



# 演化的妙笔：从鱼鳍到感知器官的转型

林强<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院南海海洋研究所, 热带海洋生物资源与生态重点实验室, 海洋生物多样性与生态演化中心, 广州 510301

2. 中国科学院大学, 北京 101408

\* 联系人, E-mail: [linqiang@scsio.ac.cn](mailto:linqiang@scsio.ac.cn)

收稿日期: 2024-12-18; 接受日期: 2025-01-24; 网络版发表日期: 2025-02-27

在生物演化过程中, 器官也常常会在动态变化中获得全新的功能。最典型的例子是羽毛, 它最初可能仅作为保温结构, 后来逐步演变成了飞行器官。类似地, 脊椎动物的肺部负责空气呼吸功能, 而真骨鱼类具有与肺同源的鱼鳔, 不仅能调节浮力, 还参与听觉功能。这种在原有功能基础上演化出新功能的现象, 被称为扩展适应(exaptation)。该术语由古生物学家Stephen Jay Gould和Elisabeth Vrba于1982年提出, 用以取代含义较为模糊的“预适应”(pre-adaptation)一词<sup>[1]</sup>。近年来, 国内外科学家们在解析动物新性状起源的遗传机制方面取得了显著进展, 如鸟类羽毛的形成<sup>[2]</sup>、脊椎动物肝脏的起源<sup>[3]</sup>以及海马育儿袋的演化<sup>[4]</sup>等。尽管如此, 关于已有器官如何获得新功能的机制, 我们的认知仍然十分有限。

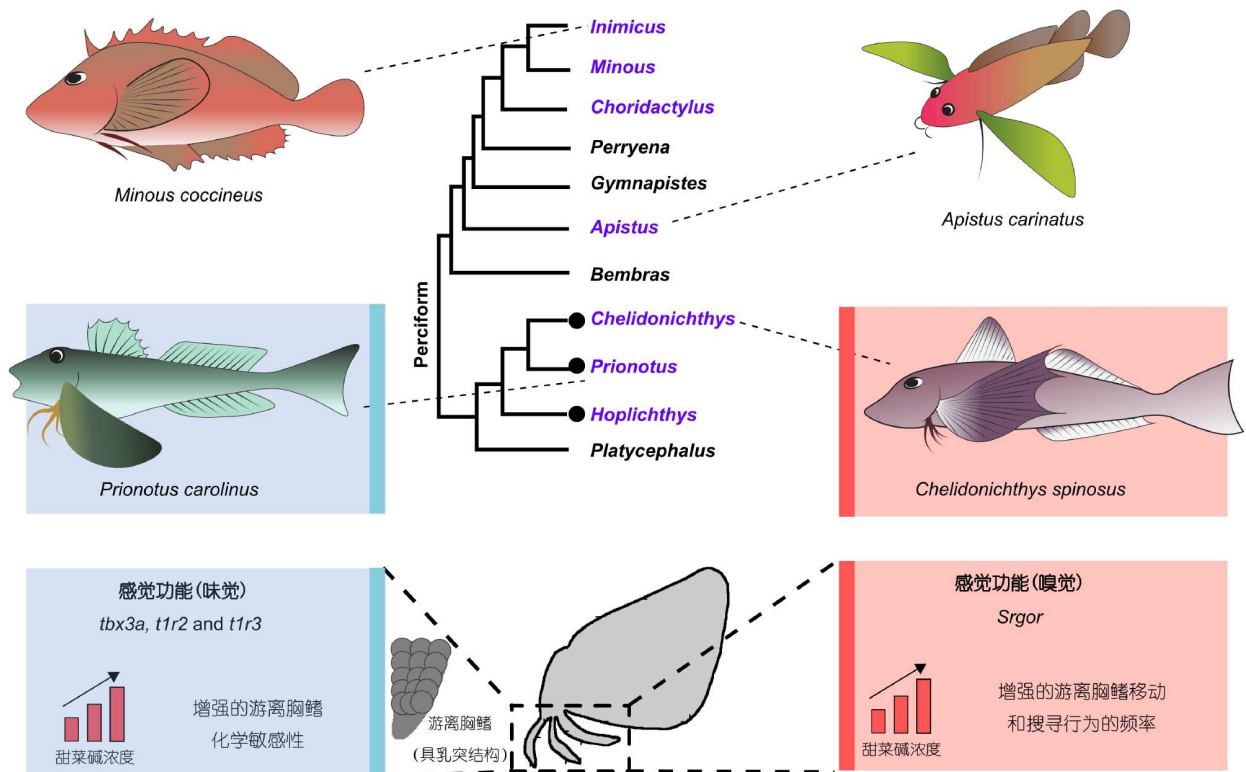
脊椎动物的偶鳍(paired-fin, 即四足动物四肢的祖先形态)提供了器官功能多样化演化的经典范例。从最初的游泳功能, 到后来发展出行走、飞翔、捕猎、挖掘和攀爬等多种用途, 展现了器官功能演化的惊人潜力。其中最令人惊叹的是, 某些鱼类的胸鳍甚至演化出了味觉感知能力。这种鱼类来自底栖的鲂鲱亚目, 具备独特的游离胸鳍结构(leg rays或free pectoral fin rays), 能够用于其在沙砾中进行挖掘, 同时还能够感知味觉, 协助其探测潜在的猎物以及有威胁的捕食者。先前研究发现, 卡罗来纳锯鲂鲱(*Prionotus carolinus*)胸鳍中的孤化学感官细胞(solitary chemosensory cells,

SCCs)能够感知水溶性氨基酸, 这种能力与其觅食行为密切相关<sup>[5,6]</sup>。而近期在*Current Biology*上背靠背发表的两篇关于锯鲂鲱的研究进一步揭示, 鲂鲱科(Triglidae)鱼类的感知能力存在种间差异<sup>[7,8]</sup>。例如, 卡罗来纳锯鲂鲱胸鳍上特有的“乳突”结构赋予了它们增强的机械和化学感知能力(图1), 而同属的带纹锯鲂鲱(*Prionotus evolans*)则不具备这种特征。通过多组学分析, 研究人员发现这一差异与古老的*tbx3a*基因的表达模式密切相关, 该基因是卡罗来纳锯鲂鲱胸鳍获得感知功能的关键调控因子。

在上述两篇论文发表的同时, *Science China Life Sciences*报道了一项关于小眼绿鳍鱼(*Chelidonichthys spinosus*)的重要发现, 为扩展适应理论提供了新的范例<sup>[9]</sup>。虽同属于鲂鲱科, 但绿鳍鱼属与此前研究的锯鲂鲱属有着约五千万年的演化距离。多组学分析发现, 与锯鲂鲱不同, 小眼绿鳍鱼既未演化出特化的乳突结构, 其游离胸鳍中也未检测到典型的味觉相关基因表达。然而, 研究人员在其特定上皮细胞中发现了一个意想不到的“主角”——一个源自硬骨鱼的古老嗅觉受体基因(*srgor*)在其中表达(图1)。但由于主要模式生物斑马鱼在演化过程中丢失了该基因, 其功能长期以来未受到验证。而蛋白质结构模拟分析揭示, 该基因在绿鳍鱼演化历程中经历了关键的转变: 自棘鳍鱼类(Acanthopterygian)共同祖先以来, 累积了两个决定性的氨基酸突变(LYS25和LYS79)。这些突变赋予了该蛋

引用格式: 林强. 演化的妙笔: 从鱼鳍到感知器官的转型. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 832–834

Lin Q. Old parts, new tricks: how fish “legs” became sensing tools (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2025, 55: 832–834, doi: [10.1360/SSV-2024-0356](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0356)



**图 1** 鲈形目鱼类腿状结构的演化及其感官功能机制。演化树包括鲈亚目(以*Minous coccineus*和*Apistus carinatus*为例)和鲈亚目(以小眼绿鳍鱼*Chelidonichthys spinosus*和卡罗来纳锯鲈鳍*Prionotus carolinus*为例)分类下的不同属。新近研究报道了在小眼绿鳍鱼和卡罗来纳锯鲈鳍腿状鳍条的行为学特征以及与感官功能密切相关的基因<sup>[7-9]</sup>。物种和主要结果以蓝色高亮, 代表Herbert等人<sup>[7]</sup>和Allard等人<sup>[8]</sup>的报道。物种和主要结果以红色高亮, 代表Li等人<sup>[9]</sup>的报道。演化树中的黑色实心圆代表鲈亚目物种, 具有腿状鳍条的鱼类的属一级分类名用紫色高亮。Betaine代表不同甜菜碱浓度对鲈亚目物种胸鳍的行为学影响

**Figure 1** Evolution of leg-like structures and mechanisms of their sensory function across the Perciform order. The species tree encompasses various genera belonging to the Scorpaenoidei (exemplified by *Minous coccineus* and *Apistus carinatus*) and Triglinoidei (exemplified by *Chelidonichthys spinosus* and *Prionotus carolinus*). Recently published studies have reported ethological characteristics and genes that are tightly associated with the sensory function of these leg rays in *Chelidonichthys spinosus* and *Prionotus carolinus*<sup>[7-9]</sup>. Species and discoveries highlighted by the blue ribbon represent the outcomes from Herbert et al. (2024)<sup>[7]</sup> and Allard et al. (2024)<sup>[8]</sup>. Species and discoveries highlighted by red ribbon represent the outcomes from Li et al. (2024)<sup>[9]</sup>. The black solid circles in the evolutionary tree represent species within the Triglinoidei suborder. Fish with leg-like structures are highlighted in purple at the genus-level taxonomy. Betaine stands for the impact of varying betaine concentrations on the behavior of leg rays of species belonging to the Triglinoidei suborder

白与甜菜碱(一种重要的水生猎物化学信号分子)结合的能力。等离子共振(SPR)实验证实了这一点: 甜菜碱能够特异性地结合游离胸鳍细胞膜蛋白, 且结合强度随浓度增加而增强。行为学实验进一步支持了这一发现, 与同属鲈形亚类的乌鳢和沙塘鳢相比, 小眼绿鳍鱼对甜菜碱表现出更高频率的搜寻和挖掘行为。该研究不仅揭示了小眼绿鳍鱼通过改造古老嗅觉受体获得化学感知的独特途径, 更展示了不同物种如何通过各

自的分子创新实现类似的适应性功能。

这一系列发现生动展示了演化创新的核心特征: 新功能常常是在既有结构基础上巧妙改造的结果。正如François Jacob提出的“拼凑”演化模式所说, 自然选择并不是从零开始创造, 而是通过调整和重组现有的元件来应对新的适应性挑战<sup>[10]</sup>。锯鲈鳍和绿鳍鱼的例子生动诠释了这一过程, 展现了生命系统如何在分子和形态水平上实现创新突破。

## 参考文献

- Gould S J, Vrba E S. Exaptation—a missing term in the science of form. *Paleobiology*, 1982, 8: 4–15

- 2 Zhang G, Li C, Li Q, et al. Comparative genomics reveals insights into avian genome evolution and adaptation. *Science*, 2014, 346: 1311–1320
- 3 Wu B, Xu W, Wu K, et al. Single-cell analysis of the amphioxus hepatic caecum and vertebrate liver reveals genetic mechanisms of vertebrate liver evolution. *Nat Ecol Evol*, 2024, 8: 1972–1990
- 4 Lin Q, Fan S, Zhang Y, et al. The seahorse genome and the evolution of its specialized morphology. *Nature*, 2016, 540: 395–399
- 5 Whitear M. Cell specialization and sensory function in fish epidermis. *J Zool*, 1971, 163: 237–264
- 6 Silver W L, Finger T E. Electrophysiological examination of a non-olfactory, non-gustatory chemosense in the searobin, *Prionotus carolinus*. *J Comp Physiol*, 1984, 154: 167–174
- 7 Herbert A L, Allard C A H, McCoy M J, et al. Ancient developmental genes underlie evolutionary novelties in walking fish. *Curr Biol*, 2024, 34: 4339–4348.e6
- 8 Allard C A H, Herbert A L, Krueger S P, et al. Evolution of novel sensory organs in fish with legs. *Curr Biol*, 2024, 34: 4349–4356.e7
- 9 Li L S, Fan D Q, Zhu C L, et al. Exaptation of pectoral fins for olfaction in the spiny red gurnard (*Chelidonichthys spinosus*) through an ancient receptor. *Sci China Life Sci*, 2025, 68: 582–585
- 10 Jacob F. Evolution and tinkering. *Science*, 1977, 196: 1161–1166

## Old parts, new tricks: how fish “legs” became sensing tools

LIN Qiang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> CAS Key Laboratory of Tropical Marine Bio-Resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Marine Biodiversity and Ecological Evolution Research Center, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

<sup>2</sup> University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

\* Corresponding author; E-mail: [linqiang@scsio.ac.cn](mailto:linqiang@scsio.ac.cn)

doi: [10.1360/SSV-2024-0356](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0356)