



黄石爬鮡皮肤组织结构观察

倪露芸¹, 林航宇^{1,2}, 邹巧林¹, 李飞扬¹, 喻 焱¹, 刘 艳¹, 赖见生¹, 刘 亚^{1*}

(¹四川省农业科学院水产研究所/四川省水产研究所, 四川成都 611731; ²西南大学水产学院, 重庆 400715)

摘要:【目的】系统解析黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤的组织结构、细胞超微特征及黏液细胞和棒状细胞的分布规律,为深入理解其生境适应机制及种质资源保护提供组织学依据。【方法】选取3尾健康雌性成鱼,采集背部、腹部和尾部皮肤组织,经苏木精—伊红和阿利辛蓝—过碘酸雪夫染色后使用光学显微镜和透射电子显微镜进行观察;采用ImageJ对黄石爬鮡背部、腹部及尾部皮肤的表皮层与真皮层厚度、黏液细胞和棒状细胞数量进行定量分析。【结果】黄石爬鮡皮肤无鳞片,由表皮层、真皮层和皮下层构成,背部与尾部皮肤真皮层含色素细胞,腹部皮肤皮下层富含脂肪组织。透射电子显微镜观察结果显示,表皮层中可见上皮细胞,且上皮细胞游离端有较多指纹状微嵴;上皮细胞间可见丰富的桥粒连接;真皮中层可见成纤维细胞,其旁可见胶原纤维呈束状紧密排列。表皮层厚度表现为腹部>背部>尾部,背部和腹部真皮层厚度显著大于尾部($P<0.05$,下同),背部与腹部真皮层厚度差异较小,尾部真皮层厚度最小。黏液细胞主要分布于表皮浅层,以III型黏液细胞为主,并可见少量II型和IV型黏液细胞。背部皮肤黏液细胞数量显著多于腹部和尾部皮肤,黄石爬鮡各部位皮肤间棒状细胞数量无显著差异($P>0.05$)。【结论】黄石爬鮡的无鳞皮肤通过表皮增厚、黏液细胞以III型为主及棒状细胞均匀分布等特征,协同构建了适应急流砾石生境的物理屏障与化学防御体系。黄石爬鮡不同部位皮肤的结构与细胞分布差异,是对水流冲击和底质摩擦等差异化外界胁迫的功能性响应。

关键词:黄石爬鮡; 皮肤; 显微结构; 超微结构

中图分类号: S917.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-1191(2026)06-1709-09

Skin histological structure observation of *Euchiloglanis kishinouyei*

NI Lu-yun¹, LIN Hang-yu^{1,2}, ZOU Qiao-lin¹, LI Fei-yang¹, YU Yi¹, LIU Yan¹,
LAI Jian-sheng¹, LIU Ya^{1*}

(¹Fisheries Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Sichuan Fisheries Research Institute, Chengdu, Sichuan 611731, China; ²College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to systematically characterize the histological structure, cellular ultrastructural features, and distribution patterns of mucous cells and club cells in dorsal, abdominal, and tail skin of *Euchiloglanis kishinouyei*, thereby providing histological evidence for elucidating its habitat adaptation mechanisms and supporting germplasm resource conservation. 【Method】 Three healthy adult female fish were selected, and their skin tissues were collected from the dorsal, abdominal, and tail regions. The samples were examined by light microscope and transmission electron microscope after hematoxylin-eosin staining (HE) and Alcian blue-periodic acid Schiff staining (AB-PAS). ImageJ was used to conduct quantitative analysis on the thickness of epidermal and dermal layers, as well as the numbers of mucous cells and club cells in the dorsal, abdominal, and tail skin. 【Result】 The skin of *Euchiloglanis kishinouyei* was scaleless and consisted of the epidermis, dermis, and subcutaneous layer. Pigment cells were present in the dermis of dorsal and tail skin, whereas adipose tissue was abundant in the subcutaneous layer of abdominal skin. Transmission electron

收稿日期: 2025-11-10

基金项目: 国家现代农业产业技术体系四川淡水鱼创新团队项目(SCCXTD-2025-15); 四川省科技计划项目(2021YFYZ0015); 四川省农业科学院“1+9”揭榜挂帅科技攻关项目(1+9KJGG004)

通信作者: 刘亚(1982-), <https://orcid.org/0000-0002-2744-9049>, 副研究员, 主要从事珍稀濒危鱼类保护研究工作, E-mail: liuya@scsaas.cn

第一作者: 倪露芸(1994-), <https://orcid.org/0009-0006-7899-0181>, 博士, 主要从事水产免疫与病害防控研究工作, E-mail: nluyun123@163.com

microscope observation results revealed that the epithelial cells in the epidermis, with numerous fingerprint-like micro-ridges on the free end of these cells; abundant desmosomal junctions were observed between epithelial cells; fibroblasts were present in the middle dermis, adjacent to densely arranged bundles of collagen fibers. Epidermis thickness was in the order of abdomen > dorsum > tail, and the dermis thickness of dorsal and abdominal skin was significantly greater than that of the caudal skin ($P < 0.05$, the same below), with only a slight difference in thickness between the dorsal and abdominal dermis, while the caudal dermis was the thinnest. Mucous cells were mainly distributed in the superficial epidermis and were dominated by type III mucous cells, with a small number of type II and type IV mucous cells also observed. The number of mucous cells in the dorsal skin was significantly higher than that in the abdominal and tail skin. No significant difference was observed in the number of club cells among the skin at different parts of *Euchiloglanis kishinouyei* ($P > 0.05$). 【Conclusion】The scaleless skin of *Euchiloglanis kishinouyei* contributes to the establishment of a physical barrier and chemical defense system adapted to torrent gravel habitat through coordinated features including epidermal thickening, predominance of type III mucous cells, and relatively uniform distribution of club cells. Differences in skin structure and cellular distribution in different parts of *Euchiloglanis kishinouyei* reflect functional responses to differential external stresses, such as hydraulic impact and substrate abrasion.

Key words: *Euchiloglanis kishinouyei*; skin; microstructure; ultrastructure

Foundation items: Sichuan Fresh Water Fish Innovation Team Project of China Agriculture Research System (SCCXTD-2025-15); Sichuan Science and Technology Plan Project (2021YFYZ0015); “1+9” Science and Technology Project of Sichuan Academy of Agricultural Sciences (1+9KJGG004)

0 引言

【研究意义】皮肤是鱼类与水环境直接接触的第一道生理屏障,不仅承担着机械保护、渗透压调节及气体交换等基础生理功能,还可通过分泌黏液、富集免疫细胞等方式参与机体防御(Ángeles Esteban, 2012; 苏金枝等, 2024)。黄石爬鮡(*Euchiloglanis kishinouyei*)隶属于鲶形目(Siluriformes)鮡科(Sisoridae)石爬鮡属(*Euchiloglanis*),为长江上游特有小型底栖鱼类,主要栖息于金沙江、岷江及大渡河流域等急流砾石生境。其肉质鲜美,兼具高蛋白、低脂肪等特点,具有较高的食用与经济价值。该鱼体表无鳞片覆盖,上颌部及鳍条处皮肤特化形成吸附结构,是适应高原急流环境的典型类群(王聪, 2025)。系统阐释黄石爬鮡皮肤组织结构特征,对揭示其应对急流冲击、机械摩擦及病原侵袭的适应性机制,以及其人工养殖中的疾病防控技术优化与资源保护策略制定具有重要意义。【前人研究进展】鱼类皮肤是鱼体与水环境直接接触的外周屏障,其组织结构和细胞组成与物种分类地位、栖息环境、运动方式及免疫防御需求密切相关。研究表明,鱼类皮肤通常由表皮层、真皮层和皮下组织构成,有些鱼类还具有鳞片这一重要的皮肤衍生结构,其在机械保护、减少体表摩擦和阻挡病原入侵等方面发挥重要作用(吕伟华等, 2021)。与有鳞鱼类不同,无鳞或鳞片退化鱼类体表缺乏鳞片的保护,其表皮直接暴露于水体环境中,因而更依赖表皮厚度、黏液细胞分泌、细胞间连接、真皮胶原纤维及皮肤附属结构等共同维持皮肤屏障的完整性(严太明等, 2014)。鱼类皮肤组织学研究已在高原鳅(*Triplophysa*) (杨淞等, 2017; Ni et al.,

2024)、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*) (陈楚等, 2018)、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*) (何早等, 2025; 黄梁军等, 2025)等多个类群中展开。鱼类皮肤中分布有丰富的黏液细胞,其分泌的黏液可在体表形成连续的黏液膜,不仅有助于降低游泳或贴附移动过程中的体表摩擦和维持渗透压平衡,还可通过黏附、包裹和排出悬浮颗粒及病原微生物发挥物理防御作用;与此同时,鱼类皮肤黏液中含有糖蛋白、黏蛋白、凝集素、抗菌肽、溶菌酶、补体、蛋白酶、免疫球蛋白及多种水解酶等活性物质,可参与抗菌、抗寄生虫、损伤修复和局部免疫调节,是鱼类非特异性免疫防御体系的重要组成部分(Tsutsui et al., 2009; Rajan et al., 2011; Go et al., 2019; Saleh et al., 2019)。此外,硬骨鱼类表皮中已发现巨噬细胞、B细胞、T细胞、粒细胞及树突状细胞等多种免疫细胞,并能产生明显的免疫应答反应(Xu et al., 2013; 王晓萌等, 2025)。虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)经细菌感染后,其皮肤黏膜中的IgT发生自身分泌,且IgT阳性B细胞出现局部增殖,表明鱼类皮肤黏膜具备独立的局部免疫应答机制,并在特异性免疫过程中发挥重要作用(Zhang et al., 2021; 王苗苗等, 2025)。北极鳕鱼(*Boreogadus saida*)和大西洋鳕鱼(*Gadus morhua*)等物种的研究发现,皮肤中的棒状细胞参与化学警报、损伤修复及免疫应答,为鱼类皮肤防御体系研究提供了新视角(Ytteborg et al., 2020)。【本研究切入点】目前,针对黄石爬鮡的研究多集中于资源评估、消化系统组织学及血液学等方面(王永明等, 2015; 杨淞等, 2015; 颜涛等, 2022),而针对其皮肤组织学的系统性研究仍较为匮乏。【拟解决的关键问题】采用苏木精—伊红(HE)和阿

利辛蓝—过碘酸雪夫(AB-PAS)染色并结合光学显微镜和透射电子显微镜观察,从显微与超微结构2个维度揭示黄石爬鮠背部、腹部和尾部皮肤的组织结构、超微特征及黏液细胞和棒状细胞的分布规律,旨在为深入理解黄石爬鮠的生境适应机制及其种质资源保护提供组织学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试黄石爬鮠采集自四川省大渡河流域,选取雌性成鱼3尾,体长为 18.5 ± 2.3 cm,体质量为 126.3 ± 18.5 g。经MS-222麻醉后,分别于背部、腹部和尾部剪取1 cm×1 cm的皮肤组织块(图1)。动物试验由四川省农业科学院水产研究所动物伦理委员会批准,批准号20251103001A。

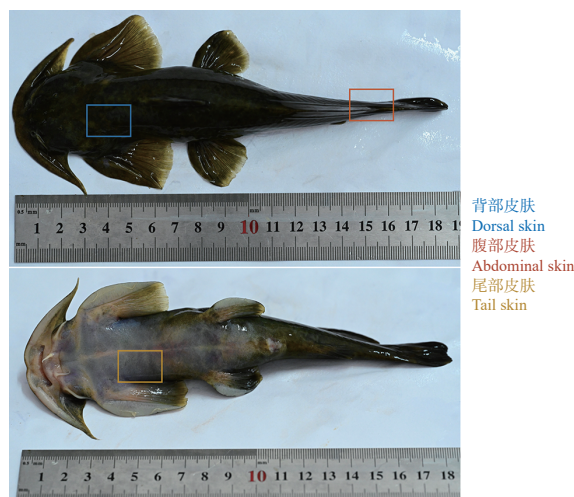


图1 皮肤采集部位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of skin sampling parts

1.2 光学显微镜样本制备

将皮肤组织块置于4%多聚甲醛中室温固定8~24 h。待组织充分固定后,弃固定液,经梯度酒精逐级脱水;随后转移至50%二甲苯与50%酒精混合液、二甲苯中透明,具体时间视组织大小而定;之后将组织移入65℃热石蜡中透蜡并包埋。将包埋蜡块切成厚度为5 μm的切片,脱蜡后依次于100%、95%、85%和75%酒精中复水5 min,自来水冲洗。采用HE和AB-PAS染色进行组织学观察,中性树胶封片后使用光学显微镜(徕卡微系统股份公司)对石蜡切片进行观察,使用SQS-40R切片扫描系统进行全景扫描成像。

1.3 电子显微镜样本制备

采集的各部位皮肤组织于2.5%戊二醛中4℃固定过夜,经PBS缓冲液冲洗后,以1%四氧化锇再

固定;经丙酮逐级脱水后,使用Epoxy 812树脂渗透并包埋。制备超薄切片(厚度60~90 nm),将切片平铺于铜网上,室温下以醋酸铀及柠檬酸铅染色。使用JEM-1400FLASH透射电子显微镜观察并采集图像。

1.4 皮肤指标测量

采用ImageJ对背部、腹部及尾部皮肤的表皮层与真皮层厚度进行定量分析(选取各部位中间厚度的代表性区域),每个部位进行3次重复;同时在10倍镜下测定皮肤组织截面面积,并统计其中黏液细胞与棒状细胞数量,结果换算为每0.01 mm²皮肤组织截面中的细胞数量,每个样本计数3个视野。图像处理采用Adobe Photoshop CS6完成。

1.5 统计分析

使用R语言统计试验数据并进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 黄石爬鮠皮肤的显微结构

黄石爬鮠体表无鳞片,背部与尾部皮肤呈深褐色,腹部皮肤颜色较浅。从分层结构来看,3个部位的皮肤均由表皮层、真皮层及皮下层构成(图2)。表皮层中分布有丰富的黏液细胞和棒状细胞;黏液细胞呈圆形、椭圆形或杯状,大小不一,HE染色呈浅蓝色;棒状细胞广泛分布于各部位皮肤表皮深层,体积明显大于黏液细胞,细胞核较小,HE染色呈浅粉色。真皮层位于表皮层之下,由纤维结缔组织构成;背部与尾部皮肤真皮层中可见色素细胞分布,腹部皮肤未见色素细胞。腹部皮肤皮下层存在大量脂肪组织,呈较多空泡样结构,而背部与尾部皮肤皮下层脂肪组织较少,尾部皮肤皮下层与肌肉组织连接较为紧密。

2.2 黄石爬鮠背部皮肤的超微结构

透射电子显微镜观察结果显示,背部、腹部和尾部皮肤超微结构相似,表皮层与真皮层之间基膜结构清晰(图3-A),基膜作为表皮层与真皮层的连接结构,对维持皮肤组织稳定性具有重要作用。表皮层中可见上皮细胞,细胞及细胞核均呈扁平状,上皮细胞游离端有较多指纹状微嵴(图3-B)。还可观察到较大的黏液细胞,呈卵圆形,胞质内充满黏原颗粒,胞核被挤向一侧(图3-C)。上皮细胞间可见丰富的桥粒连接(图3-D),除发挥机械连接作用外,还可阻挡细胞外分子物质经细胞间隙进入组织。真皮中层可见成纤维细胞,细胞呈梭形,细胞核较大,几乎占据整个细胞,其旁可见胶原纤维呈束状紧密排列,交织成网状(图3-E)。此外,还可观察到色素细胞,

胞内含有大量色素颗粒(图3-F)。

2.3 黄石爬鮡不同部位皮肤厚度比较结果

对黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤表皮层与真皮层厚度的测量结果(图4)显示,不同部位表皮层厚度存在一定差异,其中腹部表皮层厚度最大,背部次之,尾部最小,腹部和背部表皮层厚度显著大于尾部($P<0.05$,下同)。在真皮层厚度方面,背部和腹部真皮层厚度显著大于尾部,背部与腹部真皮层厚度差异较小,尾部真皮层厚度最小。

2.4 黄石爬鮡不同部位黏液细胞和棒状细胞的分布特征

AB-PAS 染色结果(图5)显示,黄石爬鮡背部、腹部和尾部黏液细胞主要分布于表皮浅层,呈圆形或椭圆形,以III型黏液细胞为主(紫红色),并可见少量II型(蓝色)和IV型(蓝紫色)黏液细胞。棒状细胞经AB-PAS 染色呈阴性反应。

对黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤中黏液细胞

和棒状细胞的计数结果(表1)显示,背部皮肤黏液细胞数量显著多于腹部和尾部皮肤,尾部皮肤黏液细胞数量最少;黄石爬鮡各部位皮肤间棒状细胞数量无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

水环境中富含各类病原微生物,鱼类皮肤作为抵御外界病原体入侵的第一道屏障,具有至关重要的作用(Magnadottir, 2010)。研究证实,鱼类皮肤作为与水环境直接接触的外周屏障,其组织结构与物种栖息环境、生活习性及生理需求高度适应(吕伟华等, 2021)。黄石爬鮡皮肤覆盖整个躯体外部,由表皮层、真皮层和皮下层组成,这一结构与似鲇高原鳅(*Triplophysa siluroides*)和玫瑰高原鳅(*Triplophysa rosa*)等无鳞鱼类一致(杨淞等, 2017; Ni et al., 2024)。作为皮肤的衍生物,鳞片具有保护身体、减少游动摩擦及防御病原侵害等功能(严太明等, 2014)。不同于大口黑鲈、虹鳟等有鳞鱼类,以及泥

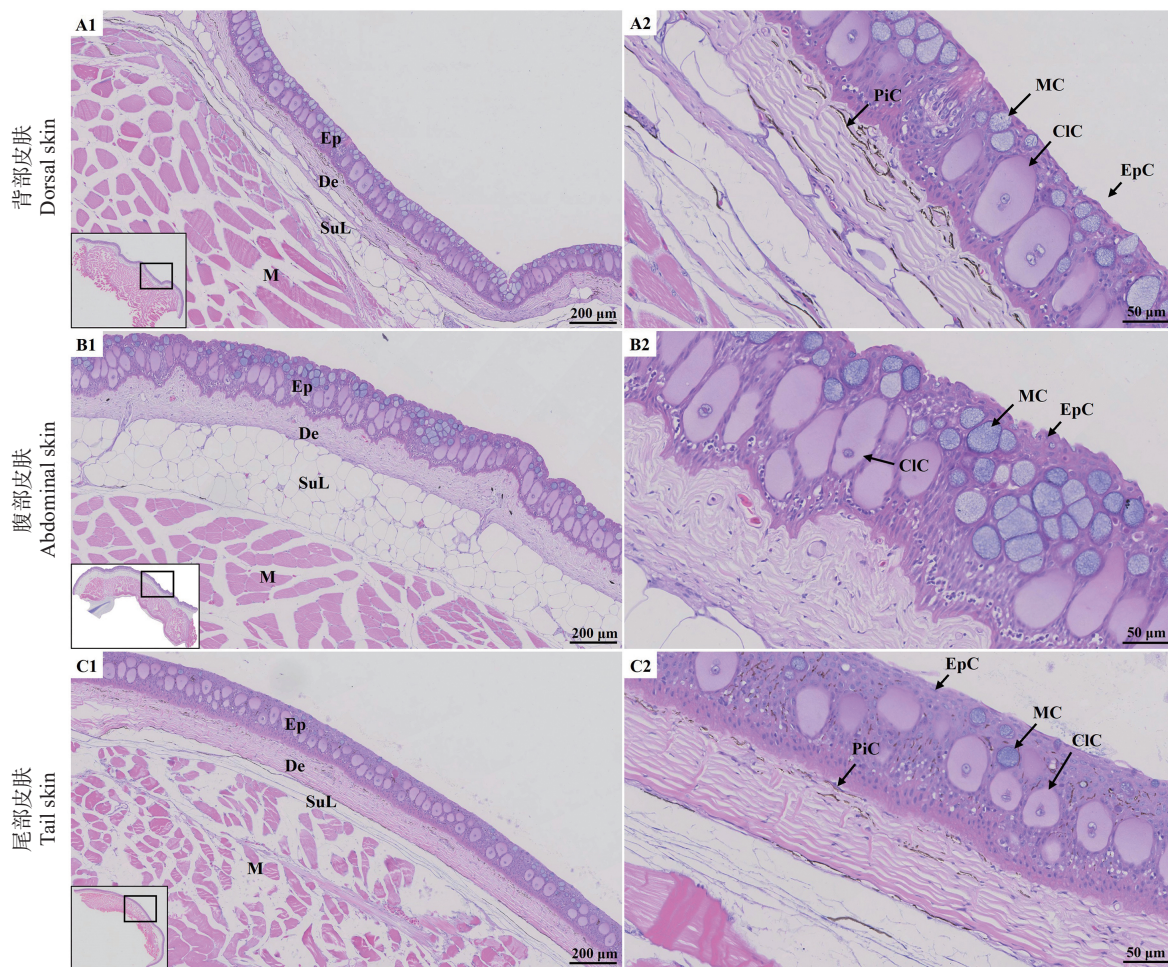


图2 黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤的显微结构

Fig. 2 Microstructure of dorsal, abdominal, and tail skin of *Euchiloglanis kishinouyei*

CIC: 棒状细胞; De: 真皮层; Ep: 表皮层; M: 肌肉; MC: 黏液细胞; PiC: 色素细胞; SuL: 皮下层; EpC: 上皮细胞

CIC: Club cell; De: Dermis; Ep: Epidermis; M: Muscle; MC: Mucous cell; PiC: Pigment cell; SuL: Subcutaneous layer; EpC: Epithelial cell

鮡(*Misgurnus anguillicaudatus*)等鳞片细小且埋藏于皮下的鱼类,黄石爬鮡皮肤直接接触外界环境,可能是其适应急流砾石生境的独特特征。在急流环境中,鳞片可能增加鱼体游动时的水流阻力,而无鳞皮肤可减少体表凸起,尾部较薄的皮肤尤其有利于提升尾部摆动的灵活性与力量传导效率,辅助其在复杂砾石间快速游动。此外,黄石爬鮡上颌部及鳍条部位皮肤特化为吸附结构,是适应高原溪流环境的典型特征,该特化皮肤通过表皮微嵴增强机械附着

力,有助于其在砾石环境中稳定栖息并抵御水流冲击(王聪,2025)。透射电子显微镜观察发现,黄石爬鮡皮肤上皮细胞游离端具有较多指纹状微嵴,细胞间存在丰富的桥粒连接,真皮层中含束状排列的胶原纤维,这些结构共同保障了皮肤的机械稳定性与屏障完整性。

黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤中均分布有丰富的黏液细胞。根据AB-PAS染色结果,鱼类黏液细胞可分为四型:I型呈红色,PAS染色阳性,主要含

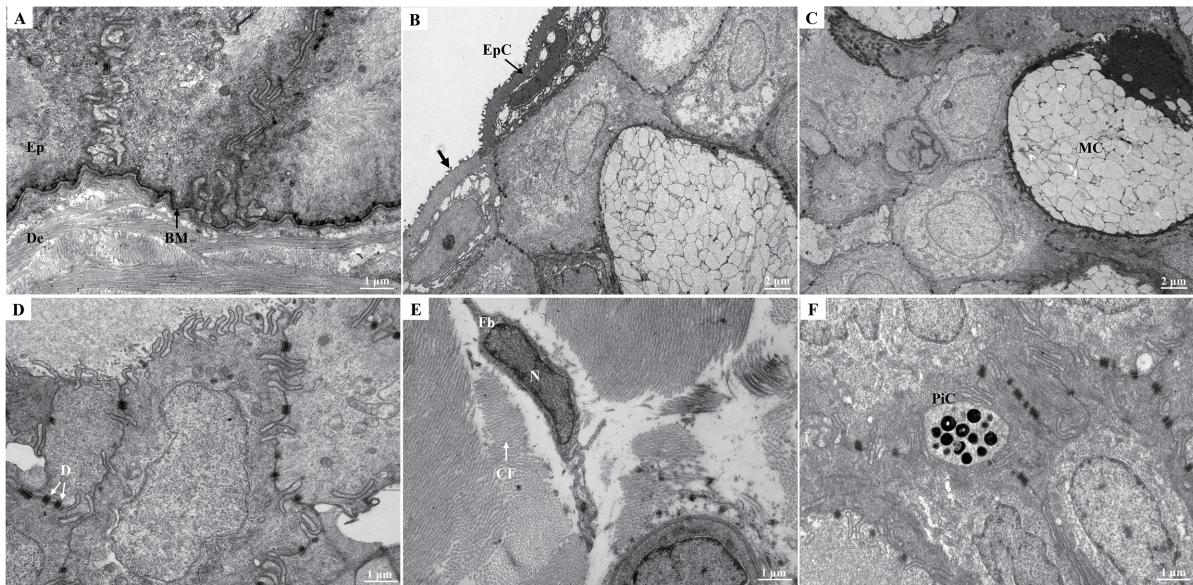


图3 黄石爬鮡背部皮肤的超微结构

Fig. 3 Ultrastructure of dorsal skin of *Euchiloglanis kishinouyei*
BM: 基膜; CF: 胶原纤维; D: 桥粒; De: 真皮层; EpC: 上皮细胞; Fb: 成纤维细胞; MC: 黏液细胞; N: 细胞核; Ep: 表皮层; PiC: 色素细胞; 黑色箭头表示微嵴
BM: Basement membrane; CF: Collagen fiber; D: Desmosome; De: Dermis; EpC: Epithelial cell; Fb: Fibroblast; MC: Mucous cell; N: Nucleus; Ep: Epidermis; PiC: Pigment cell; black arrows represented microridges

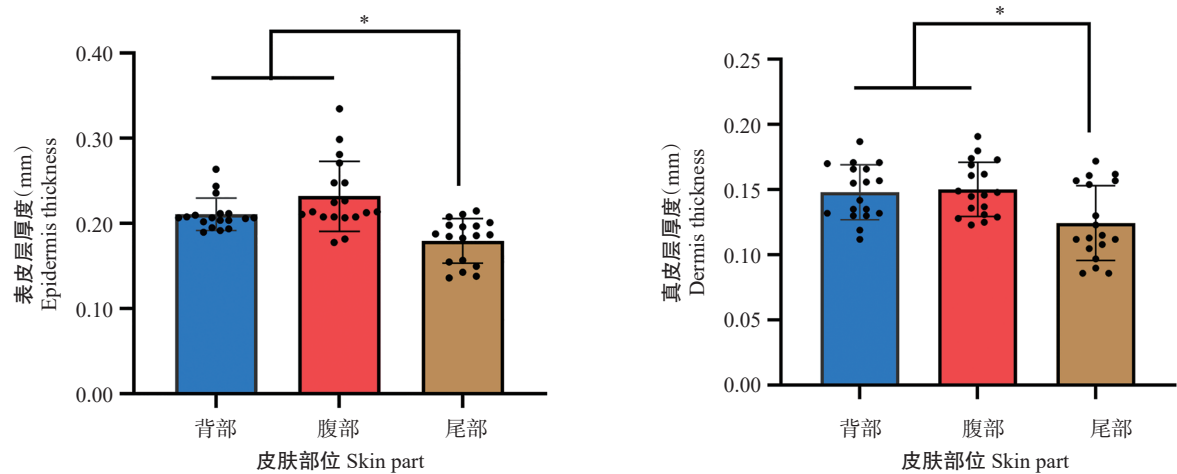


图4 黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤厚度比较结果

Fig. 4 Comparison of skin thickness in dorsum, abdomen, and tail of *Euchiloglanis kishinouyei*
*表示差异显著($P<0.05$)
* indicated significant difference ($P<0.05$)

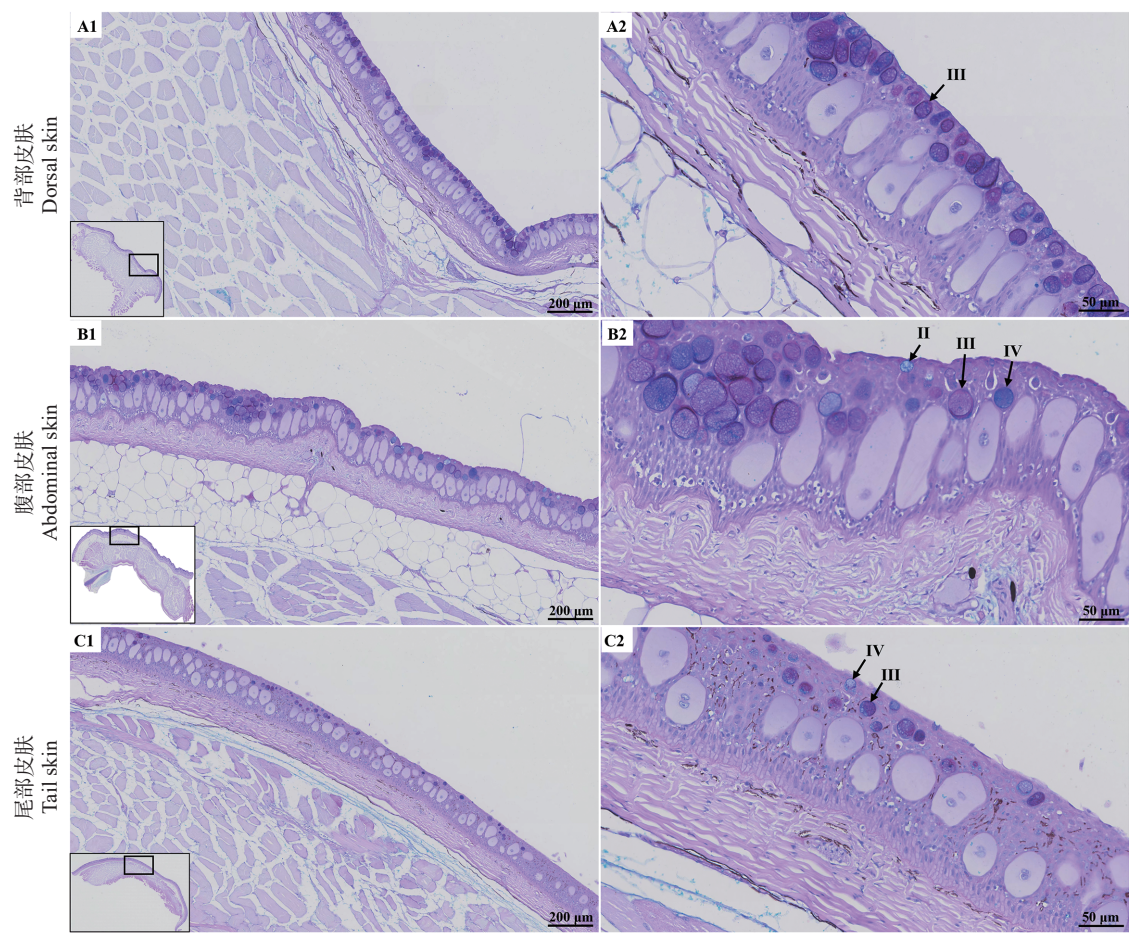


图5 黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤AB-PAS染色结果

Fig. 5 AB-PAS staining results of dorsal, abdominal, and tail skin of *Euchiloglanis kishinouyei*

II: II型黏液细胞; III: III型黏液细胞; IV: IV型黏液细胞

II: Type II mucous cell; III: Type III mucous cell; IV: Type IV mucous cell

表1 黄石爬鮡皮肤黏液细胞和棒状细胞数量的统计结果

Table 1 Statistical results of numbers of mucous cells and club cells in skin of *Euchiloglanis kishinouyei*

类别 Type	背部 Dorsum	腹部 Abdomen	尾部 Tail
黏液细胞数量 Number of mucous cell	3.09±0.55a	2.51±0.31b	1.25±0.12c
棒状细胞数量 Number of club cell	1.37±0.51	1.22±0.11	1.49±0.23

同行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase letters in the same row indicated significant difference ($P<0.05$)

中性黏蛋白; II型呈蓝色, AB染色阳性, 主要含酸性黏蛋白; III型呈紫红色, AB与PAS染色均阳性, 主要含中性黏蛋白及少量酸性黏蛋白; IV型呈蓝紫色, AB与PAS染色均阳性, 主要含酸性黏蛋白及少量中性黏蛋白(李艳菲等, 2020)。本研究结果显示, 黄石爬鮡皮肤黏液细胞以III型黏液细胞为主, 另有少量II型和IV型黏液细胞分布, 表明其黏液细胞主要含中性黏多糖和部分酸性黏多糖, 与葛氏鲈塘鳢(*Percottus glenii*)的研究结果相似(陈楚等, 2018)。不同于大口黑鲈、欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)等鱼类, 本研究未在黄石爬鮡皮肤中观察到I型黏液细胞; 此外, 黄颡鱼体表黏液细胞以I型黏液细胞为主, 泥鳅

则以II型黏液细胞为主(林旋等, 2008; 陈楚等, 2018; 何早等, 2025)。不同类型黏液细胞的分布特征在不同鱼类间差异明显, 与种类特性及栖息环境等多种因素相关。黏液细胞分泌的黏液中含有抗菌蛋白、溶菌酶、补体等多种活性物质, 能有效抵御病原微生物, 并参与非特异性免疫防御; 同时, 大量研究证实硬骨鱼类表皮中存在巨噬细胞、B细胞、T细胞、粒细胞及树突状细胞等多种免疫细胞, 并表现出明显的免疫应答反应(Xu et al., 2013; Zhang et al., 2021)。中性黏多糖可形成黏稠的黏液层覆盖于上皮细胞表面, 发挥保护作用(赵帅等, 2014), 酸性黏多糖则具有一定的抗菌活性, 在免疫防御中发挥重

要功能(Sun et al., 2019)。黄石爬鮡皮肤黏液中含有较多中性黏多糖和部分酸性黏多糖,可能是其长期适应急流生境而形成的功能适配策略,有助于其在复杂底栖急流的环境中生存。

鱼体表不同部位黏液细胞的分布存在较大差异。黄石爬鮡背部皮肤黏液细胞数量显著多于腹部和尾部,尾部最少,这一分布特征可能与其功能相适应。背部皮肤直接面向水流环境,需直接应对悬浮颗粒物冲击及病原微生物接触等多种外界胁迫;腹部常与底质直接接触,较多的黏液有助于减轻因摩擦造成的机械损伤。此外,皮肤厚度是反映皮肤结构基础的重要指标,与鱼类生存环境密切相关。从厚度差异来看,黄石爬鮡腹部表皮层厚度最大,这一结果与黑斑原鮡(*Glyptosternum maculatum*)相似,后者长期生活于雅鲁藏布江水流湍急的砾石河段且为底栖鱼类,其腹部皮肤厚度显著大于背部和头部皮肤(张颖等, 2021)。黄石爬鮡腹部长期与砾石接触,更厚的表皮可增强耐磨能力,减少贴附移动时的机械损伤。表皮棒状细胞已在北极鳕鱼、大西洋鳕鱼、鲑鱼(*Rita rita*)等多种鱼类中被发现(Kumari et al., 2009; Ytteborg et al., 2020)。其体积较大,明显大于黏液细胞,细胞核呈凹陷状且位于细胞中央,部分具有双核,AB-PAS 和 HE 染色均不显色(Pandey et al., 2021)。多数研究将表皮棒状细胞定义为警戒细胞,在捕食者损伤被捕食者皮肤时被动释放化学警报信号,以警告同种个体危险的存在(Halbgewachs et al., 2009)。越来越多的研究显示,棒状细胞可对多种免疫调节剂或环境应激源产生应答,如皮质醇、病原体、机械损伤及紫外线等;同时,棒状细胞内还检测到硫酸软骨素、角蛋白及黏液等多种物质(Chivers et al., 2007; Manek et al., 2012, 2014; Chia et al., 2019)。胖头鮠(*Pimephales promelas*)经水霉感染后表皮棒状细胞密度增加,而露斯塔野鲮(*Labeo rohita*)感染嗜水气单胞菌后表皮棒状细胞密度降低(Pollock et al., 2012; Srivastava et al., 2020),提示棒状细胞可能参与多种免疫功能。本研究结果显示,黄石爬鮡背部、腹部及尾部皮肤中均发现丰富的体积较大的棒状细胞,且3个部位的棒状细胞数量无显著差异,为该物种在复杂急流环境中维持皮肤屏障完整性与免疫防护能力打下了组织学基础。

本研究系统解析了黄石爬鮡背部、腹部和尾部皮肤的组织学特征,为其生境适应机制提供了关键依据,但仍存在一定局限性。受黄石爬鮡资源特性及野外取样条件限制,本研究的样本均为雌性成鱼,

未纳入雄性个体进行对照分析。此外,本研究仅聚焦于躯干核心区域(背部、腹部、尾部)的皮肤适应性特征,未涉及头部和鳍基部等潜在特化区域,未能全面覆盖鱼体各部位皮肤的功能分化。后续研究应在样本获取许可的条件下,补充雄性个体及特殊部位皮肤的组织学分析,进一步完善该物种皮肤适应机制的系统性研究。

4 结论

黄石爬鮡的无鳞皮肤通过表皮增厚、黏液细胞以III型为主及棒状细胞均匀分布等特征,协同构建了适应急流砾石生境的物理屏障与化学防御体系。黄石爬鮡不同部位皮肤的结构与细胞分布差异,是对水流冲击和底质摩擦等差异化外界胁迫的功能性响应。

参考文献(References):

- 陈楚,孙嘉,李滢钰,黄璞玮. 2018. 三种底栖淡水鱼类皮肤黏液细胞分布与数量比较[J]. 动物学杂志, 53(6): 931-937. [Chen C, Sun J, Li Y Y, Huang P Y. 2018. Comparison of the distribution and number of skin mucous cells in three species of benthic freshwater fishes [J]. Chinese Journal of Zoology, 53(6): 931-937.] doi: 10.13859/j.cjz.201806011.
- 何早,马英,刘洪李,黄小丽. 2025. 大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)皮肤组织结构观察[J]. 四川农业大学学报, 43(1): 57-62. [He Z, Ma Y, Liu H L, Huang X L. 2025. Tissue structure of the skin in *Micropterus salmoides* [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 43(1): 57-62.] doi: 10.16036/j.issn.1000-2650.202407493.
- 黄梁军,黄雷,杨娜,蔺凌云,姚嘉赞,陈静,沈锦玉,高迎莉,潘晓艺. 2025. 鲫鱼诺卡氏菌弱毒株对大口黑鲈头肾转录组的影响[J]. 广东海洋大学学报, 45(4): 43-50. [Huang L J, Huang L, Yang N, Lin L Y, Yao J Y, Chen J, Shen J Y, Gao Y L, Pan X Y. 2025. Effects of attenuated *Nocardia seriolae* strain on the head kidney transcriptome of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 45(4): 43-50.] doi: 10.3969/j.issn.1673-9159.2025.04.005.
- 李艳菲,狄桂兰,王宁,裴超,孔祥会. 2020. 鱼类黏液细胞研究进展[J]. 水产科学, 39(1): 143-150. [Li Y F, Di G L, Wang N, Pei C, Kong X H. 2020. Research advances on fish mucous cells[J]. Fisheries Science, 39(1): 143-150.] doi: 10.16378/j.cnki.1003-1111.2020.01.019.
- 林旋,张伟妮,林树根,蒋丹萍,王寿昆. 2008. 欧洲鳗鲡皮肤、鳃及消化道粘液细胞的分布与类型[J]. 福建农业学报 23(1): 39-43. [Lin X, Zhang W N, Lin S G, Jiang D P, Wang S K. 2008. Type and distribution of mucous cells in skin, gills and digestive tracts of *Anguilla anguilla* [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 23(1): 39-43.]

- doi:10.3969/j.issn.1008-0384.2008.01.009.
- 吕伟华, 马波, 尹家胜, 杨建, 高雪, 徐伟, 张颖. 2021. 施氏鲟皮肤的组织学观察[J]. 水产学杂志, 34(1): 7-11. [Lü W H, Ma B, Yin J S, Yang J, Gao X, Xu W, Zhang Y. 2021. Histological microscopic observation of skin in Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*) [J]. Chinese Journal of Fisheries, 34(1): 7-11.]
- 苏金枝, 邓远, 李振通, 黎琳琳, 邱弈树, 丁小雨, 段鹏飞, 王心怡, 王林娜, 刘阳, 王清滨, 赵侠, 孙芳芳, 田永胜, 李胜忠. 2024. 虾青素对赤点石斑鱼生长、体色、皮肤色素和抗氧化性的影响[J]. 广东海洋大学学报, 44(4): 27-37. [Su J Z, Deng Y, Li Z T, Li L L, Qiu Y S, Ding X Y, Duan P F, Wang X Y, Wang L N, Liu Y, Wang Q B, Zhao X, Sun F F, Tian Y S, Li S Z. 2024. Effects of astaxanthin on growth, body color, skin pigment, and antioxidant capacity of *Epinephelus akaara* [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 44(4): 27-37.] doi: 10.3969/j.issn.1673-9159.2024.04.004.
- 王聪. 2025. 黄石爬鮠基因组资源开发及皮肤特化基础研究[D]. 武汉: 华中农业大学. [Wang C. 2025. Genome resources development for *Euchiloglanis kishinouyei* and basic research on its skin specialization[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University.]
- 王苗苗, 严欢, 卢彬, 田合, 毛琼玲, 张倩, 邵家丽, 李慕春. 2025. 不同鱼龄虹鳟肌肉营养成分比较[J]. 广东海洋大学学报, 45(1): 48-54. [Wang M M, Yan H, Lu B, Tian H, Mao Q L, Zhang Q, Shao J L, Li M C. 2025. Comparison of muscle nutrition components of *Oncorhynchus mykiss* of different ages[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 45(1): 48-54.] doi: 10.3969/j.issn.1673-9159.2025.01.006.
- 王晓萌, 刘晃, 姜旭阳, 张成林, 朱晨, 龙丽娜, 徐金铖, 马天利. 2025. 间歇禁食对大黄鱼生长、生理生化和肠道组织结构的影响[J]. 渔业现代化, 52(1): 64-72. [Wang X M, Liu H, Jiang X Y, Zhang C L, Zhu C, Long L N, Xu J C, Ma T L. 2025. Effects of intermittent fasting on growth, physiology and biochemistry, and intestinal histology of the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. Fishery Modernization, 52(1): 64-72.] doi: 10.3969/j.issn.1007-9580.2025.01.006.
- 王永明, 申绍祎, 史晋绒, 谢碧文, 齐泽民, 王芳. 2015. 黄石爬鮠消化系统组织学观察[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 32(6): 42-45. [Wang Y M, Shen S Y, Shi J R, Xie B W, Qi Z M, Wang F. 2015. Histological observation of the digestive system of *Euchiloglanis kishinouyei* [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 32(6): 42-45.] doi: 10.11721/cqnuj20150615.
- 严太明, 唐仁军, 刘小帅, 杨世勇, 杨淞, 何智. 2014. 齐口裂腹鱼鳞片发生及覆盖过程研究[J]. 水生生物学报, 38(2): 298-303. [Yan T M, Tang R J, Liu X S, Yang S Y, Yang S, He Z. 2014. The scale formation and development in juvenile of *Schizothorax prenanti* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 38(2): 298-303.] doi: 10.7541/2014.43.
- 颜涛, 黄颖颖, 严俊刚, 赵凤麒, 张俊林, 何斌. 2022. 岷江鱼类资源调查与分析[J]. 家畜生态学报, 43(11): 43-47. [Yan T, Huang Y Y, Yan J G, Zhao F Q, Zhang J L, He B. 2022. Investigation and analysis of fish resources in Minjiang river [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 43(11): 43-47.] doi: 10.3969/j.issn.1673-1182.2022.11.008.
- 杨淞, 符红梅, 赵柳兰, 肖青, 王艳, 杜宗君. 2015. 黄石爬鮠外周血液指标特征观察[J]. 动物学杂志, 50(6): 922-930. [Yang S, Fu H M, Zhao L L, Xiao Q, Wang Y, Du Z J. 2015. Characteristics of peripheral haematological parameters in *Euchiloglanis kishinouyei* [J]. Chinese Journal of Zoology, 50(6): 922-930.] doi: 10.13859/j.cjz.201506011.
- 杨淞, 李冬梅, 赵柳兰, 符红梅, 王艳, 肖青, 吴应斌, 汤巨平, 杜宗君. 2017. 似鲃高原鳅皮肤与鳍的组织学观察[J]. 动物学杂志, 52(5): 842-849. [Yang S, Li D M, Zhao L L, Fu H M, Wang Y, Xiao Q, Wu Y B, Tang J P, Du Z J. 2017. Histology of skin and fins in catfish-like loach (*Triplophysa siluroides*) [J]. Chinese Journal of Zoology, 52(5): 842-849.] doi: 10.13859/j.cjz.201705013.
- 张颖, 尹家胜, 马波, 李宝海, 牟振波. 2021. 黑斑原鲃皮肤组织结构及其 *COL1A1* 基因的克隆与分析[J]. 高原科学研究, 5(3): 1-10. [Zhang Y, Yin J S, Ma B, Li B H, Mou Z B. 2021. Tissue structure of skin and cloning and analysis of *COL1A1* gene of the *Glyptosternum maculatum* [J]. Plateau Science Research, 5(3): 1-10.] doi: 10.16249/j.cnki.2096-4617.2021.03.001.
- 赵帅, 朱红年, 吴媛媛, 周永康, 王朝林, 张盛周. 2014. 扬子鳄消化道黏液细胞和5种酶的组织化学定位[J]. 水生生物学报, 38(5): 962-967. [Zhao S, Zhu H N, Wu Y Y, Zhou Y K, Wang C L, Zhang S Z. 2014. Histochemical localization of mucous cells and five types of enzymes in digestive tract of *Alligator sinensis* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 38(5): 962-967.] doi: 10.7541/2014.142.
- Ángeles Esteban M. 2012. An overview of the immunological defenses in fish skin [J]. International Scholarly Research Notices, 2012(1): 853470. doi: 10.5402/2012/853470.
- Chia J S M, Wall E S, Wee C L, Rowland T A J, Cheng R K, Cheow K, Guillemín K, Jesuthasan S. 2019. Bacteria evoke alarm behaviour in zebrafish [J]. Nature Communications, 10(1): 3831. doi: 10.1038/s41467-019-11608-9.
- Chivers D P, Wisenden B D, Hindman C J, Michalak T A, Kusch R C, Kaminsky S G, Jack K L, Ferrari M C, Pollock R J, Halbgewachs C F, Pollock M S, Alemadi S, James C T, Savaloja R K, Goater C P, Corwin A, Mirza R S, Kiesecker J M, Brown G E, Adrian J C Jr, Krone P H, Blaustein A R, Mathis A. 2007. Epidermal 'alarm substance' cells of fishes maintained by non-alarm functions: Possible defence against pathogens, parasites and UVB radiation [J]. Proceedings Biological Sciences, 274(1625): 2611-2619. doi: 10.1098/rspb.2007.0709.
- Go H J, Kim C H, Park J B, Kim T Y, Lee T K, Oh H Y, Park N G. 2019. Biochemical and molecular identification of a novel hepcidin type 2-like antimicrobial peptide in the skin mucus of the pufferfish *Takifugu pardalis* [J]. Fish &

- Shellfish Immunology, 93:683-693. doi: 10.1016/j.fsi.2019.08.017.
- Halbgewachs C F, Marchant T A, Kusch R C, Chivers D P. 2009. Epidermal club cells and the innate immune system of minnows [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 98(4):891-897. doi:10.1111/j.1095-8312.2009.01328.x.
- Kumari U, Yashpal M, Mittal S, Mittal A K. 2009. Histochemical analysis of glycoproteins in the secretory cells in the gill epithelium of a catfish, *Rita rita* (Siluriformes, Bagridae) [J]. Tissue & Cell, 41 (4) : 271-280. doi: 10.1016/j.tice.2008.12.006.
- Magnadottir B. 2010. Immunological control of fish diseases [J]. Marine Biotechnology, 12(4):361-379. doi:10.1007/s10126-010-9279-x.
- Manek A K, Ferrari M C, Niyogi S, Chivers D P. 2014. The interactive effects of multiple stressors on physiological stress responses and club cell investment in fathead minnows [J]. The Science of the Total Environment, 476-477: 90-97. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.042.
- Manek A K, Ferrari M C, Sereda J M, Niyogi S, Chivers D P. 2012. The effects of ultraviolet radiation on a freshwater prey fish: Physiological stress response, club cell investment, and alarm cue production [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 105 (4) : 832-841. doi: 10.1111/j.1095-8312.2011.01829.x.
- Ni L Y, Jin L, Zeng M Z, Xu Y, Wang Y M, Peng Z G. 2024. The cavefish *Triplophysa rosa* has a well-developed adaptive immune system: Evidence from histological and comparative genomic analysis [J]. Aquaculture, 581: 740395. doi:10.1016/j.aquaculture.2023.740395.
- Pandey S, Stockwell C A, Snider M R, Wisenden B D. 2021. Epidermal club cells in fishes: A case for ecoimmunological analysis [J]. International Journal of Molecular Sciences, 22(3):1440. doi:10.3390/ijms22031440.
- Pollock R J, Pollock M S, Ferrari M C, Kaminskyj S G, Chivers D P. 2012. Do fathead minnows, *Pimephales promelas* Rafinesque, alter their club cell investment in responses to variable risk of infection from *Saprolegnia*? [J]. Journal of Fish Diseases, 35 (4) : 249-254. doi: 10.1111/j.1365-2761.2011.01337.x.
- Rajan B, Fernandes J M, Caipang C M, Kiron V, Rombout J H, Brinchmann M F. 2011. Proteome reference map of the skin mucus of Atlantic cod (*Gadus morhua*) revealing immune competent molecules [J]. Fish & Shellfish Immunology, 31(2):224-231. doi:10.1016/j.fsi.2011.05.006.
- Saleh M, Kumar G, Abdel-Baki A S, Dkhil M A, El-Matbouli M, Al-Quraishy S. 2019. Quantitative proteomic profiling of immune responses to *Ichthyophthirius multifiliis* in common carp skin mucus [J]. Fish & Shellfish Immunology, 84:834-842. doi:10.1016/j.fsi.2018.10.078.
- Srivastava A, Mistri A, Mittal S, Mittal A K. 2020. Alterations in the epidermis of the carp, *Labeo rohita* (Cyprinidae: Cypriniformes), infected by the bacteria, *Aeromonas hydrophila*: A scanning electron microscopic, histopathological and immunohistochemical investigation [J]. Journal of Fish Diseases, 43 (8) : 941-953. doi: 10.1111/jfd.13204.
- Sun J F, Wang Y Z, Lv A J, Xian J A, Wang Q K, Zhang S L, Guo Y J, Xing K Z. 2019. Histochemical distribution of four types of enzymes and mucous cells in the intestine of koi carp (*Cyprinus carpio* var. *koi*) [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 45(4):1367-1376. doi:10.1007/s10695-019-00673-y.
- Tsutsui S, Yamaguchi M, Hirasawa A, Nakamura O, Watanabe T. 2009. Common skate (*Raja kenoi*) secretes pentraxin into the cutaneous secretion: The first skin mucus lectin in cartilaginous fish [J]. Journal of Biochemistry, 146 (2) : 295-306. doi:10.1093/jb/mvp069.
- Xu Z, Parra D, Gómez D, Salinas I, Zhang Y A, von Gersdorff Jørgensen L, Heinecke R D, Buchmann K, LaPatra S, Sunyer J O. 2013. Teleost skin, an ancient mucosal surface that elicits gut-like immune responses [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(32):13097-13102. doi:10.1073/pnas.1304319110.
- Ytteborg E, Hansen Ø J, Høst V, Afanasyev S, Vieweg I, Nahrang J, Krasnov A. 2020. Morphology, transcriptomics and *in vitro* model of skin from polar cod (*Boreogadus saida*) and Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. Fishes, 5 (4) : 34. doi:10.3390/fishes5040034.
- Zhang X T, Yu Y Y, Xu H Y, Huang Z Y, Liu X, Cao J F, Meng K F, Wu Z B, Han G K, Zhan M T, Ding L G, Kong W G, Li N, Takizawa F, Sunyer J O, Xu Z. 2021. Prevailing role of mucosal Igs and B cells in teleost skin immune responses to bacterial infection [J]. Journal of Immunology, 206(5):1088-1101. doi:10.4049/jimmunol.2001097.

(责任编辑: 张 博)