



水下金属的腐蚀电场诱发西伯利亚鲟摄食行为反应

张旭光^{1,2}, 陈佳², 刘鑫³, 季遥⁴

1. 上海海洋大学海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306;
2. 上海海洋大学海洋生物系统与神经科学研究所, 上海 201306;
3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
4. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335

摘要: 鲟具有古老的电感受系统, 但鲟的电感受功能一直是有争议和被忽略的研究方向。为确定西伯利亚鲟(*Acipenser baerii*)电感受在摄食中的作用, 本研究通过行为学的方法, 研究了人工养殖的西伯利亚鲟对水下铝棒、绝缘铝棒和塑料棒的行为反应。西伯利亚鲟对水下铝棒、绝缘铝棒和塑料棒都产生了类似觅食的绕棒反应, 且绕棒次数没有显著差异($P>0.05$); 但鲟对铝棒比对绝缘铝棒和塑料棒有更强烈吸吮棒表面的行为反应($P<0.01$), 鲟对铝棒的摄食偏好强度为 2, 而对绝缘铝棒和塑料棒的摄食偏好强度为 0.96 和 0.28, 表明水下腐蚀电场诱发了西伯利亚鲟摄食反应, 鲟的电感受在摄食行为的最后阶段起到了饵料判别的作用。本研究结果也表明, 对金属腐蚀电场的反应可以作为验证鲟电感受是否存在的一个行为模型, 同时也对鲟资源的保护提出了新的思路。

关键词: 水下电场; 电感受; 行为谱; 鲟; 摄食行为

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)10-1272-09

鱼类的电感受系统是一种古老的感觉系统, 目前只存在于软骨鱼类和少数硬骨鱼类中。进化研究表明, 电感受系统至少经历过二次演变, 在大多数硬骨鱼类消失, 仅在少数硬骨鱼类中重新特化^[1-2], 在其摄食、求偶等行为中有重要作用^[2]。鲟隶属软骨硬鳞鱼类, 是介于软骨鱼类和硬骨鱼类之间的过渡类型, 迄今已生存近 5 亿年, 被称为“活化石”^[1], 是研究鱼类进化的重要对象。更为重要的是, 鲟具有同样古老的电感受系统^[2]。鲟共有 2 科 6 属 27 种, 其中中华鲟是我国一级保护动物^[3]。鲟电感受系统的结构形态在西伯利亚鲟(*Acipenser baeri*)^[4]、匙吻鲟(*Polyodon spathula*)^[5]、铲吻鲟(*Scaphirhynchus platorynchus*)^[6]、中华鲟(*Acipenser sinensis*)^[7]有过报道。水生动物在呼吸、运动等生命活动中, 会在身体表面形成一个具有

种间差异性的弱电场信号, 其频率和电压大小则可作为电感受鱼类捕食的感觉线索^[8]。Zhang 等^[9]曾对西伯利亚鲟的小型饵料鱼生物电场进行测量, 发现饵料鱼具有头负尾正的偶极子电场特征, 鲟的电感受神经元对偶极子电场的方向性也存在明显的相位锁定反应。但鲟依靠电感受进行摄食的行为学证据相对较少, 且鲟是否存在电感受摄食行为也存在很大争议^[7,10]。梁旭方^[7]通过行为学观察发现人工养殖的中华鲟幼鱼主要吸食活水蚯蚓, 而对水蚯蚓汁没有反应, 因此认为电感受在其摄食行为中起主要作用。然而, 庄平等^[10]对长江口误捕的中华鲟幼鱼进行不同感觉器官摘除或抑制的实验研究, 发现去除电感受器官后幼鱼的摄食量(活水蚯蚓)没有改变, 而去除嗅觉和触觉后摄食量显著减少, 因此认为中华鲟的摄食主要依靠

收稿日期: 2021-03-22; **修订日期:** 2021-05-05.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0900905); 中国三峡集团科标业项目(2021HJ8-002).

作者简介: 张旭光(1980-), 男, 博士, 研究方向为鱼类感觉行为学. E-mail: xg-zhang@shou.edu.cn

通信作者: 季遥, 工程师, 研究方向为环境电场监测与评估. E-mail: jiyao@sidri.com

嗅觉和触觉,电感受的作用不大。这两个矛盾的实验结论一方面可能由于实验方法差异导致,另一方面也与鲟多感觉的协同作用有关^[11]。

本研究以人工养殖的西伯利亚鲟为研究对象,利用水下金属棒的腐蚀电场作为单一电场刺激源来研究鲟对单一物理电场的反应。金属在潮湿环境或水中由于电化学反应会产生腐蚀电池,金属离子进入环境形成微弱的腐蚀电流,产生腐蚀电场^[12]。腐蚀电场是自然界水域里比较常见的一种非生物电场源。通过研究西伯利亚鲟对水中金属腐蚀电场的反应,可验证其电感受行为功能,从电感受行为出发提出对自然水域中鲟保护的新思路。

1 材料和方法

1.1 实验动物

实验用西伯利亚鲟来自浙江杭州市千岛湖鲟龙科技公司,体长范围为 15~25 cm。实验前,鲟在室内玻璃循环水槽系统内暂养 1 周左右,以适应水环境的变化。室温保持在 25 ℃,水温为 22 ℃,每天投喂人工颗粒饵料 1 次。暂养期间,只有颗粒饵料的化学气味诱导鲟的摄食行为,无声音、电场等刺激方式。但暂养与实验水环境中不可避免存在由于供电系统产生的交流电场。实验前 24 h 停止喂食,随机选取健康、活力较强的鱼进行实验。实验结束后,放入另一暂养缸继续养殖,以避免同一条鱼重复进行实验。

1.2 实验方法

1.2.1 行为实验设置与方法 行为实验测试了在水槽内铝棒的腐蚀电场对鲟的行为影响。由于鲟在有限空间会形成规则的绕壁游泳模式,实验在六角形(近似圆形)的玻璃水槽中进行,以减少鲟碰壁的次数。水槽每侧玻璃规格 50 cm×30 cm,对角线长为 1 m。水槽外壁贴有黑色遮光膜,内侧光滑。实验时水槽内为曝气自来水,水温 22 ℃,水深 20 cm,水电导率为(770±10) μs/cm。水槽外侧设置自制夹持器固定测试棒。测试棒为直径 2.0 cm 的铝棒、绝缘铝棒(绝缘胶带包裹)和塑料棒,长度约为 30 cm 以方便水槽外固定。测试棒平行置于距离水槽内侧壁 7.5 cm 的中线上,该距离可以保

证鲟可以在棒与槽壁之间自由通行,并在水槽底部绘制 2.5 cm×2.5 cm 网格(图 1),以确定实际鲟的位置和运动轨迹。实验在黑暗条件下(晚上关闭日光灯)进行以避免光线对鲟行为的影响,并在水槽斜上方设有一个红外数字硬盘摄像机(VM-2000, Sciensys, Shanghai)记录实验鱼对水下测试棒的行为反应。由于鲟对红外线极不敏感,因此对鲟而言红外线也等同于黑暗条件^[13]。为防止玻璃反光,对着摄像机的一侧水槽内壁贴有亚光黑色遮光膜。摄像机通过视频采集卡与电脑相连,采集率为 25 帧每秒,视频数据存储后进行离线分析。

实验前,鲟禁食 24 h 以保证足够的摄食动机。实验时,先将鲟放入水槽适应 30~60 min,鲟适应水槽环境后,通常表现为规则的绕壁游泳方式。当鲟位于测试对侧时将测试棒固定于自制夹持器中,以随机顺序和位置测试铝棒、绝缘铝棒和塑料棒。每种棒的测试时间为 5 min,不同测试间设有 10 min 以上的时间间隔以消除或减少实验鱼对棒位置的记忆及测试棒的残留信息。待鲟恢复规则绕壁运动后进行第二轮测试。

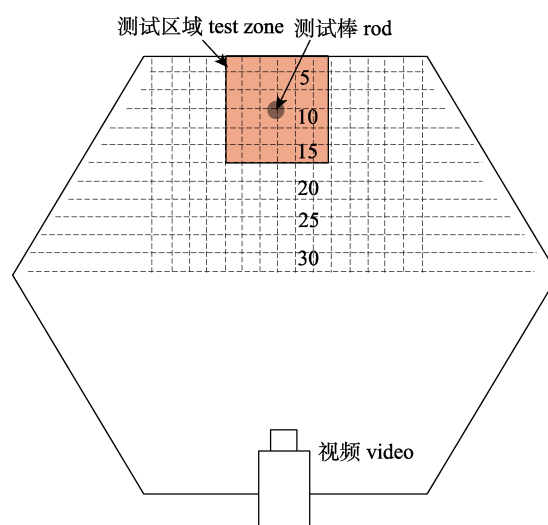


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 The planform of experiment equipment

在测试棒存在的情况下,鲟原先正常规则绕壁的行为发生明显变化,表现为明显的绕棒和吸吮棒的行为特征。为了定义鲟这种行为的性质(避害或摄食等性质),实验还对比测试了鲟对饵料管的行为反应。饵料管为中空透明塑料管,管壁有

许多孔径小于饵料直径的小孔,将人工颗粒饵料置入内,管内饵料的味道可通过管壁扩散,但饵料不能被鲟吸吮出。

1.2.2 腐蚀电场的测量 水下铝棒的腐蚀电场由一对 Ag/AgCl 电极进行测量。测量时记录电极置于距离铝棒表面约 5 mm 处,并通过三轴微操固定来减少电极振动对测量信号的影响。参考电极与记录电极相隔 70 cm 左右(对角线),水槽内水温 25 °C,水电导率为(770±10) μs/cm。测量信号通过差分放大器(CED1902) 1000 倍增益,0.1~1000 Hz 的带通过滤,再由数模转换器(CED system, 1401 mk II, Cambridge, UK)存入电脑,由信号处理软件 Spike II (wave analysis, Cambridge, UK)进行峰值和频谱分析。同时,作为对照,还测量了绝缘铝棒表面 5 mm 处的信号,以及在没有棒情况下的背景信号。

1.3 分析方法

1.3.1 行为分析方法 实验记录了 21 条鲟的行为反应,并采用离线视频逐帧法分析了鲟的行为特征,即将视频录像以慢速播放,记录每帧时鱼吻尖的位置,帧位置则采用水槽底部 5 cm×5 cm 网格线来确定。鲟的运动轨迹通过连接每帧位置点的方法确定,根据运动轨迹特征将鲟的行为进行分类,并以不同字母定义,然后在记录时间内将代表这些行为特征的字母按时间顺序组合,构建鲟的行为序列谱。

在饵料管的刺激下,鲟产生了与铝棒存在时相类似的行为特征。因此,将鲟围绕测试棒游动(或附近停留)和吸吮测试棒表面的行为分别定义为觅食和扑食行为。分析时设置以棒为中心的测试区(图 1,红色区域),统计所有测试棒存在时目标区内的觅食和扑食行为的次数。鲟的喙尖进入目标区开始绕棒(包含不间断连续绕棒)或停留,直至游出目标区视为一次觅食行为。扑食行为则为鲟在目标区从吸吮开始到结束的一次连续行为,包含多次连续吸吮。动物对已确定的合口食物往往直接进行咬食,而较少进行探索。很显然扑食行为次数(N_s)与觅食行为次数(N_f)体现了鲟对测试棒的摄食偏好强度(preference degree, P_d)。基于这种考虑,我们定义了摄食偏好度的计

算公式为 $P_d=N_s/N_f$,偏好度小于 1 表明较低摄食倾向。偏好度的计算公式表明鲟对某种刺激的偏好度正相关于扑食行为,而反相关于觅食行为,即对食物的探索的时间越短,扑食次数越多,说明对该食物就越偏好。

1.3.2 统计检验方法 实验中测试棒的类型是影响鲟对某种感觉刺激的行为偏好的主要因子。而这种偏好性表现为鲟对棒的行为反应模式,即是否发生觅食和扑食行为或避让行为。因此,本研究主要统计了不同测试棒在觅食行为和扑食行为的次数和差异。

统计前,首先验证数据是否满足正态分布和方差齐次检测。由于本次实验数据差异较大,包含无反应的情况($n=0$),则对数据进行对数 $\lg(n+1)$ 转换以满足正态分布和方差齐次检测。单因素重复测量方差分析(one way RM ANOVA)用于检测鲟对 3 种测试棒的反应是否存在差异,如果存在差异,则事后检验(Holm-Sidak Test)用于分析组间差异,差异显著度设为 0.05。所有数据均以平均值±标准差($\bar{x}\pm SD$)来表示,统计分析由 SigmaPlot (11.0)完成。

2 结果与分析

2.1 铝棒产生的腐蚀弱电场

实验前,分别测量了铝棒、绝缘铝棒和无棒时水下电场信号。结果表明,在铝棒 5 mm 处产生了明显的腐蚀电场,其峰幅值大小约为 90 μV,绝缘铝棒和无棒时的信号带较窄,其幅值为 10~15 μV(图 2a)。傅立叶分析表明,铝棒的噪声信号中存在大量直流电场和微弱的交流调制电场,在频率谱上表现为幅度较大的 0~1 Hz 频率峰和幅度较小的 1~2 Hz 频率峰。而无棒和绝缘铝棒的频率谱上只出现一个幅度较小的 0~1 Hz 频率峰,约为铝棒幅度的 1/3(图 2b)。在测量条件和方法相同的情况下,可以认为铝棒在水中产生明显的腐蚀弱电场,绝缘铝棒没有产生或产生极其微弱的电场信号。

2.2 鲟的行为序列谱

鲟在水槽中适应一段时间后,表现为沿着水槽壁进行环绕运动,但在水层的深度不固定,有

时贴水槽底,有时侧身贴壁,有时头浮出水面。这可能反映了鱼类对有限空间一种刻板性反应。当水槽内放入测试棒后,鲟的行为明显发生变化,有以下几种反应模式:(1)继续沿着水槽壁运动,并从测试棒与水槽壁之间穿过(图 3a),在实验开始刚放入测试棒和实验后期一般以这样的行为模式为主,以字母 W 表示;(2)改变原先的游泳路线,对测试棒先有探索性的趋近反应,随后游离(图 3b 和图 3c),以字母 T 表示;(3)对测试棒有明显的趋近反应,绕棒游动,或停留在棒附近,甚至吮吸测试棒表面(图 3d),以字母 R 表示。图 3 所示的运动轨迹为实验中鲟出现的 2 种相似的反应模

式。(4)放入铝棒后,个别实验鱼($n=2$)在第一次游向铝棒时,会发生明显的避让反应,以字母 A 表示。这种避让反应与趋近游离的反应在路径上有相似,但主要区别在于,避让反应是十分迅速的调转游泳方向。在全部实验过程中只观察到 6 次明显的避让行为,在总数达 534 次行为特征统计中只占 1%。

通过将表示鲟的行为特征的字母按时间顺序排列,则构建了鲟的行为序列谱(图 4)。行为序列谱反映了鲟对不同测试棒反应的空间和时间分布特征。从行为序列谱中可以明显看出,在实验初期,鲟的行为是规则的沿水槽壁游泳的 W 为主,

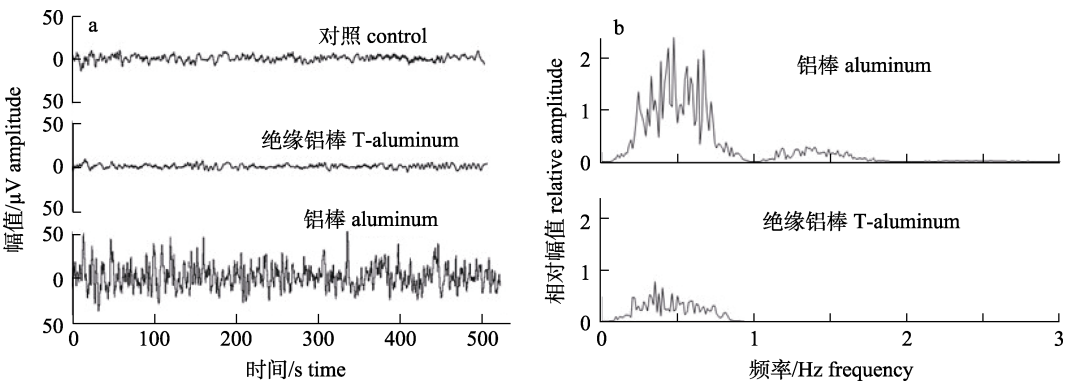


图 2 腐蚀电场波形(a)和频率谱(b)
Fig. 2 The waveform (a) and frequency spectrum (b) of electirc field

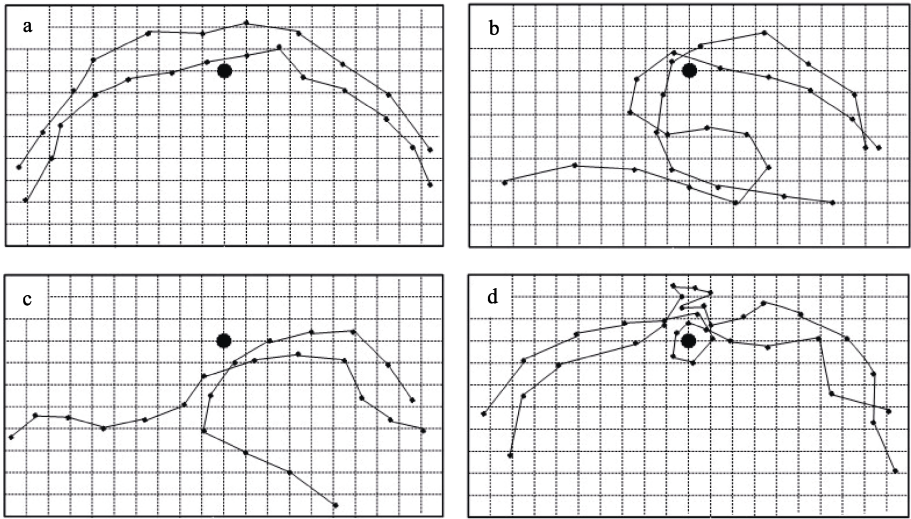


图 3 西伯利亚鲟行为特征示意图
图中网格大小为 2.5 cm×2.5 cm; 黑点表示每帧鲟吻尖位置; 实心黑圆为棒位置.
Fig. 3 The behavior responses of *Acipenser baerii*
Each grid size is 2.5 cm×2.5 cm. The black dot indicates the position of sturgeon snout tip in each frame. Solid black circle indicates the rod position.

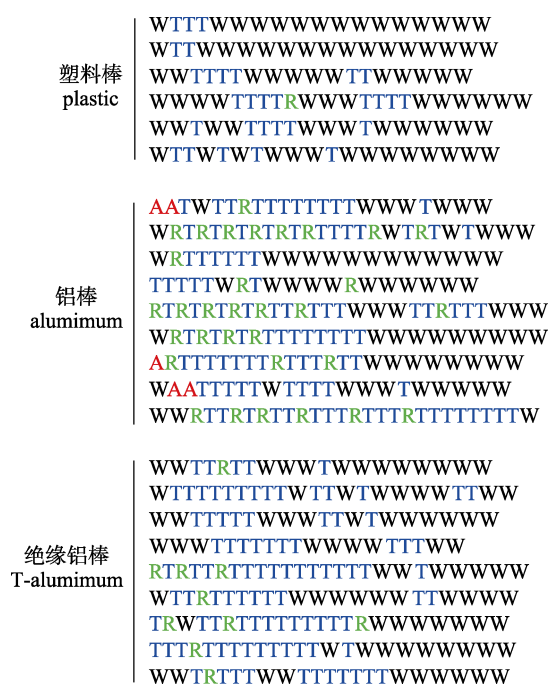


图 4 西伯利亚鲟行为序列谱示意图

该图只列出部分实验鱼的行为反应。W: 沿水槽壁游泳行为;

A: 避让行为; T: 绕棒行为; R: 吸吮行为。

Fig. 4 The behavior sequence of *Acipenser baerii*

Only some of the behavioral responses of the experimental fish are shown. W: swimming along the wall of tank; A: avoidance;

T: circling around the rod; R: sucking at the rod.

实验初期少数实验鱼还出现了避让行为 A。实验中期, 绕棒行为 T 与吸吮行为 R 交替发生, 但通常多次绕棒后才有吸吮行为。在实验后期鲟可能对环境产生适应性, 又恢复初始的规则绕壁游动。

2.3 鲟的行为分析

在管内饵料的刺激下, 鲟表现出明显的围绕饵料管和吸吮饵料管的行为模式(图 5)。由于管中的饵料颗粒直径大于管壁的孔径, 鲟并不能真正获取到食物, 但很明显鲟受饵料气味诱导, 试图通过绕棒和吸吮来摄取饵料。因此, 笔者将这种鲟绕棒的行为定义为觅食行为, 而在测试棒表面的吸吮行为定义为扑食行为。铝棒存在时, 鲟明显出现了与饵料刺激诱发的相类似的绕棒觅食和吸吮棒表面的扑食行为, 而且在实验开始阶段, 个别鲟还出现明显的避让反应。绝缘铝棒放入水中后也引起了鲟的规则绕壁运动模式的变化, 也出现与铝棒相类似的扑食行为和觅食行为, 但始终没有出现避让行为。塑料棒放入水中后, 鲟继续保持规则的绕壁圈运动, 偶尔出现绕棒运动, 但时间较短, 绕棒的鲟很快又恢复绕壁游动。但也见到一条鲟对塑料棒有微弱的扑食反应。在实验后期, 鲟对所有测试棒反应强度逐渐减弱, 大多数顺利通过目标区, 进行规则的绕壁游动。

由图 6 可见, 实验中, 鲟对铝棒平均绕棒(觅食) (2.5 ± 1.5) 次(范围 0~5 次, 中位值 2), 对绝缘铝棒为 (2.4 ± 1.7) 次(0~6 次, 中位值 2), 而对塑料棒为 (1.4 ± 1.1) 次(0~3 次, 中位值 1), 在统计上鲟对不同测试棒的觅食次数没有显著性差异(one way RM ANOVA, $P > 0.05$)。但鲟对不同测试棒的扑食次数

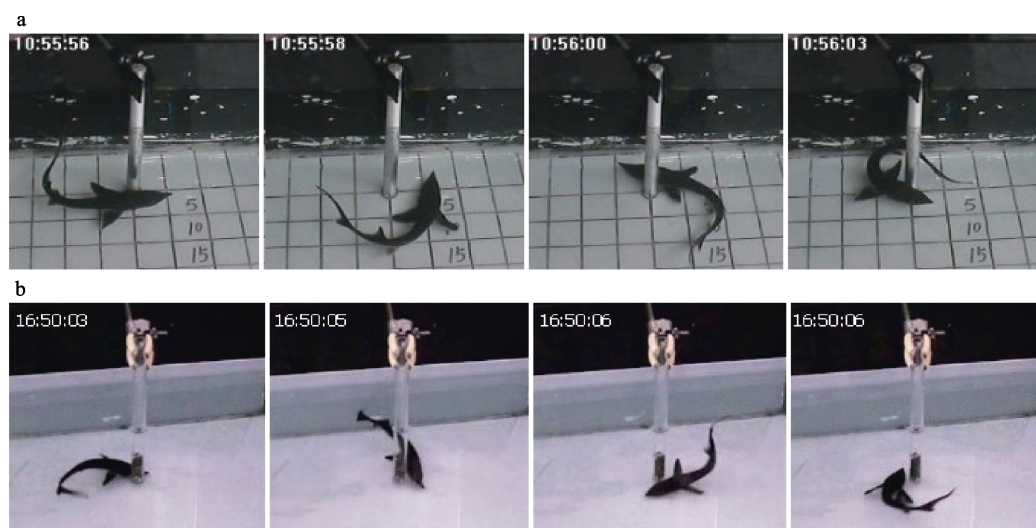


图 5 西伯利亚鲟对铝棒(a)和饵料棒(b)的行为反应

Fig. 5 The response of a *Acipenser baerii* to aluminum rod (a) and odor tube (b)

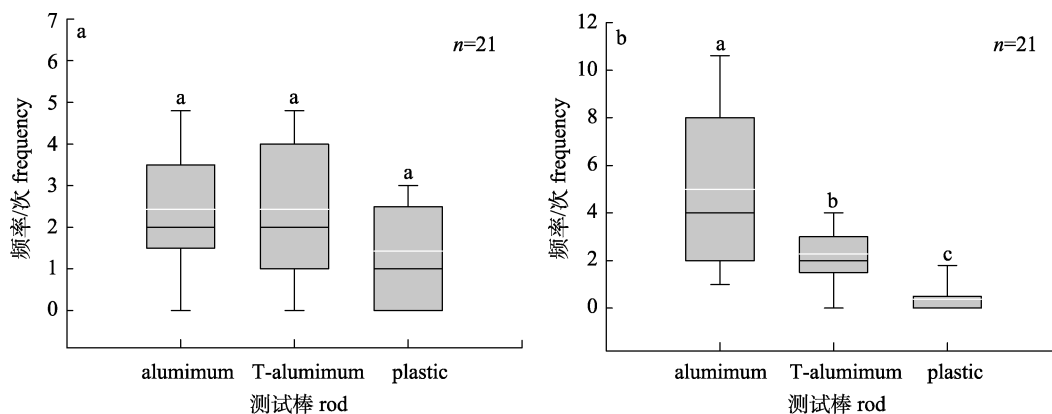


图 6 鲟对不同测试棒的觅食(a)和扑食次数(b)

柱形图上方字母不同表示差异显著($P<0.05$); 白线表示平均值, 黑线表示中位数。

Fig. 6 The foraging responses (a) and snaps (b) to rods of *Acipenser baerii*
Different letters on the column indicate significant difference ($P<0.05$); the white line represents the mean value, and the black line represents the median value.

有显著性差异(one-way RM ANOVA, $P<0.001$), 其中对铝棒的平均扑食为(5.0 ± 3.4)次(1~11 次, 中位值 4), 大于对绝缘铝棒的(2.3 ± 1.3)次(0~5 次, 中位值 2)(Holm-Sidak, $P<0.001$), 大于对塑料棒的(0.4 ± 0.8)次(0~3 次, 中位值 0)(Holm-Sidak, $P<0.001$); 鲟对绝缘铝棒扑食次数也显著大于对塑料棒(Holm-Sidak, $P<0.001$)。

鲟对铝棒的摄食偏好强度为 2, 对绝缘铝棒摄食偏好度 0.96, 而对塑料棒的摄食偏好度 0.28。

3 讨论

3.1 西伯利亚鲟的电感受性

目前, 鲟科鱼类是否依靠电感受摄食仍是一个有争议的科学问题^[14-15], 而有关鲟电感受的研究也相对较少。本研究通过鲟对水下铝棒的行为反应验证了养殖西伯利亚鲟的电感受摄食行为。铝棒存在时, 除个别鲟在第一次游向铝棒时产生避让反应外, 其他鲟从实验开始阶段就对铝棒表现出试探性趋近, 进而围绕铝棒往复运动, 直至吸吮棒表面。这种行为方式与饵料管诱导的摄食运动相类似, Kasumyan^[16]研究也发现小体鲟(*Acipenser stellatus*)等鲟在嗅觉诱导下会产生类似的绕圈觅食的游泳模式。西伯利亚鲟把水下铝棒视为一种潜在饵料, 而强烈地吮吸棒表面, 其摄食偏好强度为 2。作为参照, 西伯利亚鲟对绝缘铝棒和塑料棒虽然有绕圈行为, 但却很少有吸吮行为,

表现了较低的摄食偏好强度(均小于 1)。笔者认为电感受驱动了鲟对水下铝棒的扑食反应, 主要有以下理由: (1)实验在黑暗中进行, 间接屏蔽了鲟的视觉作用, 而且在实验过程中没有任何听觉和嗅觉刺激; (2)鲟在穿过测试棒与水槽壁时, 侧线可根据测试棒周围流场的变化而感知棒的存在, 因而目标区停留或绕棒探索(觅食)。但鲟对 3 种测试棒的觅食次数没有显著性差异, 表明侧线对 3 种测试棒(相似的直径)的感知没有差异性; 但鲟对不同棒的吸吮次数存在显著性差异, 表明铝棒在水中产生的腐蚀电场引起了鲟的摄食动机, 而绝缘铝棒和塑料棒因缺乏诱导其摄食的感觉因子, 而摄食偏好强度较低。这同时也说明, 西伯利亚鲟并不能区分生物电场和非生物电场。类似的现象在匙吻鲟和中华鲟中也有过报道, 匙吻鲟对人工偶极子电场有明显的吞食行为^[17], 而中华鲟对水中的铁丝有明显的吸食反应, 而对铁棒有逃避反应^[7]。但本研究中也发现, 鲟对测试棒的反应存在明显的个体差异, 如不同实验鱼对铝棒的扑食次数从 1 次到 11 次不等, 这可能与鲟的电感受敏感性有关。杨全威等^[18]发现西伯利亚鲟的电感受敏感性与个体发育程度相关, 体长较长的鲟电感受器数量较多, 其电感受敏感性也可能随之增强。

在本研究中, 西伯利亚鲟只有少数在实验开始阶段对铝棒有逃避反应。这可能与不同鲟科鱼

类的电感受阈值差异和不同材料的金属产生的腐蚀电场差异有关。西伯利亚鲟除了对铝棒有明显的吸吮反应,对绝缘铝棒也产生一定次数的吸吮反应。一方面,可能由于实验中对铝棒的绝缘处理不够完好,仍然有微弱的腐蚀电场存在;另一方面,可能由于绝缘胶带本身的气味对鲟产生一定的诱导作用。在早期鲇(*Amiurus nebulosus*)电感受的研究中也曾有类似的现象,鲇对没入水中的金属丝有咬食反应,同时对松木棒也有相同的反应^[19]。Parker 等^[19]认为鲇的电感受和嗅觉同样发达,并且在摄食行为中具有协同作用。在西伯利亚鲟中,也可能存在这种协同作用的机制。胡佳等^[15]对达氏鳇(*Huso dauricus*)稚鱼的摄食研究也表明,电感受和嗅觉在其摄食中起重要作用。此外,实验用鲟均为人工繁殖,从孵化出苗到养成均生活在人工环境,其饵料也为非电场性质的人工颗粒饵料,环境中也只存在自身和同类产生的生物电场。但是第一次接触非饵料的腐蚀电场,鲟就表现出强烈的摄食动机,说明西伯利亚鲟并未因为养殖环境缺乏活体饵料的电场刺激而丧失电感受功能。

3.2 电感受性对鲟的保护意义

在实验中,西伯利亚鲟对无食物相关的金属腐蚀电场有着明显的咬食现象。铝棒的腐蚀电场的峰幅值为 90 μV ,与其饵料鱼的生物电场大小相接近^[9]。很明显鲟不能区分生物电场和非生物电场信号^[20-21],同时也说明鲟主要依赖电场强度大小进行电感受摄食判断^[21-22],这在自然界对鲟则是十分致命的。由于人类的活动,鲟的生存环境中存在大量非生物弱电场。比如,大坝等水利设施的金属结构产生的腐蚀电场和自发电场^[23],河床上架设的交流输电线在水中形成感应电场等^[24]。这些水利设施的金属结构的表面积比本研究中采用的铝棒大很多倍,其产生的腐蚀电场也相应增强,可能会引起鲟的逃避反应等^[18,25]。对建有大型水电站的流域中鲟类资源的研究表明,鲟倾向于聚集在离水电站大坝附近的水域,因为那里由于水电站输电线的影响,水中电场达到 50 $\mu\text{V}/\text{cm}$,与很多小型水生动物的生物电场强度相当,但在较远处人工设置的产卵场却没有鲟的聚集^[24]。

由于不能区分这些非生物和生物电场信号的差异,鱼类必然会对这种无食物收益的非生物刺激源产生咬食反应。尽管根据行为序列谱,鲟对水下铝棒产生了适应性,其绕棒和吸吮反应均减少。但匙吻鲟的研究表明,在有食物回报的情况下,匙吻鲟对人工偶极子电场的扑食行为更加强烈^[26]。在自然条件下,偶尔的食物回报也可能会增加鲟对非生物电场源的咬食次数和强度。这样,鲟大量的时间和能量消耗并没有得到对应的食物回报,长期的结果必然会对它们生长、发育和生殖产生负面影响,进而影响整个种群资源和分布^[11]。为保护和拯救中华鲟,国家于 2015 年发布《中华鲟拯救行动计划(2015—2030 年)》,以解决自然种群急剧衰退的现状,但中华鲟的电感受功能一直是被忽略的研究方向,如今长江的水下电场污染无疑给中华鲟的保护提出了新的思路 and 更新的挑战。

参考文献:

- [1] Birstein V J. Sturgeons and paddlefishes: Threatened fishes in need of conservation[J]. Conservation Biology, 1993, 7(4): 773-787.
- [2] Baker C V H, Modrell M S, Gillis J A. The evolution and development of vertebrate lateral line electroreceptors[J]. The Journal of Experimental Biology, 2013, 216(Pt 13): 2515-2522.
- [3] Chen X H. Biology and Resource Status of Sturgeons[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007: 42-187. [陈细华. 鲟形目鱼类生物学与资源现状[M]. 北京: 海洋出版社, 2007: 42-187.]
- [4] Song W, Song J K. Morphological structure and peripheral innervation of the lateral line system in the Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*)[J]. Integrative Zoology, 2012, 7(1): 83-93.
- [5] Hofmann M H, Wojtenek W, Wilkens L A. Central organization of the electrosensory system in the paddlefish (*Polyodon spathula*)[J]. The Journal of Comparative Neurology, 2002, 446(1): 25-36.
- [6] Teeter J H, Szamier R B, Bennett M V L. Ampullary electroreceptors in the sturgeon *Scaphirhynchus platyrhynchus* (Rafinesque)[J]. Journal of Comparative Physiology, 1980, 138(3): 213-223.
- [7] Liang X F. The structure and function of the ampullae on the ventral part of the snout of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* gray)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996,

- 27(1): 1-5. [梁旭方. 中华鲟吻部腹面罗伦氏囊结构与功能的研究[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(1): 1-5.]
- [8] Bedore C N, Kajiura S M. Bioelectric fields of marine organisms: Voltage and frequency contributions to detectability by electroreceptive predators[J]. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2013, 86(3): 298-311.
- [9] Zhang X G, Song J K, Fan C X, et al. Use of electrosense in the feeding behavior of sturgeons[J]. *Integrative Zoology*, 2012, 7(1): 74-82.
- [10] Zhuang P, Zhang L Z, Luo G, et al. Function of sense organs to the feeding behavior of juveniles Chinese sturgeon captured from the Yangtze estuary[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(4): 475-481. [庄平, 章龙珍, 罗刚, 等. 长江口中华鲟幼鱼感觉器官在摄食行为中的作用[J]. 水生生物学报, 2008, 32(4): 475-481.]
- [11] Yang D G, Ma G J, Sun D J. Sturgeon culture: Status and practices[M]//*Aquaculture in China*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2018: 234-245.
- [12] Yi C X. The study of electrochemical noise technique on the initial corrosion behavior of typical metals[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [易晨曦. 典型金属初期腐蚀规律的电化学噪声技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [13] Govardovskii V I, Byzov A L, Zueva L V, et al. Spectral characteristics of photoreceptors and horizontal cells in the retina of the Siberian sturgeon *Acipenser baerii* Brandt[J]. *Vision Research*, 1991, 31(12): 2047-2056.
- [14] Zhang X G, Song J K, Zhang G S, et al. The bioelectric field of *Gambusia affinis*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(5): 823-828. [张旭光, 宋佳坤, 张国胜, 等. 食蚊鱼的生物电场特征[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5): 823-828.]
- [15] Hu J, Li Y H, Wang C Y, et al. Effect of sensory deprivation on the feeding behavior of juvenile Kaluga (*Huso dauricus*)[J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, 38(2): 88-93. [胡佳, 李艳华, 王成友, 等. 达氏鳇稚鱼感觉器官在摄食行为中的作用[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(2): 88-93.]
- [16] Kasumyan A O. Sturgeon food searching behaviour evoked by chemical stimuli: A reliable sensory mechanism[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2002, 18(4-6): 685-690.
- [17] Wilkens L A, Hofmann M H. The paddlefish rostrum as an electrosensory organ: A novel adaptation for plankton feeding[J]. *BioScience*, 2007, 57(5): 399-407.
- [18] Yang Q W, Zhang X G, Guo H Y, et al. The avoiding response to dipole stimuli in juvenile sturgeon[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(3): 501-506. [杨全威, 张旭光, 郭弘艺, 等. 西伯利亚幼鲟对偶极子电场的避让行为研究[J]. 水生生物学报, 2016, 40(3): 501-506.]
- [19] Parker G H, van Heusen A P. The responses of the catfish, *Amiurus nebulosus*, to metallic and non-metallic rods[J]. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 1917, 44(3): 405-420.
- [20] Zhang X G, Herzog H, Song J K, et al. Response properties of the electrosensory neurons in hindbrain of the white sturgeon, *Acipenser transmontanus*[J]. *Neuroscience Bulletin*, 2011, 27(6): 422-429.
- [21] Bretschneider F, Eeuwes L, Peters R. Behavioural relevance of AC and DC in prey detection by the brown bullhead, *Ameiurus nebulosus*[J]. *Animal Biology*, 2008, 58(3): 321-336.
- [22] Hutchison Z L, Gill A B, Sigray P, et al. Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 4219.
- [23] Sun Q, Liu S D, Jiang C L, et al. Geoelectric response of porous media in water and grout injection processes[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(12): 4640-4645.
- [24] Basov B M. On electric fields of power lines and on their perception by freshwater fish[J]. *Journal of Ichthyology*, 2007, 47(8): 656-661.
- [25] Gurgens C, Russell D F, Wilkens L A. Electrosensory avoidance of metal obstacles by the paddlefish[J]. *Journal of Fish Biology*, 2000, 57(2): 277-290.
- [26] Wojtenek W, Pei X, Wilkens L A. Paddlefish strike at artificial dipoles simulating the weak electric fields of planktonic prey[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(Pt 8): 1391-1399.

Feeding response of *Acipenser baerii* to a metal rod evoked by a corrosion electric field

ZHANG Xuguang^{1,2}, CHEN Jia², LIU Xin³, JI Yao⁴

1. Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Institute for Marine Biosystem and Neurosciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

4. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co. Ltd, Shanghai, 200335, China

Abstract: The passive electrosense is a primitive sense in the sturgeon and paddlefish. These fishes can sense environments by detecting the weak electric fields of bioelectric and non-bioelectric origins. Nevertheless, the electrosensory function of sturgeon has always been controversial and, in the past year, has been poorly investigated. To quickly and non-invasively assess sturgeon electroreception, the behavioral responses of cultured Siberian sturgeons to underwater aluminum rods, insulated aluminum rods, and plastic rods were assessed using behavioral methods. The aluminum rod produces a weak corrosion electric field with an amplitude of 90 μV under water, whereas the insulated aluminum rod and plastic rod do not. There was no significant difference in the frequencies of rod circling for the aluminum rod, insulated aluminum rod, and plastic rod ($P>0.05$). However, the sturgeon exhibited more snaps to the aluminum rod than the insulated aluminum rod and plastic rod ($P<0.01$). The feeding preference intensity of the sturgeon for the aluminum rod was 2, while for the insulated aluminum rods and plastic rods it was 0.96 and 0.28, respectively. This indicates that the corrosion electric field underwater evoked a feeding response from the Siberian sturgeon. The electrosense of sturgeons may play a role in prey discrimination at the last stage of striking behavior in feeding. The results also indicate that the reaction to the corrosion electric field of metals can be used as a behavioral model to verify the electroreception in sturgeons; they also provide a new concept that may help in the conservation of sturgeons as a resource.

Key words: underwater electric field; electroreception; behavior sequence ethogram; sturgeon; feeding behavior

Corresponding author: JI Yao. E-mail: jiyao@sidri.com