

Wu S, He X, Li C H, et al. Discharge patterns and mechanisms of electric eels under different behavioral intentions [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(5): 052601. [武帅, 何骁, 李昌华, 等. 电鳗在不同行为意图下的放电规律及机制 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(5): 052601.]

## 电鳗在不同行为意图下的放电规律及机制

武帅 何骁 李昌华 蔡春伟

(哈尔滨工业大学(威海)新能源学院, 威海 264200)

**摘要:** 为探索电鳗(*Electrophorus electricus*)高效的水下探测与攻击机制, 本文研究了电鳗在不同行为意图下的应对策略及放电规律, 构建了专门的测试场景, 通过整合图像行为记录、数据采集与生物电场仿真, 系统分析了电鳗攻击/防御姿态与放电逻辑的关联及其对应的电器官放电特征。并从电场-电路协同的角度揭示了蜷曲攻击的优势, 通过仿真分析得到其能够将猎物受到的电压提高3倍以上。基于触碰实验, 本文揭示了一种深水环境下通过双/三脉冲进行防御的被动防御机制。通过比较主动与被动防御在行为表现和放电模式上的核心差异, 本研究得到主动防御适用于浅水环境, 而被动防御适用于深水环境这一结论, 为理解电鳗的不同生物行为提供了更完整的理论框架。

**关键词:** 电器官放电; 蜷曲攻击; 被动防御机制; 场景模拟; 电鳗

**中图分类号:** Q959.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2026)05-052601-08

**doi:** 10.3724/1000-3207.2025.2025.0376 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2025.0376



电鳗(*Electrophorus electricus*)作为一种能够产生数百伏特强电脉冲的淡水鱼类, 其独特的生物放电行为在捕食、防御和环境感知中发挥着多重功能<sup>[1]</sup>, 为研究动物行为的生理基础与适应性进化提供了理想模型。自18世纪末起, 威廉姆森(Williamson)、冯·洪堡(Von Humboldt)和法拉第(Michael Faraday)等学者便对电鳗的放电现象进行了初步探索<sup>[2-4]</sup>, 但由于技术手段的限制, 其放电行为的规律及内在机制未能进行系统阐明。

近年来, 电鳗的放电机制已经从细胞、器官及应用形式等层面得到了深入的解析研究, 其放电行为的结构基础在于电细胞具有显著的膜不对称性<sup>[5, 6]</sup>: 后膜密集分布电压门控钠通道, 前膜则几乎缺失, 从而在细胞前后膜间形成50—150 mV的电位差<sup>[7]</sup>。大量电细胞聚集从而构成电器官, 奠定了电鳗放电行为的组织学基础。进一步研究表明, 电鳗演化出三类功能各异的电器官——主器官、萨克斯器官与亨特器官<sup>[8, 9]</sup>, 它们在放电强度与时间特

性上存在显著差异<sup>[10]</sup>。这种多模式放电体系, 构成了电鳗在探测环境、定位猎物与实施攻击等不同行为中的电信号基础, 支撑其在水生环境中的生存与适应。

在捕食行为中, 电鳗展现出电信号与生物行为的高度协同。早期研究已确认其通过低频低压脉冲进行环境探测, 而高频高压脉冲用于猎物的神经麻痹<sup>[11-16]</sup>, 从而对猎物实现有效捕获。肯尼斯·卡塔尼亚(Kenneth Catania)的系列实验进一步揭示, 电鳗在攻击终末阶段常采取身体蜷曲的姿态, 形成电场空间聚集, 从而提升目标所承受电压强度<sup>[17, 18]</sup>。这一行为表明, 电鳗不仅依赖电信号输出, 更能通过姿态调节优化电场空间分布, 实现攻击效率的最大化。然而, 目前对于蜷曲姿态所引起的空间电场变化, 仍缺乏从电场、电势分布及电路拓扑角度开展的定量分析。

在防御维度上, 电鳗依据环境特征采取差异化的行为与放电策略。当面对部分浸入水体的陆生

收稿日期: 2025-10-27; 修订日期: 2025-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(52401406); 山东省泰山学者青年基金(tsqnz20240801)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (52401406); the Taishan Scholars of Shandong Province (tsqnz20240801)]

作者简介: 武帅(1995—), 男, 博士; 研究方向为无人装备及无人系统技术、仿生工程。E-mail: wushuai@hit.edu.cn

通信作者: 蔡春伟(1977—), 男, 博士; 研究方向为无人装备及无人系统技术、人工智能。E-mail: caichunwei@hit.edu.cn

威胁时,电鳗会采取“跃出水面”的攻击方式,此时主器官、萨克斯器官与亨特器官协同作用,释放高频高压电器官放电(Electric Organ Discharge, EOD),其跳跃高度与放电强度呈正相关,构成主动防御行为<sup>[19,20]</sup>。然而在深水环境中,此类跃起行为难以实现,且在实验时未观测到与之对应的现象。据此推测,电鳗在深水条件下可能转而采用区别于主动防御的生物策略,实现对潜在威胁的驱避或警示,其具体形式与生理机制仍有待进一步验证。

目前,对电鳗攻击姿态与空间电场分布的量化关系,以及不同水深环境下防御策略的选择机制,仍缺乏系统性研究。国内大部分研究更侧重于从微观细胞层面解析电鳗的姿态,从电鳗自身行为功能和适用性的角度进行分析的仍为少数。为此,本研究拟通过行为学观测、电信号采集与COMSOL多物理场仿真,重点探究以下问题:(1)电鳗蜷曲攻击姿态对猎物所受电压强度的增强机制与空间电场分布特征;(2)电鳗深淡水环境中不同防御策略的探究及适应性意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验动物与饲养条件

实验所用电鳗共2尾,体长分别为31和33 cm,购自商业鱼类供应商。饲养于定制玻璃缸中,玻璃缸尺寸为140 cm×70 cm×55 cm,水深维持在40 cm,水温控制在25—30℃,pH 7.2,水体电导率约为0.01 S/m。实验期间投喂蚯蚓、磷虾干及鱼苗,使用镊子将食物置于电鳗口器附近以诱导摄食行为。

### 1.2 实验装置与信号采集系统

电鳗放电信号采集装置主要由三部分构成,如图1所示。

- (1)行为观测水缸:采用上述140 cm×70 cm×55 cm玻璃缸,为电鳗提供标准化实验环境;
- (2)自制电极棒:将直径10 mm的石墨电极固定于亚克力棒顶端制成,用于水中电位信号的采集;
- (3)示波记录仪:使用Yokogawa DL850E型示波

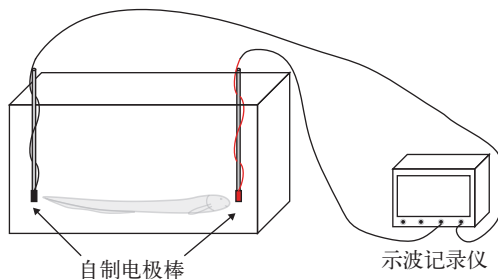


图1 信号采集装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of signal acquisition device

器进行信号记录,采样率设置为10 MS/s。

在EOD波形采集实验中,电极棒垂直于水面布置,正极靠近电鳗头部区域,负极对应尾部方向,以捕捉其典型放电过程中的典型EOD波形。

### 1.3 实验设计

#### (1)攻击行为与EOD采集

为解析电鳗在捕食过程中的攻击行为及放电策略,本研究系统采集了其在自然状态及主动攻击阶段的电信号。在2个月的时间内,每3天为1周期进行实验,每次投喂5条蚯蚓或南极磷虾干制品,利用个体较大的蚯蚓模拟大型猎物,南极磷虾模拟小型猎物,利用镊子将猎物固定于电鳗身体周围来诱发电鳗采取蜷曲攻击行为,同步采集整个过程的EOD波形并进行存储;同时在投喂其中一条电鳗时,观察并记录同一水缸内另一条电鳗的生物行为变化。采用Yokogawa DL850E示波记录仪以10 MS/s采样率全程记录该过程中电压波形变化,分析指标包括脉冲幅值、频率、时序结构及其与电鳗姿态的协同关系。

#### (2)防御行为观测

为探究电鳗在不同威胁情境下的防御策略,本研究设计了机械刺激实验。由实验人员佩戴绝缘手套后,用手轻柔触碰电鳗躯体中段,模拟自然环境中可能遭遇的外界侵扰。每次刺激持续3s,间隔5min以上,以避免适应性干扰。同步记录其电信号响应与行为反应,重点区分高频高压脉冲构成的主动防御,以及中低压脉冲序列所显示的威慑行为,从而比较其在不同刺激强度下的策略选择。

为明确引发电鳗强烈防御性反应(包括剧烈麻木感与反射性回缩)的特定EOD形式,采用手持电极对电鳗施加强刺激,并利用示波器记录其放电波形,从而观察与分析该状态下EOD的具体特征。

为了探究电鳗在深水区中的防御形式,采用直接接触电鳗的方式,通过实验人员感受来评估电鳗的放电方式。作为对照实验,用浅盆模拟浅水环境,使水面能够刚好覆盖电鳗且不阻碍其活动。

以上进行的实验均采用摄像机进行记录,每次录制时长为20min。所有视频素材均导入Adobe Premiere Pro进行后处理,以提取图像序列。

### 1.4 数据处理与仿真建模方法

所采集的EOD信号及实验数据经整理后,导入MATLAB进行离散点图与曲线绘制。文章中出现所有比例值,均以“现象出现次数/总实验次数”计算得到。采用COMSOL Multiphysics软件构建电鳗正常捕猎攻击行为与蜷曲攻击行为两种场景的电场仿真模型,模拟其跳跃攻击的动态过程,水深0.2 m,

模拟浅水环境。用半径为35 mm、高度为35 cm的圆柱体模拟人体手臂, 没入水中的深度为10 cm, 人体的电导率设置为0.02 S/m。电鳗长度为50 cm, 宽度为2 cm, 低于水面2 mm的位置, 电鳗的头部(正极)紧贴着手臂。所有实验示意图及流程绘制均通过Visio完成。

## 2 结果

### 2.1 电鳗攻击行为中的EOD放电与电场优势分析

根据电鳗的不同行为表现, 可将其在不同情境下采取的措施分为攻击、防御和探测(通讯)三类。而电鳗所释放的EOD波形可分为高频高压、双脉冲/三脉冲和低压探测脉冲三种模式, 分别适用于电鳗的不同行为。通过日常观察实验和数据整理, 将电鳗的所有行为与EOD模式进行了整合(图 2)。其中高频高压脉冲的频率为400 Hz左右, 随着脉冲时间的增加而降低, 最高放电电压能够达到100 V, 且高频高压脉冲持续时间并不长, 在2s内结束; 而双/三脉冲的频率在100 Hz左右, 最高放电电压约为40 V, 该种类型的脉冲则主要出现在高频高压脉冲之前; 低压探测脉冲的频率仅为50 Hz左右, 最高电压在10 V以内, 无法对生物造成影响, 非捕食场景下也会存在, 用于感知探测, 在三种波形中出现频率最高<sup>[10]</sup>。

在电鳗的攻击行为中, 主要以正常捕猎攻击行为和蜷曲身体电击猎物的蜷曲攻击行为为主, 两者都采用了密集的高频高压EOD的方式。而电鳗在特定情况下发出的跃出水面的主动防御行为, 此时

电压相比高频高压放电有所降低, 同时变为间断的脉冲, 通过实验发现, 电鳗的防御行为在60%情况下会采取EOD形式为双脉冲/三脉冲的一种被动防御, 以对潜在的危险进行警告、恐吓或驱逐。电鳗在日常活动中, 会采用低频低压的单个脉冲对环境中的导体进行探测搜索。如果环境中藏匿的猎物, 电鳗也会发出双脉冲/三脉冲对猎物进行一个震慑, 使其暴露位置。

此外, 实验结果显示: 当两条相距较远的电鳗中某一条被投喂时, 远处的电鳗在投喂个体发起EOD攻击前对猎物无反应; 而当投喂电鳗释放攻击型放电后, 远处电鳗会立即做出反应, 呈现捕食姿势并迅速游向放电发生位置参与捕食, 该情况在所有实验中的出现频次约为90%。在对电鳗持续投食蚯蚓或者喂食南极磷虾时, 70%的情况下可以看到电鳗采用明显的蜷曲行为进行进食(图 3a)。

为更好理解电鳗采取该行为的原因, 在COMSOL Multiphysics仿真软件中构建电鳗的两种攻击场景, 分析猎物所受电压变化(图 3b—3g)。所有的物体模型都在保证有效说明猎物与电鳗的位置关系对猎物所受的电压如何产生影响的情况下进行了简化。从电流密度方面分析猎物受到的攻击强度, 利用COMSOL仿真模拟, 设定电鳗体长50 cm, 放电电压200 V, 猎物设定为边长1 cm的立方体, 距电鳗头部1 cm。仿真结果显示: 当电鳗未蜷曲身体时, 猎物承受的最大电压为14.566 V; 而当电鳗蜷曲身体使头部和尾部贴近猎物时, 猎物承受的最大电压达51.457 V, 为正常状态的三倍以上。同时我们发现猎物所受的最大电压会随着猎物与电鳗头部的距离或者电鳗自身头尾之间距离的减小而增大。通过仿真计算电鳗正常攻击和蜷曲攻击两种状态下猎物体内的平均电流密度得到的结果分别为156.57和512.12 A/m<sup>2</sup>。当采用蜷曲攻击时, 电流密度变化明显, 对猎物有更好的控制能力。

通过提取电鳗水平横截面上各点的电势, 生成三维电势图(图 4b和4d)。可以明显看出电鳗攻击采用的偶极子模型。在三维图中可以观察到, 电鳗蜷曲后猎物周围的电势梯度显著增加。从数学角度分析, 当电鳗两端的电位差恒定时, 随着两端间距减小, 电势梯度增大。由于猎物的空间位置和长度不变, 电势变化梯度的增加导致猎物承受的电压更高, 从而显著提升了攻击效率。若猎物体型增大, 所提升的攻击电压比例大小更会显著增加。此外, 文中还提供了电鳗所处水平横截面的电流图, 以便直观比较两种模式下的电流分布。

事实上, 从电路角度可以更简洁清晰地理解电

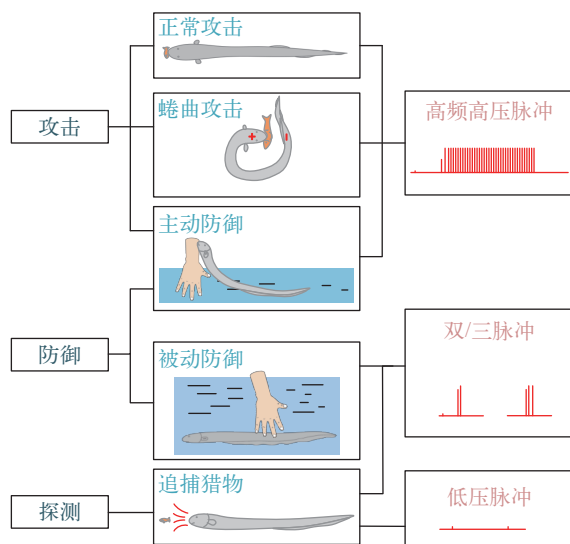


图2 电鳗的生物行为及其对应的电器官放电(EOD)模式  
Fig. 2 Behaviors of electric eels with corresponding EOD patterns

鳗行为的有效性(图 4a和4c)。首先假设电鳗所处的水域为均匀导体,当电鳗蜷曲身体时,电流通过水体的路径缩短,这会降低流经水体的等效阻抗 $R_w$ ,而电鳗的EOD电压、猎物阻抗包括电鳗自身阻抗在宏观层面保持不变。根据电路分压原理,由于水体等效阻抗 $R_w$ 减小,而猎物阻抗 $R_f$ 和电压源内阻 $r$ 不变,猎物承受的电压将显著增加。

对电鳗的放电波形进行测量时,电鳗对电极(导体)迅速做出撕咬反应(图 4e)。利用示波器记录仪

记录这一过程,其中选取的一段典型高频脉冲攻击的原始实验数据波形结果如图 4h所示。需要说明的是,电鳗尾部摆动,电极棒负极难以紧密贴合电鳗尾部,可能导致负极位置偏离0电位点,因此采集数据中记录的电鳗放电电压可能小于实际值,且误差幅度难以估算。将高频EOD波形的电压大小、持续时间和序列号一一对应进行提取,整理成表后绘制离散曲线图(图 4f—4j)。结果显示,脉冲间隔或周期与释放电压并无直接关联,呈随机分布;但

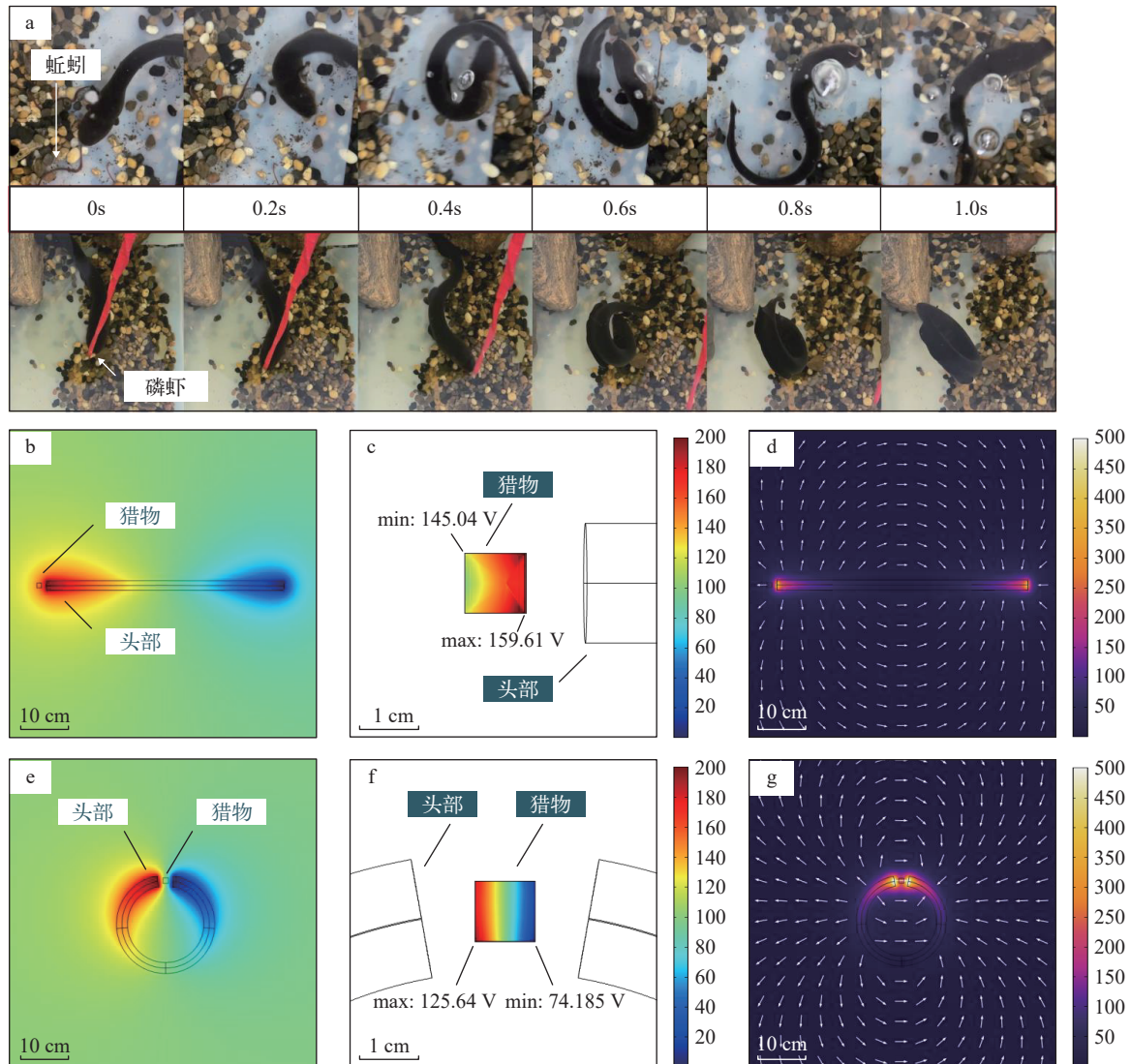


图 3 电鳗攻击行为的图像采集与模拟分析

Fig. 3 Image acquisition and simulation analysis of electric eel attack behavior

a. 电鳗对蚯蚓(上)和固定在电极上的磷虾(下)表现出蜷曲行为的摄影记录; b. 电鳗常规攻击状态下的空间电场分布; c. 常规攻击状态下作用于猎物的电场分布; d. 常规攻击状态下整体电流密度分布及电流箭头的电场分布; e. 电鳗蜷曲攻击状态下的空间电场分布; f. 蜷曲攻击状态下猎物所受的电场分布; g. 蜷曲攻击状态下整体电流密度分布及电流箭头的电场分布

a. Photographic record of curling behavior exhibited by electric eels on earthworms (top) and krill fixed on electrodes (bottom); b. Spatial distribution of electric field in the electric eel's ordinary attack state; c. Distribution of electric field applied to the prey in the state of ordinary attack; d. Overall current density distribution and electric field distribution of current arrows in the normal attack state; e. Spatial distribution of the electric field in the curled-up attack state of the electric eel; f. Distribution of the electric field to which the prey is subjected in the curled-up attack state; g. Overall current density distribution and electric field distribution of current arrows in the curled-up attack state

将脉冲序列与频率、电压绘制离散图时,发现EOD脉冲的顺序与频率、电压存在一定关联。

从波形可以看出,电鳗在对猎物捕食前会释放一对双脉冲,随后释放出低频低压探测脉冲阵列,平均频率为10 Hz,最高频率为13 Hz,电压大小在数百毫伏。双脉冲结束1.4s后,电鳗开始撕咬电极并发出高频EOD攻击,在刚接触时释放的频率最高

达到了370 Hz,随后呈现下降趋势,整个EOD序列的平均频率为100 Hz。

### 2.2 防御现象的场景模拟与探索

实验中未观察到电鳗在摄食过程中跳跃,电鳗面对陆生生物时采取极端主动防御而非逃离的原因:亚马逊雨季许多区域水位上涨,包括电鳗在内的鱼类栖息其中,但旱季迅速来临时水位骤降,形

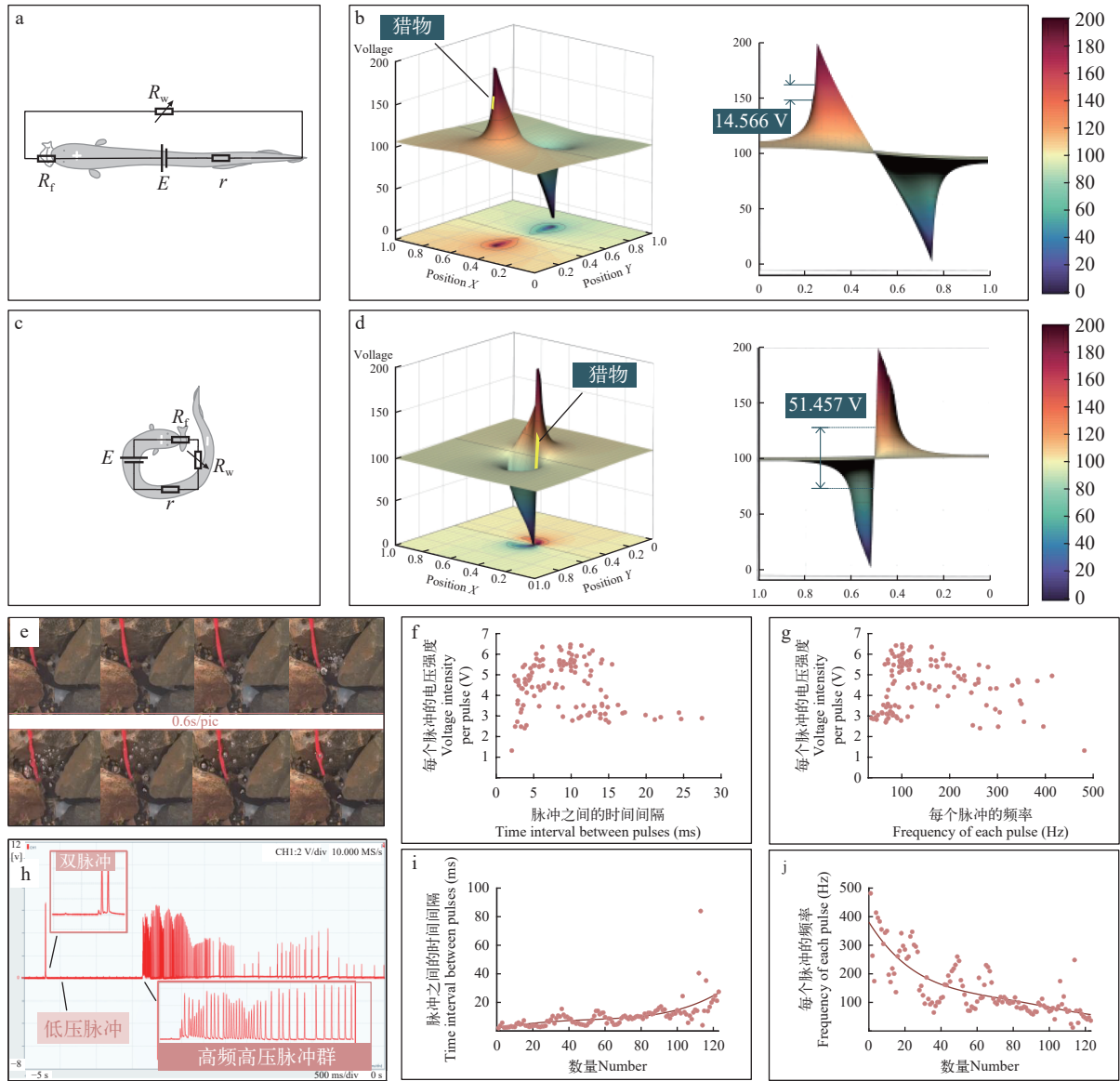


图4 电鳗建模分析与EOD攻击数据整合

Fig. 4 Modeling analysis of electric eels and integration of EOD attack data

a. 电鳗常规攻击模式等效电路; b. 常规攻击模式下三维电势图; c. 电鳗蜷曲攻击模式等效电路; d. 蜷曲攻击模式下三维电势图; e. 电鳗撕咬电极的图片序列; f. 脉冲时间间隔与电压幅值关系; g. 脉冲频率与电压幅值关系; h. 电鳗撕咬电极的波形采集实验波形; i. 脉冲序列与持续时间关系图; j. 脉冲序列与频率关系图

a. Equivalent circuit of the regular attack mode of electric eels; b. 3D potential map under the regular attack mode; c. Equivalent circuit of the curled attack mode of electric eels; d. 3D potential map under the curled attack mode; e. Sequence of pictures showing electric eels biting the electrode; f. Relationship between pulse time interval and voltage amplitude; g. Relationship between pulse frequency and voltage amplitude; h. Collected waveforms from the experiment of electric eels biting the electrode; i. Graph of the relationship between pulse sequence and duration; j. Graph of the relationship between pulse sequence and frequency

成孤立浅池,电鳗无处可逃,或需保护幼体,此时可能被迫发动跳跃攻击<sup>[4]</sup>。这解释了为何实验中未观察到跳跃攻击现象——假设电鳗在定制水缸中(深水)认为自己所处的环境较为安全,不会发动主动攻击,对于外来的威胁会采用水下放电的其他防御形式,而若将电鳗置于水盆(浅水),电鳗认为自己所处的环境很恶劣,面对威胁会发出跳跃式的高频攻击。

为验证上述现象,进行了如图 5a 所示的直接触碰实验。在接触一段时间后,手部在某一时刻能明显感知到从下至上、非疼痛但强烈的麻木感,麻木程度从手腕到肘部因人而异。这导致手臂不由自主地快速回缩——这可以视为电鳗除跃出水面主动防御外的另一种更保守的防御形式,对领域入侵的威胁性生物进行的一种驱逐或是被动防御。

为探究引发强烈麻木感和反射性回缩的 EOD 形式,用电极手动触碰电鳗时,可观察到电鳗表现

出对电极的激烈撕咬等强烈反应,判断其已被激怒,发现被动防御释放的 EOD 为双脉冲或三脉冲形式。如图 5b 和 5c 所示的实验波形显示,每次脉冲攻击均由一个电压略低的脉冲启动,这与许军老师团队对中压脉冲的描述一致<sup>[10]</sup>,此类电压特征在双脉冲攻击中尤为常见。

由此可见,电鳗使用脉冲攻击来驱逐威胁性生物所采用的 EOD 形式,与搜索潜在猎物所释放的双脉冲和三脉冲是一致的。这可以从电鳗的立场来理解,在深水区中面对水下威胁时,采用能引发猎物肌肉抽搐的双脉冲来对猎物进行恐吓驱赶比使用高频密集 EOD 将危险生物进行麻痹留在自己的领地范围更加高效。

在模拟浅水环境的实验中,将电鳗放入后,它起初在盆中快速后退,似乎试图寻找藏身之处。待电鳗冷静一段时间后,准备一块铜板并部分浸入水中,随电鳗缓慢移动。在不到 1min 内,电鳗在数次

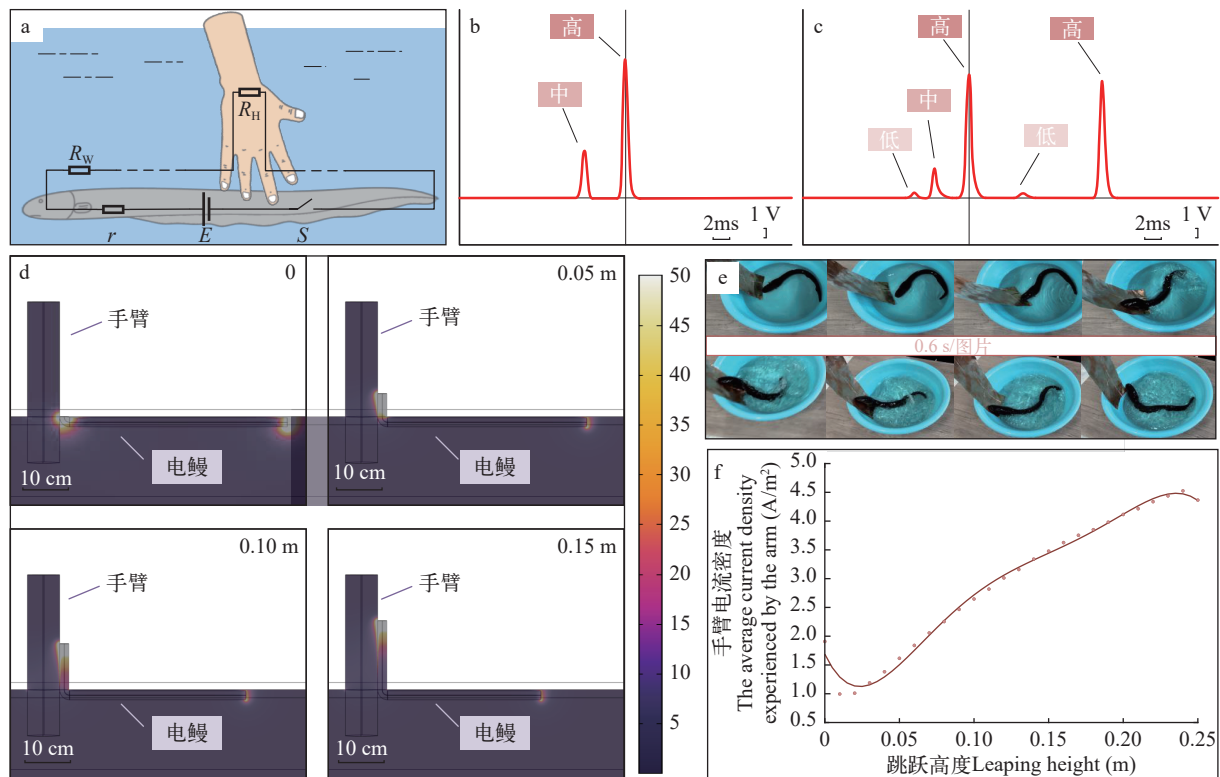


图 5 电鳗防御模式分析与实验验证

Fig. 5 Analysis and experimental validation of the electric eel's defense mode

a. 触碰电鳗的示意图及等效电路图; b. 触碰实验中捕捉到的电鳗被动防御释放的双脉冲; c. 触碰实验中捕捉到的电鳗被动防御释放的三脉冲; d. 电鳗跃出水面 0.1 m 时的电流密度分布; e. 模拟浅水环境时捕捉到的电鳗主动防御跳跃攻击现象; f. 人体所受平均电流密度与电鳗跳跃全过程高度的对应拟合曲线

a. Schematic and equivalent circuit diagram of the touching electric eel; b. Double pulse emitted by passive defense of electric eel captured in touch experiment; c. The touch experiment captured the triple pulse emitted by the passive defense of electric eels; d. Current density distribution of the electric eel leaping 0.1 m out of the water; e. Leap-up attack phenomenon of active defense of electric eel captured when simulating shallow water environment; f. The fitted curve of the correspondence between the average current density experienced by the human body and the height of the electric eel during the whole leaping process

试探靠近铜板后, 迅速跃起攻击, 将下颌压在铜板上并用力向上攀爬, 全过程如图 5e 所示。

将 COMSOL 仿真软件中得到的模拟电鳗跳跃攻击数据进行归纳整理, 将人手所受电流密度进行拟合绘图, 得到电鳗跃出水面 0.1 m 时的电流密度分布图(图 5d)及对应变化曲线(图 5f)。

结果表明, 电鳗跃出水面时施加于猎物的电流显著增加, 且与跳跃高度成正比。这种放电方式相比水下放电更易击退或麻痹猎物, 但跃出水面也使电鳗暴露于空气中, 丧失了逃脱和隐藏的机会。

### 3 讨论

#### 3.1 攻击行为模式与电场特性分析

在攻击模式中, 本文通过喂食实验观察并记录了电鳗的蜷曲攻击行为。实验还发现: 当一条电鳗发生攻击并伴随放电时, 同缸另一条电鳗会出现定向游向放电区域的趋向反应。该现象提示电鳗可能能够感知同类的 EOD 活动并据此产生行为响应; 但目前尚无详细资料解释电鳗用于通讯的具体电器官和 EOD 形式。

利用电生理观测设备同步记录捕食过程中的 EOD 波形并进行统计, 将电鳗的行为表现与 EOD 策略进行关联分析。结果表明, 电鳗在不同情境下可释放低压探测脉冲、双/三脉冲以及高频高压脉冲三类典型策略; 从脉冲幅值角度可进一步划分为低、中、高三个电压等级, 且在同一序列中 EOD 频率随脉冲序号增加呈递减趋势。为解释蜷曲攻击的作用机理, 本文进一步使用 COMSOL 对两种攻击姿势下的电场分布进行仿真, 并结合等效电路模型进行分析; 不同于 Catania 基于宏观电场指标的讨论<sup>[18]</sup>, 本研究引入了电势差与电流密度等量化指标, 用于表征蜷曲姿态下猎物所受局部电刺激的增强效应。综合实验观测与模型分析, 蜷曲攻击能够提高施加于猎物的等效电压/局部刺激强度, 从而降低其逃逸概率。

#### 3.2 被动防御机制及其环境适应性策略

对于电鳗的防御状态, 在深水区触碰诱发实验中获取 EOD 波形, 观察到一种与 Catania 报道的“跳跃放电”主动防御<sup>[19, 20]</sup>不同的防御方式: 电鳗在全身浸没条件下释放双/三脉冲对潜在威胁进行驱逐。随后, 对跳跃主动防御开展场景建模与仿真分析, 并将其与上述浸没条件下的被动驱逐进行对比。等效电路分析表明, 在浸没条件下水体等效电阻最大, 目标承受电压相对较低, 但电鳗可保持隐蔽性与机动性; 而在跳跃主动防御中, 离水姿态使电流路径更集中于与目标接触的区域, 目标承受电

压随跳跃高度增加而升高, 但电鳗自身也暴露于空气中并可能增加自身风险。由此推测, 在复杂开阔的深水环境中, 采用双/三脉冲进行警告与驱逐可能更有利于电鳗在较低能量成本下实现安全防御; 而在逃逸受限的浅水环境中, 面对部分离水的大型威胁对象时, 较为保守的浸没驱逐可能不足以形成有效威慑, 电鳗则更倾向于采取高风险高收益的跳跃式主动防御策略。

### 4 结论

本文分析了电鳗的姿态行为与 EOD 策略的逻辑关联, 聚焦攻击与防御机制。研究通过 COMSOL 仿真与等效电路模型分析, 从电场-电路协同角度揭示了蜷曲攻击姿态增强猎物电压及防止其逃脱的有效性, 且通过实验观测证实该行为普遍适用于各类猎物。在防御方面, 除已知的跳跃式主动防御外, 本研究揭示了电鳗在深水环境下广泛采用节能、隐蔽的双/三脉冲被动防御形式。模拟验证表明, 电鳗能根据环境调整策略: 在深水区倾向于高安全性的被动防御, 而在浅水区面对大型陆生威胁时, 则采取高风险、强威慑的跃出水面的主动防御。这一发现为理解生物电场的环境适应性演化提供了新视角。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

#### 参考文献:

- [1] Ren J F, Jiang Y Q, Wang Y X, *et al.* Structure, function, and mechanism of ichthyotoxin [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(1): 012514. [任建峰, 江妍秋, 汪勇翔, 等. 鱼毒素的结构、功能和作用机理 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(1): 012514.]
- [2] Plumb C. The ‘electric stroke’ and the ‘electric spark’: anatomists and eroticism at George Baker’s electric eel exhibition in 1776 and 1777 [J]. *Endeavour*, 2010, 34(3): 87-94.
- [3] Finger S, Piccolino M. The Shocking History of Electric Fishes: From Ancient Epochs to the Birth of Modern Neurophysiology V [M]. Oxford: Oxford University Press, 2011: 88-97.
- [4] Faraday M. Experimental researches in electricity [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1832(122): 125-162.
- [5] Gallant J R, Traeger L L, Volkening J D, *et al.* Genomic basis for the convergent evolution of electric organs [J]. *Science*, 2014, 344(6191): 1522-1525.
- [6] Cao X, Song Z, Horng T L, *et al.* Electric potential generation of electrocytes: Modelling, analysis, and computation [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2020(487): 110107.
- [7] Carlson, Bruce A. Animal behavior: electric eels amp up

- for an easy meal [J]. *Current Biology*, 2015, **25**(22): R1070-R1072.
- [8] Traeger L L, Sabat G, Barrett-Wilt G A, *et al.* A tail of two voltages: Proteomic comparison of the three electric organs of the electric eel [J]. *Science Advances*, 2017, **3**(7): e1700523.
- [9] Sillar K T, Picton L D, Heitler W J. The Neuroethology of Predation and Escape [M]. Hoboken: Wiley, 2016: 140–177.
- [10] Xu J, Cui X, Zhang H. The third form electric organ discharge of electric eels [J]. *Scientific Reports*, 2021(11): 6193.
- [11] Szabo T. The origin of electric organs of *Electrophorus electricus* [J]. *The Anatomical Record*, 1966, **155**(1): 103-110.
- [12] Traeger L L, Volkening J D, Moffett H, *et al.* Unique patterns of transcript and miRNA expression in the South American strong voltage electric eel (*Electrophorus electricus*) [J]. *BMC Genomics*, 2015, **16**(1): 243.
- [13] Hagiwara S, Szabo T, Enger P S. Physiological properties of electroreceptors in the electric eel, *Electrophorus electricus* [J]. *Journal of Neurophysiology*, 1965, **28**(5): 775-783.
- [14] Coates C W, Cox R T, Granath L P. The electric discharge of the electric eel, *Electrophorus electricus* (Linnaeus) [J]. *Zoologica: Scientific Contributions of the New York Zoological Society*, 1937, **22**(1): 1-32.
- [15] Nelson M E, MacIver M A, Coombs S. Modeling electrosensory and mechanosensory images during the predatory behavior of weakly electric fish [J]. *Brain, Behavior and Evolution*, 2002, **59**(4): 199-210.
- [16] Snyder J B, Nelson M E, Burdick J W, *et al.* Omnidirectional sensory and motor volumes in electric fish [J]. *PLoS Biology*, 2007, **5**(11): e301.
- [17] Catania K. The shocking predatory strike of the electric eel [J]. *Science*, 2014, **346**(6214): 1231-1234.
- [18] Catania K C. Electric eels concentrate their electric field to induce involuntary fatigue in struggling prey [J]. *Current Biology*, 2015, **25**(22): 2889-2898.
- [19] Catania K C. Leaping eels electrify threats, supporting Humboldt's account of a battle with horses [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(25): 6979-6984.
- [20] Catania K C. Power transfer to a human during an electric eel's shocking leap [J]. *Current Biology*, 2017, **27**(18): 2887-2891.

## DISCHARGE PATTERNS AND MECHANISMS OF ELECTRIC EELS UNDER DIFFERENT BEHAVIORAL INTENTIONS

WU Shuai, HE Xiao, LI Chang-Hua and CAI Chun-Wei

(School of New Energy, Harbin Institute of Technology, Weihai 264200, China)

**Abstract:** The efficient underwater sensing and attack mechanisms of electric eels provide significant inspiration for the development of biomimetic equipment. To this end, this paper investigates the response strategies and discharge patterns of electric eels under various behavioral intents. By constructing specialized test scenarios and integrating behavioral recordings, data acquisition, and bio-electric field simulations, we systematically analyzed the correlation between attack/defense postures and discharge logic, as well as the corresponding discharge characteristics of electric organs. The results reveal that a curled attack posture enhances targeting efficiency through synergistic electric field and circuit interactions. Simulations indicate it can increase the voltage delivered to prey more than three times. Touch-based experiments further identified a deep-water passive defense mechanism through double/triple pulses. By comparing behavioral and electrogenic organ discharge (EOD) patterns in active and passive defense, this study concludes that active defense is suitable for shallow water, while passive defense is suitable for deep water environments, providing a more complete theoretical framework for understanding the different biological behaviors in electric eels.

**Key words:** EOD; Curled attacks; Passive defense mechanism; Scenario simulations; Electric eels