



## 黄颡鱼的毒棘结构

冯晓玉<sup>1,2</sup>, 肖瑾<sup>2,3,4</sup>, 吴邦元<sup>3</sup>, 曾燊<sup>2,3</sup>, 杜涌徽<sup>3</sup>, 张富斌<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 四川南充 637009;

2. 国家淡水渔业工程技术研究中心(武汉)西南分中心, 四川南充 637009;

3. 西华师范大学生命科学学院, 西南野生动植物资源保护与利用教育部重点实验室, 四川南充 637009;

4. 成都自然博物馆, 四川成都 610059)

**摘要:** 为深入了解黄颡鱼的毒棘结构, 增强人们对淡水刺毒鱼类的认知。本研究结合宏观毒棘骨骼标本制作和微观组织切片等方法, 深入探究黄颡鱼的毒棘结构。结果显示, 黄颡鱼的胸鳍和背鳍均具有尖锐的倒刺棘骨, 棘骨外包围着皮膜, 皮膜拥有能分泌毒液的毒腺细胞, 它们共同组成了黄颡鱼毒棘装置。毒棘骨骼宏观结构表明, 黄颡鱼的背鳍和胸鳍毒棘均具有贯穿全棘骨的中央管和包围棘骨的皮膜; 背鳍棘骨细长、锥形, 且轻微拱起, 顶部骤尖, 后缘为弱锯齿; 胸鳍棘骨前后缘均有锯齿, 但后缘为强锯齿。背鳍和胸鳍毒棘基部结构的髁突形状、大小、位置全然不同。微观结构显示, 皮膜中的毒腺细胞聚集成层, 位于鳞状上皮与色素层之间, 未见导管与之相连, 背鳍和胸鳍毒棘的分支性骨管中均未发现毒腺细胞。胸鳍和背鳍锁紧装置可让毒棘保持倒伏或者直立的锁定状态, 降低猎物挣脱几率。本研究有助于深入了解黄颡鱼的毒棘结构和特征, 并增强人们对淡水刺毒鱼类的认知。

**关键词:** 黄颡鱼; 刺毒鱼类; 毒棘; 组织切片

中图分类号: Q 958.12<sup>2</sup>.4; S 917.4

文献标志码: A

有毒生物是生物在自然界长期适应环境并不断进化而产生的结果<sup>[1]</sup>, 广泛分布于自然界中<sup>[2]</sup>, 有毒生物产生的生物毒素在自然环境中通常可辅助生物进行捕食、防御、竞争, 以及参与生物的免疫等<sup>[3-4]</sup>。有研究指出, 有毒鱼类是有毒脊椎动物中最庞大的类群之一, 世界范围内, 有毒鱼类最低保守估计在 2500 种以上, 但现已发现的有毒鱼类约 1100 种, 多集中于海水鱼类<sup>[5-6]</sup>。

刺毒鱼类 (Venomous or Acanthotoxic fish), 是将毒腺隐藏于可以给其他生物造成创伤的结构组织中, 如鱼的鳍棘<sup>[7]</sup>, 通过主动或者被动将毒棘刺入其他生物体内, 其后, 毒腺细胞分泌毒液并注入被害生物体内, 最后释放毒素<sup>[8-9]</sup>, 从而引起

其他生物机体局部或全身中毒<sup>[10]</sup>。刺毒鱼类的毒器结构和着生部位因种类不同而存在差异<sup>[11-12]</sup>, 但毒棘和毒腺等毒器是在长期适应环境过程中进化而来的, 目的是更有效地刺击或攻击其他生物<sup>[11]</sup>。

作为有毒鱼类的重要组成部分, 刺毒鱼类包括软骨鱼纲 (Chondrichthyes) 刺毒鱼类和硬骨鱼纲 (Osteichthyes) 刺毒鱼类<sup>[11]</sup>。其中, 软骨鱼纲刺毒鱼类主要有鲨、魮以及银鲛等类群<sup>[11]</sup>; 硬骨鱼纲淡水刺毒鱼类主要来源于鲶形目 (Siluriformes) 和鲈形目 (Perciformes) 中的部分鱼类<sup>[11, 13-17]</sup>, 但硬骨鱼纲刺毒鱼类在淡水以及海水水体中均有分布。研究指出, 鲶形目中所包含的刺毒鱼类种类是最丰富的, 据预测, 仅鲶形目可能包含的刺毒鱼类

收稿日期: 2022-03-18 修回日期: 2022-06-06

资助项目: 国家自然科学基金 (31901219); 四川省科技计划 (2022NSFSC1646, 2022NSFSC1059); 化学合成与污染控制四川省重点实验室开放基金 (CSPC202010)

第一作者: 冯晓玉 (照片), 从事水生生物学研究, E-mail: 1658596926@qq.com

通信作者: 张富斌, 从事水生生物学研究, E-mail: sczhangfubin@163.com



应在 1250~1635 种, 甚至更多<sup>[5, 13]</sup>。在淡水中, 刺毒鱼类也主要来源于鲇形目<sup>[11]</sup>。尽管如此, 国内外依然缺乏对淡水刺毒鱼类的深入研究, 而关于淡水刺毒鱼类毒棘结构方面的研究更为罕见, 极大地阻碍了人类对刺毒鱼类的深入认知, 不利于人们对有毒鱼类的综合开发利用。

黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 隶属于鲇形目 鲇科 (Bagridae) 黄颡鱼属 (*Pelteobagrus*), 在我国分布极为广泛, 是较为典型的淡水刺毒鱼类之一<sup>[11]</sup>。被黄颡鱼刺伤后, 中毒者的症状主要表现为剧烈疼痛、出血和局部肿胀, 并可能引起发烧、心率过高、虚弱、低血压等症状, 此外, 还可能引起伤口的继发感染, 威胁人们的身体健康<sup>[16-17]</sup>。尽管如此, 目前关于黄颡鱼毒棘结构尚不清楚, 缺乏较为系统的研究。基于此, 本实验采用黄颡鱼毒棘骨骼标本制作和微观组织切片等方法相结合, 详细研究其毒棘结构, 并在此基础上推测其毒液迸发机制。从而深入了解黄颡鱼的毒棘结构

和特征, 增强人们对淡水刺毒鱼类的认知, 同时, 也为刺毒鱼类的进一步研究奠定基础, 以促进该方向的不断发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集

于 2019 年 6 月—12 月在嘉陵江蓬安江段 (31°01'~31°03'N, 106°22'~106°23'E) (图 1), 通过定置刺网 (100.0 m×0.2 m, 网目 3 和 5 cm) 采集黄颡鱼样本, 样本采集后, 立即充氧打包带回实验室。在实验室内, 先用 MS-222 对样本进行麻醉, 之后测量体长 (0.01 cm)、体重 (0.01 g) 等基础生物学数据。获取基础生物学数据后, 选取性成熟个体的黄颡鱼进行制作其毒棘宏观骨骼标本和微观毒棘组织切片标本。所有实验标本存放于西华师范大学生命科学院鱼类标本室。实验过程中操作人员严格遵守实验动物伦理规范。

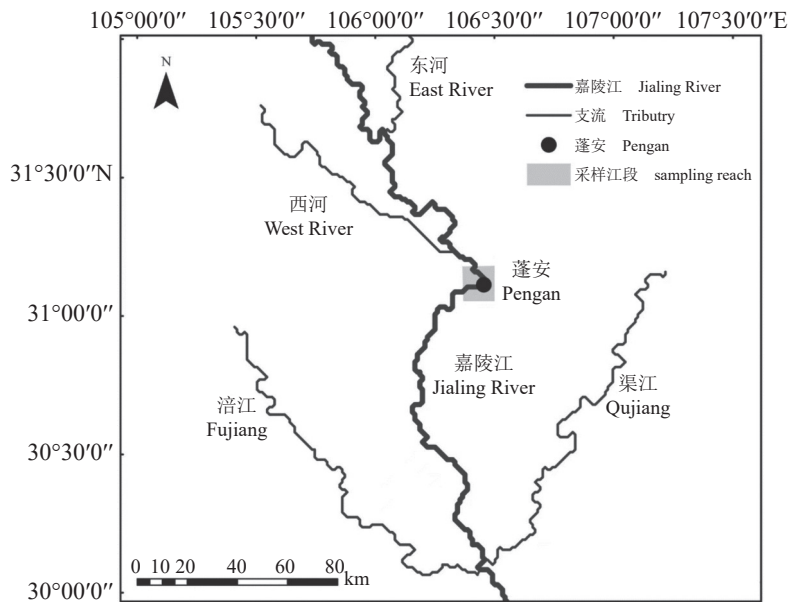


图 1 黄颡鱼样本采集区域

Fig. 1 Sampling area of *P. fulvidraco*

### 1.2 宏观毒棘骨骼标本制作

**预处理** 将样本放置平整, 从鱼体腹部无骨骼组织处开一小口, 在不破坏黄颡鱼骨骼结构的情况下将内脏完全取出。并从枕骨大孔处, 将解剖针伸入脑颅, 旋转解剖针, 捣碎脑髓, 最后将脱脂棉条旋入脑颅中并旋出, 重复 2~3 次, 吸出脑髓<sup>[18]</sup>。

**热处理** 用镊子夹住黄颡鱼的头部和尾部,

将黄颡鱼躯干部浸入沸水 (94~100 °C) 中, 静置 20~30 s, 之后立即浸入冷水 (23~28 °C) 中, 静置 30 s, 重复以上步骤直至表层鱼肉松散, 易于剥离。其后, 将鱼头浸入沸水 (94~100 °C) 中 5 s, 再用冷水 (23~28 °C) 冷却, 重复 2~3 次, 直至可轻易剥离口腔、面部等较大块的肌肉<sup>[18]</sup>。

**肌肉剔除** 先用解剖刀顺着黄颡鱼肋骨, 将腹部的大块肌肉剔除, 再剔除背鳍下方至侧

线上方的肌肉, 最后再用软毛刷轻柔地刷去毒棘及相关骨骼结构上的残存肌肉, 但不可伤及骨骼。

**腐蚀与脱脂** 配制 0.4%~0.5% 的 NaOH 溶液, 倒入塑料槽中, 再放入已经处理好的黄颡鱼骨架, 做好标记。溶液需要完全浸没骨骼, 每 12 h 换 1 次 NaOH 溶液, 根据鱼体大小调整浸泡时间。腐蚀完毕后, 将骨骼用缓流的水冲洗干净, 并再次用细毛刷除掉骨骼上残存的肉沫和膜。风干后即可拍照保存<sup>[18]</sup>。

### 1.3 微观毒棘石蜡切片标本制作

**脱钙和固定** 剪下黄颡鱼胸鳍和背鳍处的毒棘, 将毒棘分为不超过 2 mm 的组织块, 并将组织块依次做好标记, 置于稀盐酸中进行脱钙。待毒棘变软后, 使用蒸馏水洗去表面的盐酸, 置于 4% 多聚甲醛中, 固定 1 周。

**脱水和包埋** 在 4% 多聚甲醛中固定完成后, 用磷酸盐缓冲溶液 (PBS) 冲洗毒棘组织, 进行常规的梯度酒精逐级脱水、二甲苯透明和石蜡包埋。

**切片和染色** 将包埋好的毒棘组织放入 -20 °C 冰箱冷冻 30~40 min, 利用冷冻切片 (Cryostat Microtome) 从横纵两个方向进行连续切片, 经苏木精-伊红染色 (H.E 染色) 后, 使用中性树胶进行封片。

**观察拍照** 选取黄颡鱼胸鳍毒棘和背鳍毒棘进行切片拍照, 选取中央管和分支性骨管清晰的棘骨以及由毒腺细胞和黏液细胞等构成的皮质鞘视野。

### 1.4 图件制作

**采样地图** 实验采样区域图是根据样品收集时采样区间的经纬度, 利用 ArcGIS10.3 软件绘制而成。

**毒棘结构图及毒棘锁定装置图的绘制** 将根据上述步骤制作好的黄颡鱼宏观毒棘标本置于 OLYMPUS SZX16 体视显微镜下进行多角度图像采集, 并与毒棘石蜡切片相互印证, 最后通过 Photoshop cs6 软件绘制黄颡鱼毒棘结构图。

## 2 结果

### 2.1 黄颡鱼样本情况

用于实验的黄颡鱼毒棘结构制作的标本均为性成熟个体, 宏观毒棘骨骼标本的制作共使用 6

尾黄颡鱼样本, 体长为 17.10~18.41 cm [(17.75±0.45) cm], 体重为 74.62~83.90 g [(78.42±3.38) g]。微观毒棘石蜡组织切片标本的制作共使用 14 尾黄颡鱼样本, 体长为 13.30~23.50 cm [(20.09±3.10) cm], 体重为 34.10~147.60 g [(92.05±31.48) g]。

### 2.2 黄颡鱼毒棘的宏观结构

黄颡鱼为刺毒鱼类, 毒棘由背、胸鳍毒棘及外包皮膜中的毒腺组织组成 (图 2)。背鳍短小, 其中第二不分支鳍条为毒棘, 后缘为细锯齿, 背鳍棘骨和高度特化的神经间棘共同组成背鳍毒棘锁定装置。胸鳍低位, 有 1 根作为毒棘的不分支鳍条, 毒棘的内外缘均具有锯齿, 胸鳍棘骨与高度特化的肩胛骨和下颌骨共同构成胸鳍毒棘锁定装置。

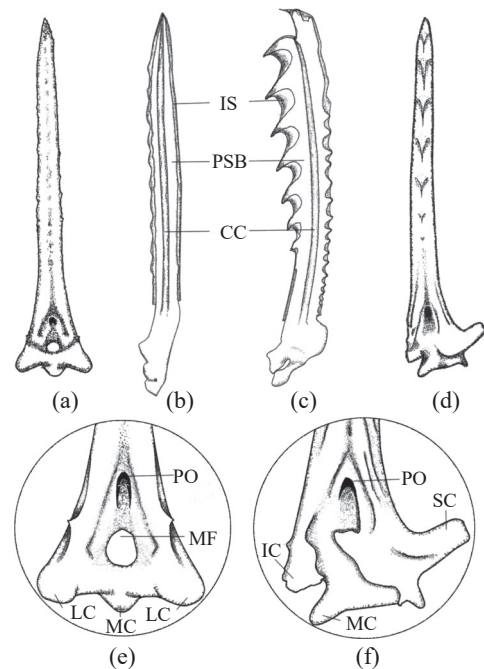


图 2 黄颡鱼的胸鳍毒棘和背鳍毒棘形态观察

(a) 背鳍棘骨后视图, 可见中央管远端开口, (b) 背鳍毒棘侧视图, (c) 胸鳍毒棘侧视图, (d) 胸鳍棘骨后视图, (e) 背鳍棘骨基部后视图, (f) 胸鳍棘骨基部后视图。IS. 皮质鞘, PSB. 胸鳍棘骨, CC. 中央管, PO. 中央管近端开口, MF. 中间孔, LC. 外髁突, MC. 中髁突, SC. 上髁突, IC. 下髁突, 下同。

Fig. 2 Morphological observations about pectoral and dorsal spines of *P. fulvidraco*

(a) posterior view of dorsal spine, showing distal opening of central canal, (b) lateral view of dorsal spine, (c) lateral view of pectoral spine, (d) posterior view of pectoral spine, (e) posterior view for the base of dorsal spine, (f) posterior view for the base of pectoral spine. IS. integumentary sheath, PSB. pectoral spines bone, CC. central canal, PO. proximal opening of central canal, MF. median foramen, LC. lateral condyles, MC. median condyle, SC. superior condyle, IC. inferior condyle, the same below.



**黄颡鱼的背鳍毒棘结构** 黄颡鱼背鳍棘骨细长、锥形, 且轻微拱起, 顶部骤尖, 后缘为弱锯齿(图2)。棘骨被一层存在稀疏色素沉着的皮膜包裹着, 与分支鳍条表面是连续的, 皮膜内存在毒腺组织。毒棘和棘骨侧面均存在多条细纵沟, 可用于输送毒液, 端部附近另存在斜列沟纹。由后视图可知, 其后缘具有浅槽, 并在靠近基部约1/3处逐渐增大加深, 直至中央管远端开口处终止。背鳍棘骨柱身自上而下逐渐增粗, 并在靠近基部时突然开始扩展, 成为类似三角形的结构。该结构上方为中央管近端开口, 中央管由近端开口至背鳍棘骨端部的远端开口, 贯穿全棘。中央管近端开口的下方, 紧邻着中间孔, 其与神经间棘紧密相连。背鳍棘骨基部由位于正中间的中髁突、两侧的外髁突等3个髁突共同组成一个对称的结构。

背鳍毒棘锁定装置由背鳍棘骨和高度特化的神经间棘组成(图3)。神经间棘的上半部分特化成一个杯状结构, 形似两片连接在一起的翼, 且在前后的连接处还有柱状髁突, 其与背鳍棘骨的中间孔形成类似链条的锁状结构, 使中髁突能在神经间棘的杯状结构底部, 通过肌肉的收缩, 拥有近90°的转动范围, 完成背鳍毒棘的倒伏与锁定。

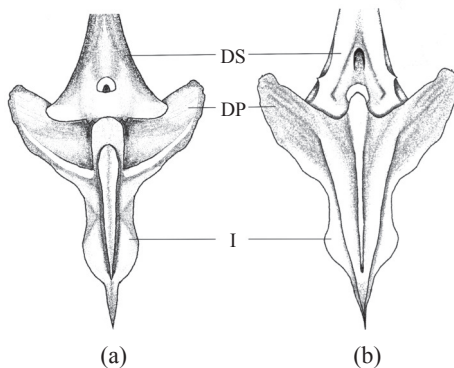


图3 黄颡鱼背鳍毒棘的锁紧装置

(a) 装置正面观, (b) 装置背面观。DS. 背鳍棘, DP. 背板, I. 髓棘间骨。

Fig. 3 Locking apparatus of dorsal spine of

*P. fulvidraco*

(a) anterior view, (b) dorsal view. DS. dorsal spine, DP. dorsal plate, I. interneural.

**黄颡鱼的胸鳍毒棘结构** 黄颡鱼胸鳍毒棘约为体长的1/7, 与背鳍毒棘类似, 也具有存在毒腺组织的皮膜, 和贯穿全棘骨的中央管, 但其前后缘均有锯齿, 后缘为强锯齿, 较前缘粗大, 且后缘锯齿随其与肩胛骨距离的增加而变大, 前缘锯齿随其与肩胛骨距离的增加而变疏。基部结

构虽然也有3个髁突, 但与背鳍毒棘全然不同(图2)。极度增大的上髁突特化为肾形薄骨片, 骨片与胸鳍棘骨侧面形成近70°的夹角, 该夹角与肩胛骨紧密相连; 较小的中髁突与上髁突位于同一平面上, 与下髁突之间隔着一个“V”形缺口; 在背面观中, 下髁突位于上髁突和中髁突之间(图2)。

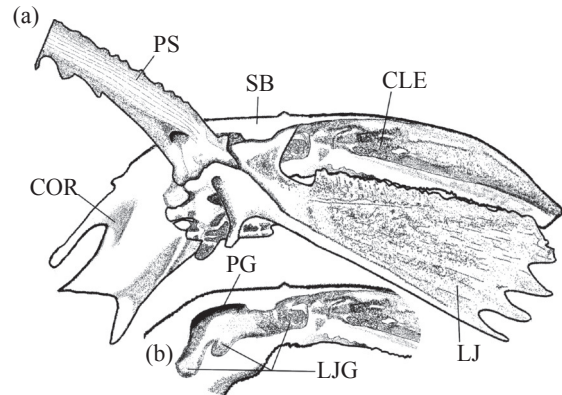


图4 黄颡鱼胸鳍毒棘锁定装置(以右胸鳍毒棘为例)

(a) 胸鳍棘骨与肩胛骨、下颌骨相连, (b) 肩胛骨(移除胸鳍棘骨和下颌骨)。PS. 胸鳍棘骨, CLE. 匙骨, COR. 喙突, LJ. 下颌骨, SB. 肩胛骨, PG. 胸鳍棘沟, LJG. 下颌骨沟。

Fig. 4 Locking apparatus of pectoral spines of

*P. fulvidraco* (take right pectoral spine as an example)

(a) pectoral spine accompanied with shoulder blade and lower jawbone, (b) shoulder blade (pectoral spine and lower jawbone removed). PS. pectoral spine, CLE. cleithrum, COR. coracoid, LJ. lower jawbone, SB. shoulder blade, PG. pectoral groove of the cleithrum, LJG. lower jawbone groove.

胸鳍毒棘锁定装置由胸鳍棘骨和高度特化的肩胛骨和下颌骨组成(图4)。肩胛骨的胸鳍棘骨沟较深, 上面覆盖着拱形薄骨片, 胸鳍棘沟的旁边是较浅的下颌骨沟, 其表面凹凸不平, 应为吻合下颌骨的各个髁突。胸鳍棘骨、肩胛骨和下颌骨三者紧密相连, 使胸鳍毒棘能以胸鳍棘沟为支点, 在水平面上进行90°的滑动, 达到倒伏和锁定的目的。

### 2.3 黄颡鱼毒棘的微观结构

检视背鳍毒棘斜横切面, 发现其主要分为背鳍棘骨和位于背鳍棘骨周边的皮膜(图5-a)。而棘骨中存在中央管, 皮膜与鱼体其他皮肤处未见分隔线存在, 且由外层的表皮层和内层的真皮层组成, 真皮层由网状结缔组织构成, 并与胸鳍棘骨的基底膜以及色素线分隔(图5-b)。毒腺细胞聚集成层, 位于色素层和鳞状上皮细胞之间, 形状不规则, 细胞质染色极淡, 或者细胞质分泌物明显排出, 呈空泡状, 未见腺管。除毒腺细胞集中的

区域外, 表皮层中大多散布着黏液细胞, 以及克拉维细胞和色素细胞的鳞状上皮细胞, 其中黏液细胞与鱼体其他皮肤处形态相同, 为卵圆形或圆形, 不易聚集, 细胞核染色嗜碱性, 胞质透明且空泡化。在背鳍棘骨的横切面, 可见许多以中央管为起点, 呈放射状分布的细小腔隙, 即分支性骨管。骨管中充满了疏松的网状结缔组织和小血管, 连通中央管和皮膜。中央管中内容与骨管

类似, 未发现毒腺细胞(图 5-a)。

胸鳍毒棘斜纵切面结构显示, 其由棘骨和皮膜组成, 皮膜中的毒腺细胞呈层状聚集, 位于表皮层中间区域, 其显微结构与背鳍毒棘未见显著区别(图 5-c)。而胸鳍棘骨在远端向外延伸时呈三角形, 中央管逐渐缩小, 在最顶端完全消失, 远端开口位于胸鳍棘骨顶端靠后的位置; 骨管数量也逐渐减少, 在顶端只见数个小骨管(图 5-d)。

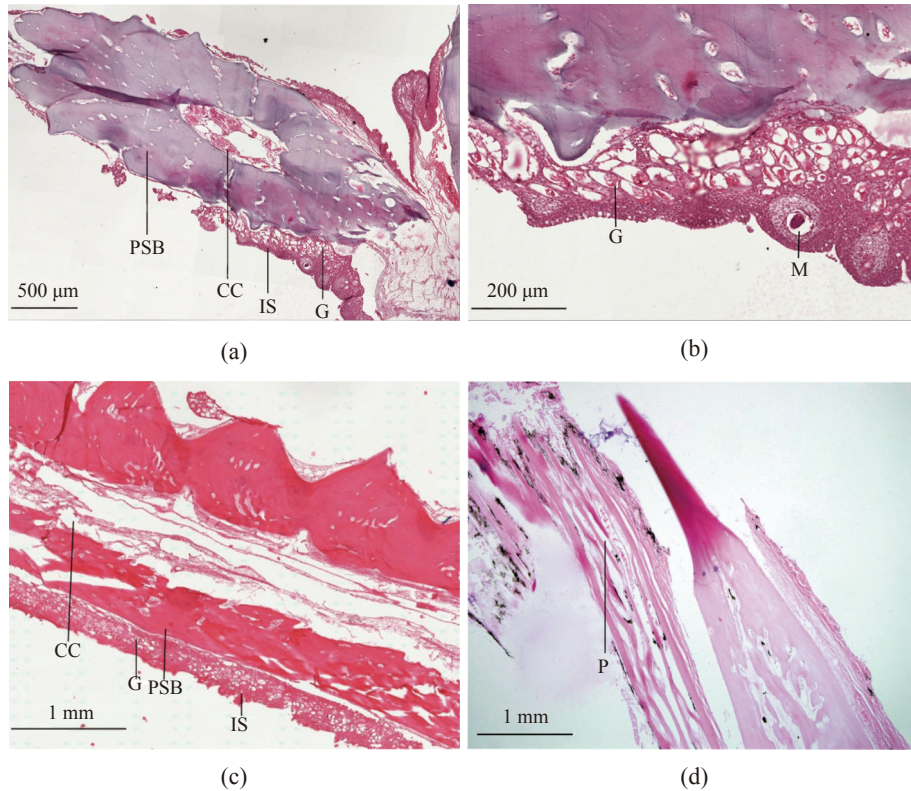


图 5 黄颡鱼毒棘的显微结构

(a) 黄颡鱼背鳍毒棘斜横切片, (b) 黄颡鱼背鳍皮膜, (c) 黄颡鱼胸鳍毒棘斜纵切片, (d) 黄颡鱼胸鳍毒棘尖端纵切片。IS. 皮质鞘, G. 毒腺细胞, M. 黏液细胞, P. 鳍条, 下同。

Fig. 5 Histological sections of venomous spines of *P. fulvidraco*

(a) horizontal oblique section of dorsal venom spine of *P. fulvidraco*, (b) integumentary sheath of dorsal venom spine of *P. fulvidraco*, (c) longitudinal oblique section of pectoral venom spine of *P. fulvidraco*, (d) longitudinal oblique of crest of pectoral venom spine of *P. fulvidraco*. IS. integumentary sheath, G, venom gland cell, M. mucus cell, P. pterygiophore, the same below.

#### 2.4 黄颡鱼毒棘的毒液释放机制推测

基于黄颡鱼毒棘结构对其毒液释放机制推测(以胸鳍毒棘为例)。参照其他研究者对部分海洋刺毒鱼类毒棘结构的研究, 结合黄颡鱼毒棘结构的宏观与微观结构, 实验推测黄颡鱼毒液进出机制可能包括两种: ①当毒棘刺入目标后, 因棘上的鞘受损而露出的毒腺细胞破损, 毒液被释放并顺着沟纹  $e_1$  流入伤口, 到达目标体内(图 6)。②根据切片可知, 毒棘骨上有许多可以连通中央

管和皮膜的骨管, 胸鳍后缘的巨大倒齿中也存在由中心管经由刺尖到外界的骨管。因此, 推测黄颡鱼毒液进出的另一种机制是当黄颡鱼受到刺激时, 胸鳍毒棘锁定呈硬直状刺入威胁者, 皮膜中的毒腺细胞因压力释放毒液, 毒液通过  $c_1$  和  $c_2$  两种通道流入中心管, 当毒液通过管槽时, 由于阻力关系, 迫使毒液自  $e_2$  通道, 即尖齿管孔或者中央管远端开口喷射而出, 进入已撕裂的伤口, 对威胁者造成伤害(图 6)。



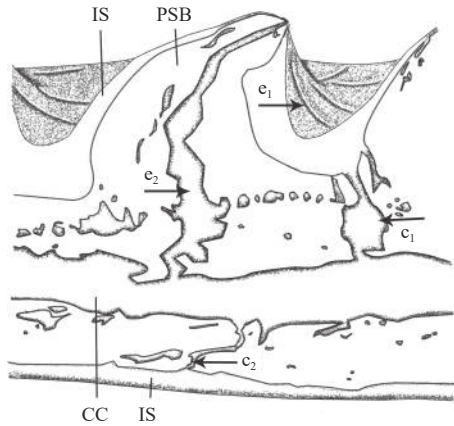


图6 黄颡鱼毒棘锯齿细节图

$c_1$ . 黄颡鱼释放毒液通过皮膜上的沟纹进入患处 (机制①),  $c_2$ . 黄颡鱼释放毒液通过尖刺中的骨管进入患处 (机制①),  $c_1$ 、 $c_2$ . 黄颡鱼释放毒液进入中心管的通道 (机制②)。

Fig. 6 Detailed figure of serrations on venomous spines in *P. fulvidraco*

$c_1$ . *P. fulvidraco* releases venom into affected areas through grooves in the integumentary sheath (mechanism ①),  $c_2$ . *P. fulvidraco* releases venom into affected areas through bony tubes in sharp spines (mechanism ①),  $c_1$  and  $c_2$ . *P. fulvidraco* releases venom into the central canal (mechanism ②).

黄颡鱼背鳍毒棘进出机制与胸鳍毒棘类似, 但机制②中推测其主要通过尖锐的鳍毒棘末端撕裂生物体的皮肤和肌肉, 由中央管远端出口进出毒液至伤口内部, 再对生物体造成伤害。

### 3 讨论

有毒鱼类咬伤和刺伤造成的中毒是全世界常见的健康危害<sup>[19]</sup>, 黄颡鱼肉质鲜美, 深受民众喜爱, 对其进行捕捞时, 发生刺伤中毒事件屡见不鲜。不同的有毒生物其有毒物质释放的方式不同, 一般利用的是与自身结构特点相适应的方法, 将有毒物质注入目标生物体内, 如大部分稀棘鲷属 (*Meiacanthus*) 的下颌中有近 2/3 的尖牙承担了释放毒液的工作, 这些尖牙被口腔内的毒腺所包围, 且前缘也有较多凹槽, 可辅助毒液进入猎物体内<sup>[20]</sup>。研究发现, 大多数刺毒鱼类的毒素释放主要是借助于鳍和 (或) 鳃盖相关的多刺部分来实现。在部分海洋鲷形目刺毒鱼类中, 毒棘装置由胸鳍棘骨和 (或) 背鳍棘骨及毒腺组织构成<sup>[21]</sup>。有研究表明, 北美洲石鲷属 (*Noturus*) 的有毒鲷类毒液释放装置主要包括 4 种: ①无毒腺, 仅光滑的毒棘; ②光滑的棘并有与之相连的毒腺; ③带有毒腺的锯齿状棘与棘骨相连; ④带有毒腺的锯齿状棘与

棘骨和后缘锯齿相连<sup>[13]</sup>。本实验对黄颡鱼毒棘结构的研究结果表明, 其毒棘均存在后缘锯齿, 其中背鳍毒棘为弱锯齿, 而胸鳍毒棘为强锯齿, 因此, 判定黄颡鱼毒液的释放可能与带有毒腺的锯齿状棘以及毒棘的后缘锯齿有关, 即与上文所述的④中, 刺毒鱼类释放装置机理相似。基于此, 推测黄颡鱼利用毒棘上的锯齿迅速撕裂生物体的表层, 在对目标造成机械伤口的同时, 利用毒棘装置成功地将毒液注入目标体内。

黄颡鱼的有毒物质是由其毒腺细胞分泌的。研究指出, 鱼类毒腺细胞形态一般大而呈多角形, 双核, 且细胞器和细胞核随着细胞成熟而消失, 最后只可见细胞质颗粒<sup>[22]</sup>, 与本实验中黄颡鱼毒棘的毒腺细胞的形态研究符合。于业军等<sup>[23]</sup>的研究表明, 刺毒鱼光虹 (*Dasyatis laevigatus*) 的毒腺细胞位于棘刺两侧纵沟内, 毒腺细胞内未见导管, 本实验黄颡鱼的毒腺细胞位于棘骨外包围的皮膜中, 在鳞状上皮与色素层之间, 毒腺细胞内与于业军等<sup>[23]</sup>研究结果相符。

黄颡鱼作为我国广泛分布的淡水刺毒鱼类之一, 体内的有毒物质是其捕食与防捕食的关键。有毒生物产生有毒物质, 其主要生态功能为捕食、防御和竞争<sup>[24]</sup>。对于部分有毒鱼类来说, 有毒物质进化的驱动力之一是捕食, 其进化方向主要是针对神经肌肉通路, 使猎物瘫痪或阻止血液凝固<sup>[24]</sup>。如依赖寄生捕食的部分七鳃鳗科 (*Petromyzonidae*) 鱼类, 其有毒物质拥有麻醉和抗凝血的功能, 在避免被宿主察觉的同时, 可保持血液长时间流通, 以此增大自己生存的几率<sup>[25]</sup>。同样, 防御是有毒物质进化的驱动力之一, 化学防御的生物体一般利用伪装或采用警告等形式来阻止被捕食<sup>[26]</sup>, 而生物通过产生有毒物质来进行防御或抵抗, 通常是生物体最后但最有效的策略。对于鲷形目的有毒鱼类, 研究者们普遍认为其毒棘和相关的毒腺代表着抗捕食适应<sup>[27]</sup>。有毒鱼类造成的疼痛与其伤口大小不相关, 部分目的是为了迅速震慑捕食者, 为其逃生创造时间, 对于拥有毒腺的鱼类来说, 选择防御能力的进化方向有助于提高其存活率<sup>[28]</sup>。有研究表明, 捕食者和被捕食者之间的相互作用不仅会促进有毒鱼类的有毒物质进化, 也会导致有毒鱼类防御棘的进化, 二者相辅相成<sup>[29]</sup>。竞争也是造成有毒物质进化的驱动力之一。如斑马鲷 (*Meiacanthus grammistes*) 的有毒物质拥有神经毒性, 会引起低血压并加重

炎症, 有利于抵抗竞争对象, 而鳎(Blenny sp.) 的有毒物质可迷惑猎物, 造成猎物协调性和游泳能力下降, 从而增加猎物被捕食的可能性<sup>[30]</sup>。当黄颡鱼受到干扰后, 其毒棘会锁定成硬直状态, 一方面直接增加了捕食者的捕食难度, 另一更为重要的方面是伺机进攻威胁者并释放有毒物质, 这可能是它抵御捕食者的防御机制<sup>[31]</sup>, 提高自身的存活率, 而这一机制的存在可能对其适应复杂的环境具有重要意义。

#### 4 结论

黄颡鱼的毒棘装置由背、胸鳍毒棘及外包皮肤中的毒腺细胞组成。毒腺细胞位于鳞状上皮与色素层之间, 形状不规则, 未见导管与之相连。胸、背鳍锁紧装置可让毒棘保持倒伏或者直立的锁定状态。当毒棘进入生物体内时, 毒液随着毒腺细胞的撕裂而释放, 可能由皮鞘上的沟纹输送, 或者由中心管进入尖刺, 继而进入生物体内。黄颡鱼毒棘装置的结构描述和迸发机制推测有助于深入了解鱼类毒液腺进化的机制和潜在的选择性因素。通过本研究, 不仅能深入了解黄颡鱼的毒棘结构和特征, 还能增强人们对淡水刺毒鱼类的认知, 有助于进一步开展淡水有毒鱼类研究。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献 (References):

- [1] Indumathi S M, Khora S S. Boxin-an ichthyotoxic protein from boxfishes[J]. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 2013, 5(4): 65-68.
- [2] Gopalakrishnakone P, Haddad V Jr, Tubaro A, *et al.* Marine and freshwater toxins[M]. Dordrecht: Springer, 2016.
- [3] Harris R J, Jenner R A. Evolutionary ecology of fish venom: adaptations and consequences of evolving a venom system[J]. *Toxins*, 2019, 11(2): 60.
- [4] 张富斌, 王燕, 肖瑾, 等. 嘉陵江有毒鱼类的分布研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(12): 2901-2909.  
Zhang F B, Wang Y, Xiao J, *et al.* Study on distribution of ichthyotoxic fish in the Jialing river[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(12): 2901-2909 (in Chinese).
- [5] Wright J J. Diversity, phylogenetic distribution, and origins of venomous catfishes[J]. *BMC Evolutionary Biology*, 2009, 9: 282.
- [6] Wright J J. The evolutionary ecology of venomous catfishes, with a focus on members of the North American family Ictaluridae (Teleostei: Siluriformes)[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2012.
- [7] Gopalakrishnakone P, Malhotra A. Evolution of venomous animals and their toxins[M]. Dordrecht: Springer, 2015.
- [8] Williamson J. Clinical toxicology of venomous scorpaeidae and other selected fish stings[M]//Meier J, White J. Handbook of clinical toxicology of animal venoms and poisons. Boca Raton: CRC Press, 1995.
- [9] Church J E, Hodgson W C. The pharmacological activity of fish venoms[J]. *Toxicon*, 2002, 40(8): 1083-1093.
- [10] Halstead B W. Poisonous and venomous marine animals of the world[M]. Volume 3: Vertebrates. Princeton: The Darwin Press, 1970.
- [11] 伍汉霖. 中国有毒及药用鱼类新志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.  
Wu H L. New records of ichthyotoxic and medicinal fishes of China[M]. Beijing: Agricultural Press of China, 2002.
- [12] Halstead B W, Vinci J M. 4 Venomous fish stings (Ichthyocanthotoxicoses)[J]. *Clinics in Dermatology*, 1987, 5(3): 29-35.
- [13] Egge J J D, Simons A M. Evolution of venom delivery structures in madtom catfishes (Siluriformes: Ictaluridae)[J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2011, 102(1): 115-129.
- [14] Halstead B W. Poisonous and venomous marine animals of the world[M]. Washington, D.C: U. S. Government Printing Office, 1967.
- [15] Rabson S M. Poisonous and venomous marine animals of the world[J]. *JAMA*, 1967, 199(6): 437.
- [16] Sarmiento B E, Rangel M, Gonçalves J C, *et al.* First report of the characterization of the pathophysiological mechanisms caused by the freshwater catfish *Pimelodus maculatus* (order: Siluriformes)[J]. *Toxicon*, 2015, 101: 55-62.
- [17] Longo D L, Kasper D L, Jameson J L, *et al.* Harrison's principles of internal medicine[M]. 18th ed. New York: McGraw-Hill Medical, 2011.
- [18] 贾中文, 毛世骏, 王义民, 等. 青鱼骨骼标本制作技术[J]. *水产科学*, 2002, 21(1): 43-44.

- Jia Z W, Mao S J, Wang Y M, *et al.* Manufacturing technique of black carp bone specimen[J]. *Fisheries Science*, 2002, 21(1): 43-44 (in Chinese).
- [19] Isbister G K. Venomous fish stings in tropical northern Australia[J]. *The American Journal of Emergency Medicine*, 2001, 19(7): 561-565.
- [20] Fishelson L. Histology and ultrastructure of the recently found buccal toxic gland in the fish *Meiacanthus nigro-lineatus* (Blenniidae)[J]. *Copeia*, 1974, 1974(2): 386-392.
- [21] Halstead B W. Poisonous and venomous marine animals of the world[M]. 2nd ed. Princeton, NJ: The Darwin Press, Inc. , 1988.
- [22] Gopalakrishnakone P, Gwee M C E. The structure of the venom gland of stonefish *Synanceja horrida*[J]. *Toxicon*, 1993, 31(8): 979-988.
- [23] 于业军, 刘晓萍, 张克凌, 等. 中国沿海常见棘毒鱼类的毒性研究——光缸螫伤的调查研究[J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(1): 24-28.
- Yu Y J, Liu X P, Zhang K L, *et al.* Toxicity research of spine poisoning fish frequently found in China coastal waters-Investigation of injury caused by stingray *Dasyatis laevis* Chu[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(1): 24-28 (in Chinese).
- [24] Casewell N R, Wüster W, Vonk F J, *et al.* Complex cocktails: the evolutionary novelty of venoms[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(4): 219-229.
- [25] Li B, Gou M, Han J, *et al.* Proteomic analysis of buccal gland secretion from fasting and feeding lampreys (*Lam-petra morii*)[J]. *Proteome Science*, 2018, 16: 9.
- [26] Paul V J, Arthur K E, Ritson-Williams R, *et al.* Chemical defenses: from compounds to communities[J]. *The Biological Bulletin*, 2007, 213(3): 226-251.
- [27] Emmetsupa B, Cochran P A. The response of a piscivore (*Micropterus salmoides*) to a venomous prey species (*Noturus gyrinus*)[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2010, 25(3): 475-479.
- [28] Lopes-Ferreira M, Barbaro K C, Cardoso D F, *et al.* *Thalassophryne nattereri* fish venom: biological and biochemical characterization and serum neutralization of its toxic activities[J]. *Toxicon*, 1998, 36(2): 405-410.
- [29] Ruxton G D, Sherratt T N, Speed M P. Avoiding attack: the evolutionary ecology of crypsis, warning signals and mimicry[M]. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [30] Casewell N R, Visser J C, Baumann K, *et al.* The evolution of fangs, venom, and mimicry systems in blenny fishes[J]. *Current Biology*, 2017, 27(8): 1184-1191.
- [31] Smith W L, Wheeler W C. Venom evolution widespread in fishes: a phylogenetic road map for the bioprospecting of piscine venoms[J]. *Journal of Heredity*, 2006, 97(3): 206-217.



## Structure of venomous spines of *Pelteobagrus fulvidraco*

FENG Xiaoyu<sup>1,2</sup>, XIAO Jin<sup>2,3,4</sup>, WU Bangyuan<sup>3</sup>, ZENG Yu<sup>2,3</sup>, DU Yonghui<sup>3</sup>, ZHANG Fubin<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, China;

2. Southwest Branch Center of National Freshwater Fishery

Engineering Technology Research Center (Wuhan), Nanchong 637009, China;

3. Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation, Ministry of Education, School of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China;

4. Chengdu Nature Museum, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** *Pelteobagrus fulvidraco*, Richardson, 1846 is a typical freshwater venomous fish. Poisoning events of *P. fulvidraco* stings often occur, which brings great harm to human health. In order to study the venomous spines structure of *P. fulvidraco*, in this study, the methods of macroscopic skelet and microscopic histological section were used. The results indicated that both pectoral fin and dorsal fin of *P. fulvidraco* had sharp spines. Spines were surrounded by integument, which were associated with venom gland cells. The venom gland cells could secrete venom. *P. fulvidraco* venomous spines apparatus is composed of spine shaft, venom gland, and surrounding tissues. Macroscopic observation showed that venomous spines in dorsal and pectoral fins of *P. fulvidraco* had integument surrounding the spine shaft and central canal. Central canal ran through the whole spine shaft. Dorsal venomous spines were elongated, tapered, and slightly arched. Venomous spines of the dorsal fin had a sharp crest and weakly serrated posterior edge. Both anterior and posterior edges of pectoral venomous spines were serrated, but the posterior edge was serrated more obviously. The shape, size and location of the condyle were completely different in the base structure of dorsal and pectoral venomous spines. Microscopic examination showed that the venom gland cells in the integument gathered in layers and were located between the squamous epithelium and the pigment layer. The catheter was not attached to the venom gland cells. Venom gland cells were not found in the branched bony tubes of venomous spines of the dorsal and pectoralis fin. In addition, the branched bony tubes also connect the central canal and integument. Spines of pectoralis fin are triangular as they extend distally outward, with the central canal narrowing and disappearing completely at the apex. The pectoral and dorsal fin locking apparatus could keep the venomous spines in a lodging or upright locking state, thus reducing the probability of prey breaking free, and this behavioral mechanism may be important for its adaptation to complex environments. In the future, the research on venomous fishes should be strengthened. Overall, this study can help deeply understand the structure and characteristics of venomous spines of *P. fulvidraco*, enrich the basic knowledge of freshwater venomous fishes, enhance people's understanding of venomous fish and lay a foundation for further research on freshwater venomous fish.

**Key words:** *Pelteobagrus fulvidraco*; venomous fish; venomous spine; histological section

**Corresponding author:** ZHANG Fubin. E-mail: [sczhangfubin@163.com](mailto:sczhangfubin@163.com).

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (31901219); Sichuan Science and Technology Program (2022NSFSC1646, 2022NSFSC1059); Open Fund of the Chemical Synthesis and Pollution Control Key Laboratory of Sichuan Province (CSPC202010)