磷等营养元素的跨介质传输<sup>[5-6]</sup>；海洋阶段积累的富营养生物质在其溯河洄游时被带入淡水流域，死亡个体经分解作用释放的有机质不仅滋

养藻类与无脊椎动物，更通过地下水渗透与鸟类携带等途径扩散至沿岸森林，形成独特的“鲑源性营养流”。这种营养传输机制在贫营养的寒带河流中尤为显著，鲑鱼种群的存在直接决定河口水域初级生产力水平与底栖生物群落结构，其丰度波动会引发从浮游动物到顶级捕食者的级联反应。

当前生态修复实践虽通过人工增殖放流、鱼道改造等措施局部恢复种群数量，却尚未重建其完整的生态功能网络——人工放流个体因缺乏自然迁徙记忆常出现导航失误，而混凝土鱼道虽保障了物理连通性，却难以复现自然河道中水流-底质-生物互作的复杂生境条件。未来生态系统管理需超越物种保护的传统范式，着眼于鲑鱼驱动的跨界物质循环重建，例如在流域规划中预留营养走廊、设计仿生鱼道模拟自然水动力条件等，以此恢复其在能量传输、栖息地营造及生物多样性维持方面的多维功能<sup>[7-9]</sup>。

### 3 淡水-海洋耦合系统

作为全球温带至寒带水域最具标志性的跨界迁徙物种，洄游性鲑鱼通过其独特的生活史策略构建起淡水与海洋生态系统间的动态耦合网络，这一生物桥梁作用在地球生物地球化学循环和生态系统服务供给中占据着不可替代的生态位。从胚胎期蛰伏于高山溪流的砾石层，到海洋索饵期的跨洋迁徙，最终以死亡个体将海洋源性营养物质输送回淡水系统，鲑鱼的生命轨迹实质上构成了一条跨越介质屏障的生物传输通道——其幼体降海阶段携带的淡水生态印记（如特定同位素特征）成为海洋食物网的能量输入源，而成熟个体的溯河洄游则将海洋富集的氮、磷等元素以生物载体形式注入贫营养的河流系统，形成独特的“鲑鱼驱动型营养泵”<sup>[10]</sup>。

鲑鱼种群的存在深刻重构着水域物理环境与生物群落协同演化的路径：其产卵行为引发的底质搅动增强河床透氧性，为底栖无脊椎动物创造微生境多样性；海洋阶段昼夜垂直迁移行为加速碳粒子向深海的沉降，而洄游途中激起的湍流涡旋成为水生昆虫幼虫的避难所与扩散载体。在生态系统服务维度，鲑鱼种群既是沿海社区蛋白质获取的传统来源，更是维系原住民文化认同的精神图腾，其丰度波动直接关联着流域渔业经济稳定性与生态旅游价值。

### 4 鲑鱼与营养传输

作为淡水与海洋生态系统间最具标志性的跨界生物媒介，洄游性鲑鱼在其生命周期中通过捕食与被捕食的双重角色，构建起贯穿水陆界面的复杂营养级联网络，这种动态互作不仅塑造了从深海至高山森林的生态格局，更成为维系生物地球化学循环的关键驱动力。在海洋索饵阶段，鲑鱼作为次级消费者通过选择性摄食调控中层水域的浮游动物群落结构，其昼夜垂直迁移行为形成生物泵效应，将表层富集的碳与氮向深海输送，而排泄物中未被吸收的磷酸盐则刺激深海微生物的活性，这种上行控制与下行控制的耦合作用维持着海洋食物网的稳定性；当鲑鱼集群穿越河口进入淡水系统时，其庞大的生物量瞬时转化为顶级捕食者的能量来源——灰熊、白头海雕等陆地捕食者通过

季节性集中捕食调整种群空间分布,其未被完全消耗的鲑鱼尸体吸引食腐昆虫与微生物群落,后者通过代谢活动将海洋源性营养元素转化为植物可利用形态<sup>[9-10]</sup>。

溯河过程中的鲑鱼同时承受多重捕食压力:海洋阶段的虎鲸利用声呐系统追踪洄游群体,其捕食行为间接调控鲑鱼种群年龄结构,促使个体加速性成熟以规避风险;淡水环境中的水獭与河鳟则通过选择性猎杀体能较弱的个体,强化鲑鱼种群的游泳性能与免疫适应性。这种捕食者驱动的自然选择压力与鲑鱼的生理响应形成协同进化机制。

## 5 跨界生态系统

在全球生态系统的宏大叙事中,洄游性鲑鱼以其独特的生命轨迹编织着淡水与海洋两大生态界面的物质能量网络,这种跨界交互不仅是生物地理学层面的空间突破,更是生态系统功能整合的典范。从胚胎在溪流产卵床的发育到海洋索饵期的跨洋迁徙,最终以死亡个体将海洋富集的生物物质输送回淡水系统,鲑鱼的生命周期本质上构成了一条动态的生物地球化学传输通道。

人类干扰的多重压力因子的叠加效应正系统性瓦解这种精密的跨界交互网络。水电站建设导致的洄游阻断不仅造成种群数量衰减,更截断了运行万年的营养传输通道;海洋养殖场逃逸的鲑鱼与野生种群杂交引发的基因渗透,削弱了本地种群对特定流域水文节律的遗传适应性;微塑料与药物残留通过生物累积效应沿食物链传递,在北极狐肝脏与白头海雕卵壳中检出的抗抑郁药物浓度已达生态毒理阈值。更具隐蔽性的是气候变化引发的物候失配——海洋表面温度升高迫使鲑鱼改变索饵海域,打乱其能量积累与生殖洄游的生理同步性,而融雪提前导致春季洪峰与幼鲑降海窗口期错位直接印证了气候-水文-生物耦合系统的脆弱性。

## 6 结语

气候变化与人类活动的叠加效应正使这一古老而精密的生态耦合机制面临前所未有的解构风险。水电开发、海岸带城市化等工程干预不仅直接阻断洄游通道,更割裂了万年尺度上形成的物质交换节律;海洋酸化与微塑料污染则从分子层面侵蚀鲑鱼的生理适应阈值,进而动摇其作为跨界介质的功能稳定性。此类干扰的连锁效应已超越生态范畴——原住民文化中与鲑鱼共生的传统知识体系加速流失,流域社区经济模式被迫转型,暴露出生态功能退化与社会系统脆弱性的深度关联。

未来的生态修复与管理需跳出“物种保护-生境恢复”的二元框架,转向以过程重建为核心的跨界治理范式。这要求整合河流地貌学、生物地球化学与社会生态学的交叉视角:通过模拟自然水文脉冲重建鲑鱼驱动的营养传输节律,利用生态工程手段恢复河床-河岸带-地下水三界面的物质交换效率,同时将原住民的传统实践智慧(如季节性捕捞禁忌、神圣产卵场保护)纳

入适应性管理策略。

## [参考文献]

[1]郭贵良,郑伟,王桂芹,等.滞留型马苏大马哈鱼苗种阶段的银化现象及应用前景简述[J].中国水产,2025,(03):69-70.

[2]Ueda H.(2011).Physiological mechanism of homing migration in Pacific salmon from behavioral to molecular biological approaches.General and comparative endocrinology,170(2):222-232.

[3]Momsen T.P.(2004).Salmon spawning migration and muscle protein metabolism: the August Krogh principle at work. Comparative biochemistry and physiology. Part B, Biochemistry & molecular biology,139(3),383-400.

[4]Ueda H.(2012).Physiological mechanisms of imprinting and homing migration in Pacific salmon *Oncorhynchus* spp. Journal of fish biology,81(2),543-558.

[5]Nahon S,SéITé S,Kołasinski J,et al.Effects of euthanasia methods on stable carbon ( $\delta$ (13)C value)and nitrogen( $\delta$ (15)N value)isotopic compositions of fry and juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*[J].Rapid Commun Mass Spectrom,2017,31(20):1742-8.

[6]Kovach R P,Gharrett A J,Tallmon D A.Temporal patterns of genetic variation in a salmon population undergoing rapid change in migration timing[J].Evol Appl,2013,6(5):795-807.

[7]Helfield J M,Naiman R J. Effects of Salmon-derived Nitrogen on Riparian Forest Growth and Implications for Stream Productivity[J].Ecology,2001,82(9):2403-9.

[8]Furey N B,Armstrong J B,Beauchamp D A,et al.Migratory coupling between predators and prey[J].Nat Ecol Evol,2018,2(12):1846-53.

[9]Gresh T,Lichatowich J,Schoonmaker P. An Estimation of Historic and Current Levels of Salmon Production in the Northeast Pacific Ecosystem: Evidence of a Nutrient Deficit in the Freshwater Systems of the Pacific Northwest[J].Fisheries,2000,25(1):15-21.

[10]Hanson N,Fogel M,Fong D W,et al.Marine nutrient transport: anadromous fish migration linked to the freshwater amphipod *Gammarus fasciatus*[J].Canadian Journal of Zoology,2010,88(6):546-52.

## 作者简介:

孙诗涵(2000--),女,汉族,天津人,硕士在读,研究方向:水生生物学。

李楠(1999--),女,汉族,黑龙江绥化人,硕士在读,研究方向:微生物学。