

BANO:用于小鼠声音线索观察型恐惧学习的 开源行为学训练系统

易建勇^{1,2▲} 彭建亚^{1,2▲} 倪剑光^{1,2△}

(¹复旦大学脑科学研究院-脑功能与脑疾病全国重点实验室 上海 200032; ²复旦大学脑科学前沿科学中心 上海 200032)

【摘要】 目的 搭建一个基于 Bonsai 和 Arduino 的开源行为学软硬件系统(Bonsai Arduino Network Open Ephys, BANO),用于小鼠的观察型恐惧学习研究。方法 系统使用 Bonsai 软件提供的图形化编程界面,设计行为实验逻辑控制流程,并与 Arduino 微控制器连接实现实时数据交互。Arduino 板控制声音刺激和晶体管-晶体管逻辑(transistor-transistor logic, TTL)信号的输出,并将 TTL 数据同步到 Open Ephys 电生理记录系统,用于同步行为学和神经电生理数据。结果 该开源平台能够实现复杂声音刺激的编程、试次随机化、视频录制和附属设备的输出控制,并且能够与其他外部设备进行精确通讯和事件同步,为后续神经电生理信号和行为分析提供了高质量的信息流。结论 该系统提供了一套低成本、灵活、可扩展性强的行为学训练解决方案,能促进开源神经科学行为学新工具和新方法的开发。

【关键词】 开源行为学软件; 声音线索; 观察型恐惧学习; Bonsai; Arduino; 小鼠

【中图分类号】 Q95-337, Q189 **【文献标志码】** A **doi:**10.3969/j.issn.1672-8467.2026.05.011

BANO: an open-source system for mice behavioral training of auditory cued observational fear learning

YI Jian-yong^{1,2▲}, PENG Jian-ya^{1,2▲}, NI Jian-guang^{1,2△}

(¹Institutes of Brain Science, State Key Laboratory of Brain Function and Disorders, Fudan University, Shanghai 200032, China; ²MOE Frontiers Center for Brain Science, Fudan University, Shanghai 200032, China)

【Abstract】 Objective To build an open-source behavioral science hardware and software system Bonsai Arduino Network Open Ephys (BANO) based on Bonsai and Arduino for mice observational fear learning research. **Methods** The system used the graphical programming interface provided by Bonsai software to design the behavioral experiment logic control flow and connected to an Arduino microcontroller to achieve real-time data interaction. The Arduino board controlled the output of sound stimuli and transistor-transistor logic (TTL) signals, and synchronized the TTL data to the Open Ephys electrophysiological recording system for synchronizing behavioral and neuroelectrophysiological data. **Results** This open-source platform could realize the programming of complex sound stimuli, trial randomization, video recording and auxiliary equipment output control, and could precise communicate and synchronize events with other external devices, providing high-quality information flow for subsequent neuroelectrophysiological signal and behavioral analysis. **Conclusion** This system provides a low-cost, flexible, and highly scalable behavioral training solution, which can promote the development of new tools

国家自然科学基金重大项目(T2394531);复旦大学基础研究特区计划(25TQ002);教育部基础与交叉学科突破计划(JYB2025XDXM604)

▲YI Jian-yong and PENG Jian-ya contributed equally to this work

△Corresponding author E-mail: jguangni@fudan.edu.cn

网络首发时间:2026-07-01 15:53:45 网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/31.1885.R.20260701.1343.004

and methods in open-source neuroscience behavioral science.

【Key words】 open-source behavioral software; auditory cues; observational fear learning; Bonsai; Arduino; mouse

* This work was supported by the Major Project of National Natural Science Foundation of China (T2394531), Fudan University Special Zone Program for Basic Research (25TQ002) and the Breakthrough Plan of MOE for Basic and Interdisciplinary Sciences (JYB2025XDXM604).

在人和动物的社会生活中,通过观察其他个体(同伴)在特定负性刺激下的恐惧情绪表达与展示,个体能够习得恐惧记忆,这个过程被称为观察型恐惧学习^[1]。它是基于同伴情绪的社会传递,在观察者中诱发类似共情的认知状态^[2]。在神经科学与行为学研究领域中,观察型恐惧学习范式被广泛用于研究共情、学习记忆及社会行为的神经环路机制^[3]。

传统的观察型恐惧学习范式主要分为无经验型(Naive型)和经验依赖型^[4]。无经验型恐惧学习范式:观察者先前没有恐惧经验,完全依赖学习同伴的情感反应来获取恐惧经验;经验依赖型恐惧学习范式:观察者在学习之前经历过相应的恐惧反应,再通过学习同伴的恐惧反应加深恐惧效应。这两种范式都存在一定局限性,观察者的学习效应较弱。因此通过对传统的观察型恐惧学习范式进行改进,将无条件刺激(如轻度足底电击)与中性条件刺激(如声音或光信号)进行配对,使得观察者在经过恐惧学习后,单独呈现中性条件刺激时便能表现出恐惧反应^[5]。

动物行为范式长期以来在理解学习和记忆过程的潜在神经科学机制方面发挥着重要作用^[6]。传统的恐惧学习行为范式多依赖商业化的市售行为学设备,尽管这些商业化的行为学系统具有较高的自动化与稳定性,但在可定制性、可扩展性以及成本效益等方面仍存在明显的局限性^[6]。这也是经费受限的实验室和新兴科研团队开展研究的主要瓶颈之一。

随着开源硬件技术的快速发展,越来越多的开源工具可用于行为范式的设计和开发,比如Bonsai^[7]、Arduino^[8]等。这些开源平台不仅降低了设备成本,还能够依据自身实验需求灵活设计行为学实验流程。Bonsai与Arduino作为目前在神经科学与行为学研究中被广泛利用的开源工具^[9],众多研究团队都利用这些开源工具自主搭建实用的行为学系统^[6,9-12],并展现出显著的实用性与创新潜力,为行为实验研究提供了可靠的技术支撑。

本研究旨在构建一款基于Bonsai-Arduino UNO R3架构的低成本开源行为学训练软硬件系统BANO(Bonsai Arduino Network Open Ephys)。该系统通过Bonsai控制Arduino UNO R3板程序的启动以及行为视频追踪相机等设备的启动,Arduino UNO R3板控制声音刺激的产生以及将各种事件时间的晶体管-晶体管逻辑(transistor-transistor logic, TTL)数据传输到Open Ephys系统上进行同步记录^[13-14]。与传统行为学系统相比,该开源系统不仅成本低、控制精确、易于扩展,还能实现高时间精度的刺激呈现与多模态数据采集,可适用于多种行为学范式研究场景。该系统的推广有助于促进神经科学研究方法的普适化,推动行为学实验从封闭的专用系统向开放、可再现的模式转变,为未来共情情绪与恐惧学习记忆神经机制的研究提供重要的技术支撑与方法学基础。

材 料 和 方 法

实验动物 8周龄左右的C57BL/6J雄性小鼠,体质量(24 ± 2)g,购自江苏集萃药康生物科技股份有限公司。以群居方式饲养,观察鼠和演示鼠同笼同窝,在标准条件下生活,采用12 h/12 h明暗周期(灯光开启时间为19:30至次日7:30),可自由获取食物和水。所有实验程序均遵循机构动物护理指南,并获得复旦大学实验动物科学部动物福利和伦理委员会的批准(批准号:DSF-2021-165)。

Bonsai系统简介 Bonsai是一种基于可视化数据流编程的开源平台,专为神经科学实验中的实时数据处理与控制而设计^[7]。其图形化界面使研究人员能够以模块化的方式构建实验流程,无需深入编程即可实现复杂的逻辑控制与多模态数据采集。Bonsai的突出优势在于其高度模块化结构与灵活的扩展能力,能够与多种硬件设备(如摄像头、传感器、微控制器)对接,实现多模态数据的同步采集与

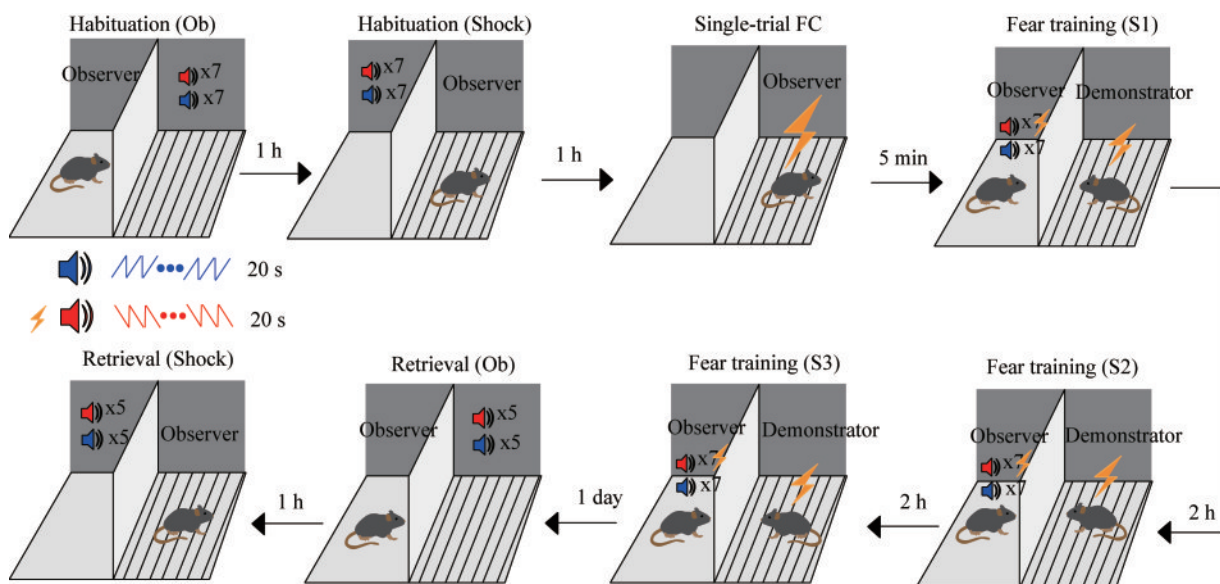
闭环控制。对于恐惧学习类实验范式, Bonsai 的高时间分辨率与事件同步能力可确保刺激呈现与行为反应记录的高时间精度, 为后续的电生理信号和行为学数据的关联分析提供坚实基础。

Arduino UNO 微型控制器简介 Arduino 是一个基于 ATmega328P 微控制器的开源硬件平台, 具有低成本、易编程及高可扩展性等优点^[8]。其中 Arduino UNO R3 是 Arduino 系列中的经典板卡, 广泛应用于各种实验、工程项目和互动装置中。它具有 14 个数字输入和输出端口、6 个模拟输入端口、USB 接口以及多个电源输出端口。它的设计简洁且高效, 可通过多种输入输出接口实现控制外部设备与信号采集, 在行为学实验中被广泛用于控制刺激设备(如声音发生器、电击刺激器)及记录动物行为反应。通过与 Bonsai 的实时通信和利用 Arduino 集成开发环境(integrated development environment, IDE)进行编程, Arduino 可在毫秒级精度下执行实验指令, 实现声音刺激的精准触发与控制。

Bonsai 和 Arduino UNO 板卡的集成 在该行为学系统中, 需要利用 Arduino UNO 板与 Bonsai 配合使用, 负责控制声音刺激、电击刺激、激光刺激和采集行为事件时间数据。为了实现 Bonsai 与 Arduino UNO 板进行通信和交互, 需要对微控制器进行编

程, 使其可以通过 USB 数据线与计算机发送和接收二进制数据。Arduino 中的 Standard Firmata 高效二进制协议, 可用于与 Bonsai 等外部应用程序进行串行通信, 它是一种专门为微控制器与主机计算机之间进行通信而设计的开源协议。

声音线索观察型恐惧学习范式设计 为了实现观察型恐惧学习任务, 我们设计了声音刺激关联的观察型恐惧学习行为范式(图 1)。行为学箱分为两个区域, 一个是左边的观察区(简称 Ob), 一个是右边的电击板区(简称 Shock), 中间用透明亚克力板隔开, 观察鼠(observer)可以在观察区观察学习演示鼠(demonstrator)在电击区的恐惧反应。范式任务首先设计了一个声音刺激的适应期(habituation), 分为两个适应场景, 一个是在观察区, 另一个是在电击板区。每个场景下分别进行两种声音刺激各 7 次的适应, 且都不配对足底电击。每个声音刺激由 10 个持续 2 s 的降频或升频声音组成, 目的是消除观察鼠对两种声音刺激本身产生恐惧反应。在观察型恐惧训练期(fear training)开始前会给观察鼠在电击板区获取一个 1.0 mA, 持续 2 s 的足底电击经验。训练期设计了 3 个训练阶段(S1~S3), 每个训练阶段都会随机出现两种声音刺激各 7 次。其中一种声音刺激(图 1 红色喇叭, 6~



Positive conditioned stimuli (CS+): Red sound stimulus, consisting of 10 down-frequency sounds of 6–8 kHz lasting 2 seconds; Negative conditioned stimuli (CS-): Blue sound stimulus, consisting of 10 up-frequency sounds of 1–3 kHz lasting 2 seconds. Ob: Behavioral task in the observation area; Shock: Behavioral task in the shock plate area.

图 1 声音线索观察型恐惧学习范式图

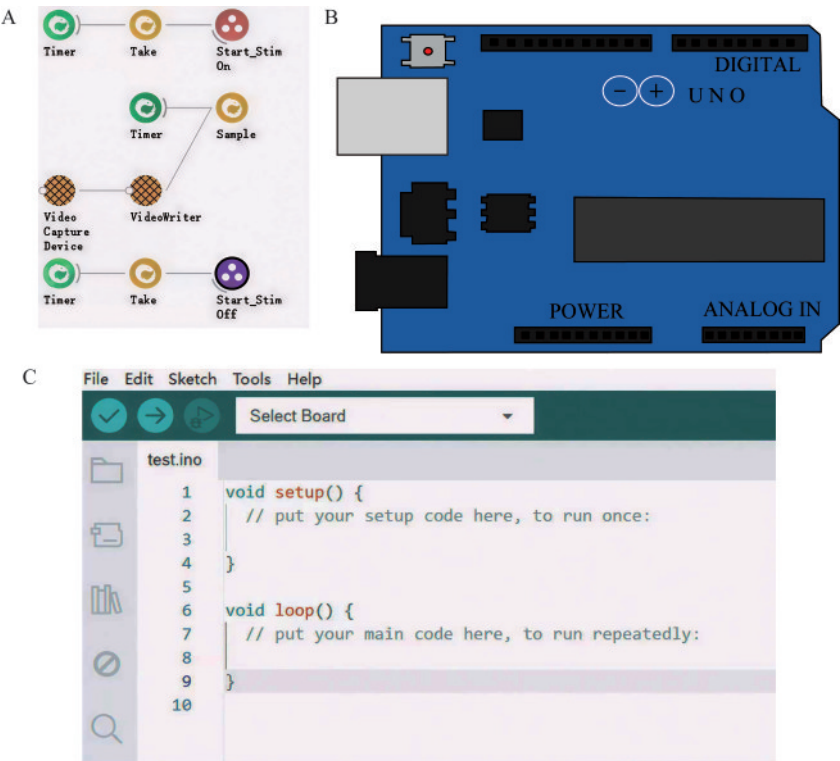
Fig 1 Auditory cued observational fear learning diagram

8 kHz降频)与一个 0.7 mA、持续 2 s 的足底电击配对,足底电刺激出现在声音刺激的中间段,称为 CS+(positive conditioned stimuli)。另一种声音刺激(图 1 蓝色喇叭,1~3 kHz 升频)不配对足底电击,称为 CS-(negative conditioned stimuli)。3 个训练阶段中观察鼠在观察区进行恐惧学习,演示鼠在电击板区,训练阶段间隔 2 h。在第二天单独对观察鼠进行恐惧记忆的重提,重提试次(retrieval session, RET)会在两个不同场景下进行,且每个 RET 中两种声音刺激各随机出现 5 次。

Bonsai 逻辑程序的设计 为了实现上述的行为学范式(图 1),利用 Bonsai 的图形化编程界面设计了 Bonsai 逻辑程序(图 2A)。视频采集设备组件功能是从视频设备(行为视频追踪相机,帧率为 30Hz)获取实时视频流。该组件通过连接至视频采集源,

处理实时视频数据,并将其传递给后续的 VideoWriter 组件以进行存储或进一步的处理。VideoWriter 组件的主要功能是将捕获到的视频数据编码并保存为常见的视频文件格式。通常 VideoWriter 与视频采集设备协同工作,完成视频图像或视频流的存储。

Timer 组件用于管理时间间隔,通常结合其他组件执行延时任务或定时任务。Take 组件功能是从外部设备获取数据。它常用于触发特定任务,并捕获相关输入数据。Start_Stim 组件用于控制实验刺激的开始与结束,图 2A 中 Start_Stim On 组件用于触发刺激的开始,Start_Stim Off 组件则用于终止刺激任务,确保刺激在预定的时间窗口内有效执行。Sample 组件的作用是对输入数据进行定时采样,通常与传感器设备或数据流处理相关。



A: Bonsai logic program of behavioral systems; B: Arduino UNO R3 board schematic; C: Arduino Integrated Development Environment schematic.

图2 BANO系统的开源工具示意图

Fig 2 BANO system open source tool diagram

Arduino IDE 编写控制程序 Arduino UNO R3 开发板(图 2B)上配备了多种接口,每类接口具有不同的特定用途。其中数字接口是最常用的接口之一,这些引脚只能处理两种状态:高电平(通常为 5 V)或低电平(通常为 0 V)。当状态配置为输入模

式时,数字引脚可以用于读取外部设备的状态;当状态配置为输出模式时,数字引脚能够控制外部设备。模拟输入引脚用于处理模拟信号。在输入模式下,analogRead()函数可用于测量模拟信号;在输出模式下,analogWrite()函数可模拟输出脉冲宽度

调制(pulse-width modulation, PWM)信号,以实现模拟电压变化。此外,开发板上的GND(Ground)引脚是电路的公共地参考点,用于提供电流回路。所有与Arduino连接的外部设备(如激光器、高音喇叭、LED等)通常都需要与GND引脚连接,以确保电路正常运行。

Arduino IDE是专为Arduino硬件平台设计的开发工具。在Arduino IDE中,setup()结构和loop()结构是程序设计的两个核心组成部分(图2C)。setup()结构是Arduino程序的初始化模块,通常在程序启动时执行一次,用于配置硬件、初始化变量以及配置接口的工作模式。该结构的执行完毕后,程序控制流会进入loop()结构。loop()结构是Arduino程序的主循环模块,会持续不断地运行,以执行用户定义的操作。它是程序的核心逻辑所在,所有需要重复执行的操作通常在loop()结构中实现。

本研究在使用Arduino IDE进行程序设计时,分为3个主要模块。第一模块是接口模式的配置:由于不同接口的工作模式有所差异,需要在初始化setup()结构中为各接口配置相应的模式,用于接收Bonsai程序启动信号和电击经验刺激信号的两个接口配置为输入模式,而其他用于发送信号的接口则配置为输出模式。第二模块是声音刺激生成函数的设计:为确保两种声音刺激具有显著的辨别度,通过Arduino IDE中的Tone()函数生成变频声音刺激。其中一种声音刺激采用频率随时间均匀降低的高频变频模式,另一种则采用频率随时间均匀升高的低频变频模式,从而形成两种特殊的声音刺激。由于Arduino会基于硬件定时器每1 ms触发一次中断,所以程序能以ms为单位记录经过的时间,这种声音刺激的模式实现利用的是millis()函数实现对程序时间的读取(单位是ms),从而做到声音频率随时间而变化的变频声音刺激。第三模块是主函数的设计:主函数通过循环实现两种声音刺激的随机呈现,其中随机化包括两个层面。一是每两个声音刺激之间的间隔时间随机化,使用伪随机的random()函数将间隔时间控制在30~50 s的随机范围。目的是减少小鼠对声音刺激出现时间表现出预测性反应;二是声音刺激呈现顺序的随机化。通过使用random()函数生成由0和1组成的随机序列,主函数根据该序列的不同数字来依次呈现两种声音刺激,实现实验中声音刺激呈现顺序的随机

化,从而减少小鼠对于两种声音刺激的出现顺序表现出预测性行为。系统程序的源代码及所依附软硬件版本和型号信息已上传至Github:<https://github.com/YiJianyong/BANO/tree/main>。

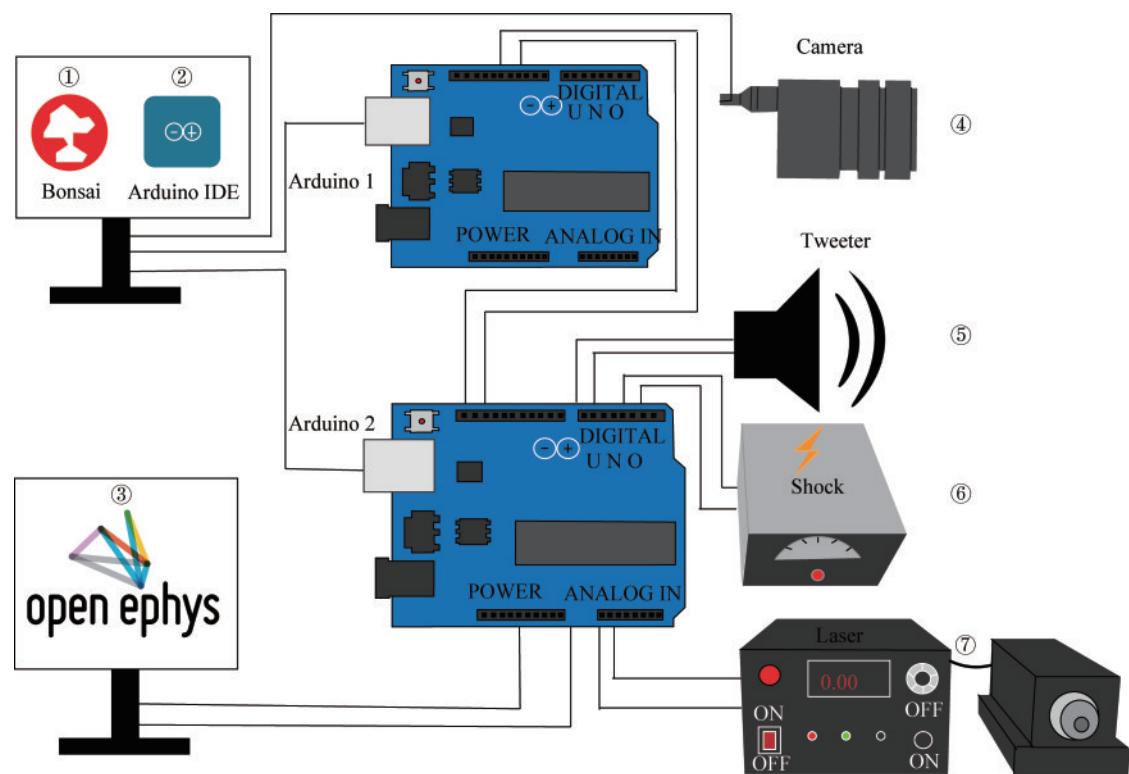
系统也可以通过Arduino UNO板接口控制其他的外部设备。为了展现该行为学平台的可拓展性,本研究还增加了光遗传学的行为学实验。通过在Arduino IDE编写控制激光器的函数,可通过millis()函数获取时间值,从而实现灵活调整激光刺激的频率,实现不同实验阶段给予不同频率的激光刺激。

统计学方法 本研究对观察型恐惧学习引起的恐惧冻结行为学数据进行统计分析。由于不同小鼠间冻结行为水平存在显著异质性,首先对原始数据进行对数转换,以增强数据分布的正态性,然后针对对数转换后的数据通过两因素重复测量方差分析(RM Two-Way ANOVA),并采用Geisser-Greenhouse方法校正数据方差不齐,以探究不同处理因素及其交互作用对小鼠冻结行为的影响(Graph Pad Prism,版本9.5.1)。方差分析后使用Sidak多重比较方法校正统计检验 P 值。所有数值均以 $\bar{x} \pm s$ 表示。所有统计检验均为双尾检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

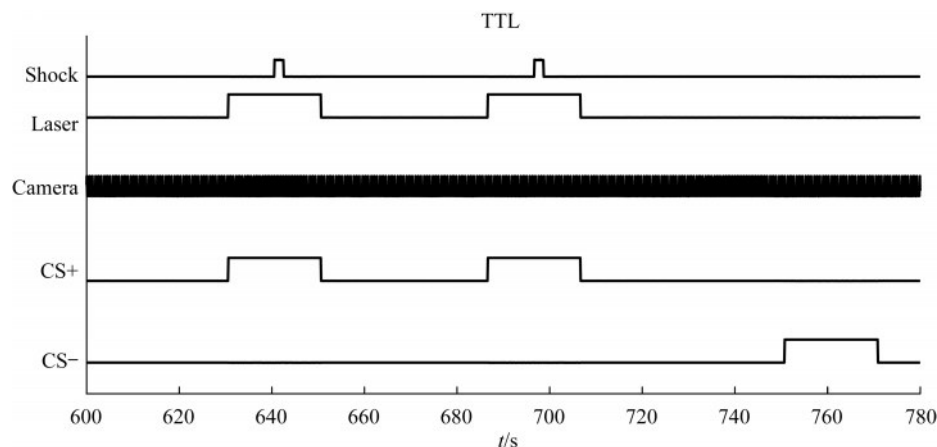
系统的配置与测试 行为学平台的各设备之间的逻辑设计如图3所示。其中一台电脑与两个Arduino UNO R3板和行为追踪相机进行连接,并通过Bonsai和Arduino IDE对其进行编程控制。其中的Arduino 1与Bonsai进行通信,精准控制另一个Arduino 2中的程序启动,从而控制外部刺激器的运行,比如高音喇叭、电击器和激光器等。同时将这些事件相关的TTL数据传输到另一台电脑的Open Ephys电生理数据采集系统上进行同步。

读取Open Ephys系统上事件相关的TTL数据,采集了两种声音刺激、电刺激出现的时间点数据,以及行为视频追踪相机启动的时间点数据和激光刺激的时间点数据(图4)。这些事件相关的TTL数据对于后续行为学数据和电生理记录采集的局部场电位数据等分析至关重要,便于按照不同试次对数据进行切分。



① Bonsai open-source software system; ② Arduino integrated development environment; ③ Open Ephys electrophysiological data acquisition system; ④ Behavioral video tracking camera; ⑤ Peerless tweeter speaker; ⑥ Plantar electrical stimulator; ⑦ Laser generator. Arduino 1: For controlling the startup of the main program of the behavioral science system; Arduino 2: For controlling the communication and event synchronization of external devices.

图 3 BANO 系统设备连接示意图
Fig 3 BANO system device connection diagram



Event-related signals output by the Arduino board. Shock: Foot shock event signal; Laser: Laser signal; Camera: Behavioral video camera signal; CS+: Positive conditioned stimuli; CS-: Negative conditioned stimuli.

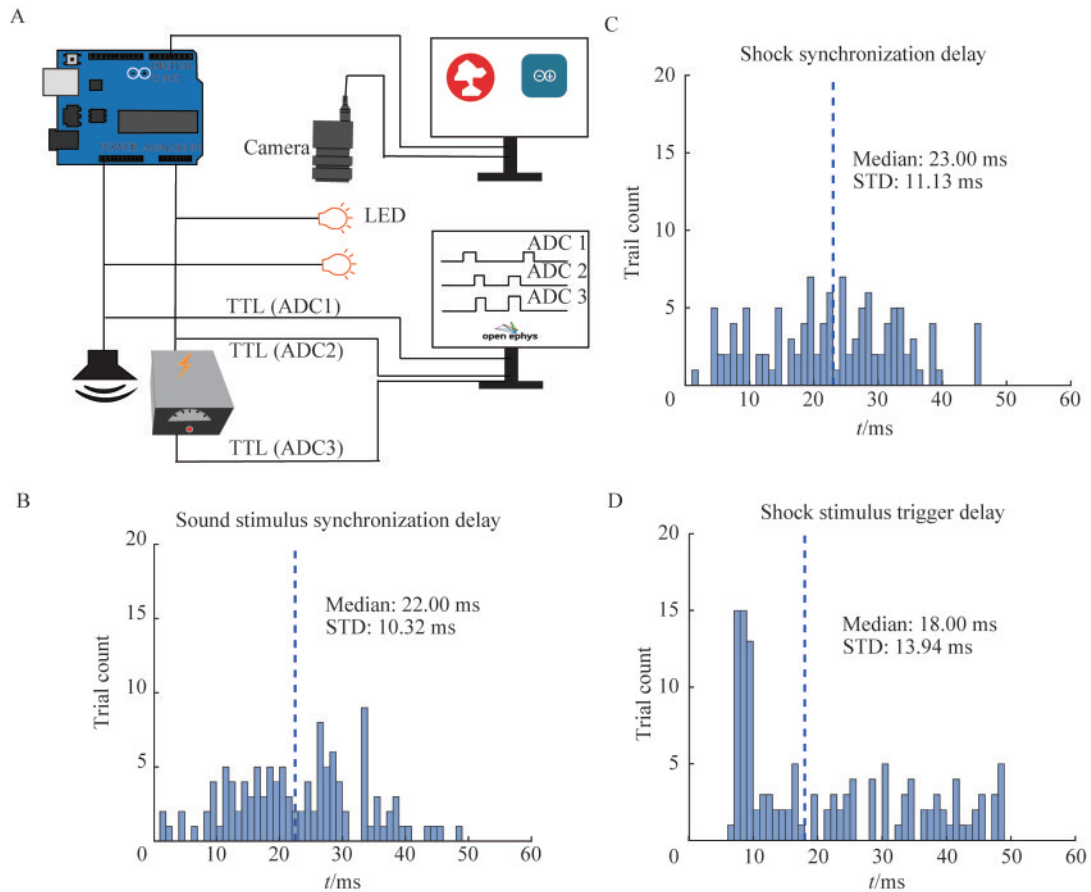
图 4 BANO 系统的输出及 TTL 通讯信号
Fig 4 The output and TTL communication signals in BANO

为了测试系统的时间精度,本研究利用图 5A 所示的系统延迟测量示意图,测量了系统的不同刺激的不同同步延迟和电击器的触发延迟。分别并联一个 LED 灯在低音喇叭和电击器的电路上,利用视频

追踪相机记录 LED 灯的响应瞬间,用 LED 灯的响应时间直观替代高音喇叭和电击器的响应时间,与同步到 Open Ephys 系统的 TTL 数据取差值作为系统的同步延迟。同时将电击器的输出电信号作为

TTL 数据同步传输到 Open Ephys 系统,两个不同通道之间的信号差作为触发延迟。通过对 120 个测试数据进行分析,系统的声音刺激数据的同步延迟中位数为 22.00 ms,标准差为 10.32 ms(图 5B),电击

刺激数据的同步延迟的中位数为 23.00 ms,标准差为 11.13 ms(图 5C)。电击器的触发延迟的中位数为 18.00 ms,标准差为 13.94 ms(图 5D)。



A: Schematic diagram of system synchronization delay measurement; B: Synchronization delay of auditory stimulation; C: Synchronization delay of electric shock stimulation; D: Trigger delay of electric shock stimulation.

图5 BANO 系统的延迟

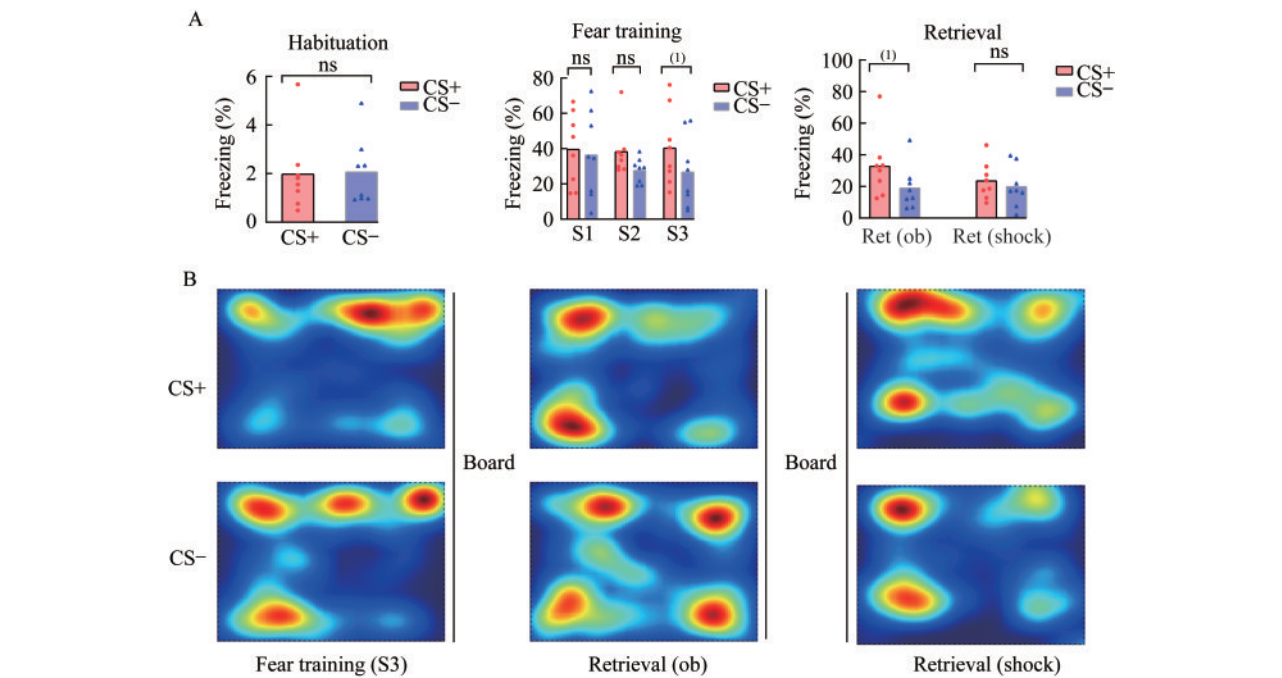
Fig 5 Delay of the BANO

小鼠观察型恐惧学习行为学数据 本研究在 C57BL/6J 雄性小鼠上进行了观察型恐惧行为学测试,总共采集了 8 只小鼠的行为学视频数据。利用 ANY maze 软件分析了观察鼠在该行为学平台下采集的视频数据,冻结行为阈值设置为 500 ms。利用 ANY maze 分析的数据统计了观察鼠的冻结行为水平,运动位置分布等指标。分析这些行为指标的时间窗口均设置在两种声音刺激出现的时间段。

在声音刺激的适应阶段观察鼠对两种声音刺激的冻结水平都表现出很低的水平(均值在 2% 左右),且两者之间无显著差异性($P=0.895$)。经过前两个训练阶段的恐惧学习($S1: P=0.733$; $S2: P=0.094$),第 3 个训练阶段观察鼠对于两种声音刺激

的冻结行为水平表现出显著差异性($S3: P=0.037$)。在第二天的观察型恐惧记忆重提过程中,观察鼠在 ob 场景下的重提试次中($P=0.021$)对于两种声音刺激的冻结行为水平表现出了显著差异性。观察鼠在 shock 场景下的重提试次中($P=0.198$)对于两种声音刺激的冻结行为水平无显著差异性(图 6A)。同时还展示了这 8 只观察鼠在两种不同声音刺激下的位置热图(图 6B)。

电生理局部场电位数据 为了展示该行为学平台的灵活性,利用该行为学平台采集小鼠的多脑区局部场电位(local field potential, LFP)数据。图 7 展示了所记录的单只小鼠基底外侧杏仁核(basolateral amygdala, BLA)脑区局部场电位数据



A: Habituation, $P=0.895$, $t=0.136$; Fear training (S1), $P=0.732$, $t=0.988$; Fear training (S2), $P=0.094$, $t=2.658$; Fear training (S3): $P=0.037$, $t=3.323$; Ret (ob), $P=0.021$, $t=3.450$; Ret (shock), $P=0.198$, $t=1.864$. B: Heatmap of locomotion distribution. The board is the acrylic partition in the middle. All P -values were adjusted for multiple comparisons. ⁽¹⁾ $P<0.05$; ns: Not significant.

图6 观察鼠的声音线索观察型恐惧学习行为学数据

Fig 6 Auditory cued observational fear learning behavioral data of observation mice

经过降采样、滤波、降噪等处理后的数据(图7A)。同时该行为学平台能够采集高时间精度的事件相关信号,结合采集的TTL数据绘制了BLA脑区在两种不同声音刺激开始前2s和结束后2s的时频图(图7B)。结果显示在CS+开始的瞬间,8~15 Hz频段的功率升高,在CS-开始的瞬间该频段没有明显的变化。从这些结果可以反映该行为学平台在行为相关事件的时间点同步采集上具有较高的时间精度。

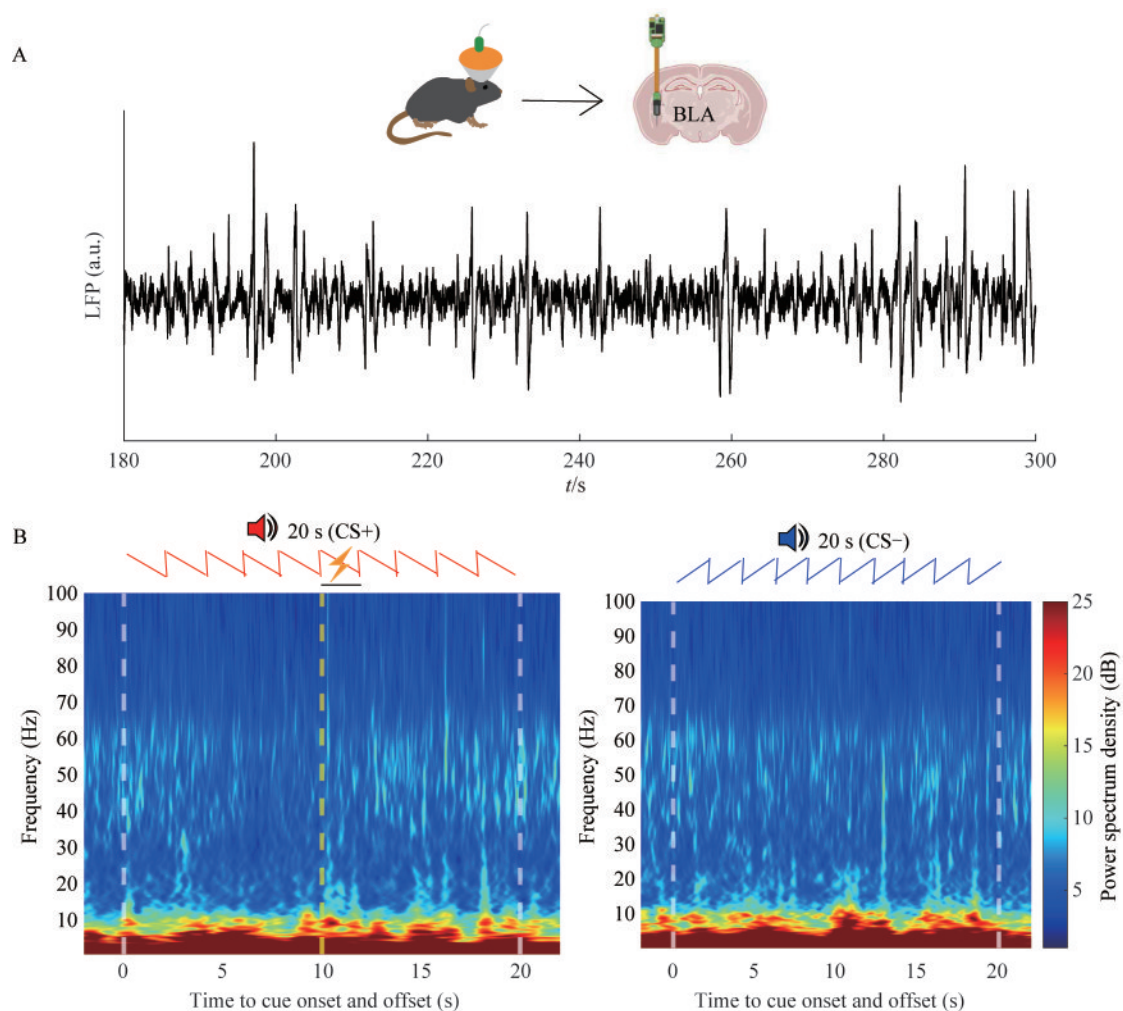
讨论

通过观察他人的经验学习并提取有关潜在威胁的预测信息的能力,对进化适应性和个体生存至关重要^[15-16]。目前众多研究发现背内侧前额叶皮层、前扣带回皮层、岛叶皮层以及BLA等脑区均参与观察型恐惧学习^[1,17-18]。但是关于岛叶-杏仁核环路在观察型恐惧学习中的神经振荡机制还没有深入研究。为了能够揭示该环路涉及的神经振荡机制,行为学范式是研究过程的重要组成部分。然而,对于不同任务的范式,很多商业化的系统的普

适性较差,因此需要设计一个灵活,可拓展性强,具有较强普适性的行为学平台系统。

本研究开发的行为学平台在声音关联的观察型恐惧学习中进行了测试。通过对行为学数据进行分析,冻结行为水平的显著差异性揭示了观察鼠能够在该行为学范式下进行观察型恐惧学习。为后续的关于观察型恐惧学习的神经机制研究打下了坚实的基础。

与传统商业化系统相比,基于Bonsai与Arduino UNO板搭建的行为学实验平台具有多重优势。一是成本显著降低(整套软硬件系统搭建成本在5 000元左右),Bonsai与Arduino均为开源平台,研究者可利用现成的模块化组件在极低预算下实现实验系统的搭建,避免了对商业设备的依赖。二是灵活和可定制性强,Bonsai的可视化编程结构使研究者能够根据实验目标自由构建刺激流程、调整刺激参数或添加传感器反馈回路;Arduino则提供了高自由度的硬件控制接口,其集成开发环境也提供了简单的代码编程,可针对不同实验需求进行定制化编程实现。目前用于声音关联的开源行为学系统在对于声音频率变化、外部设备的拓展以及



A: Local field potential (LFP) recording in mice BLA; B: Time-frequency representation of LFP power spectrum. The three vertical dashed lines represent the onset of the auditory cue (at 0 s), the electric shock (at 10 s), and the offset (at 20 s) of the auditory cue, respectively.

图7 与声音刺激同步的电生理记录

Fig 7 Electrophysiological recordings synchronized with auditory cue

触发时间的控制还存在一定局限性^[19]。三是代码开源,开源体系所具备的透明性与可重复性进一步提升了科学研究的标准化水平。研究人员可以在开源的社区环境中共享实验代码、逻辑结构设计及硬件配置,从而促进实验方法的标准化与跨实验室复现。四是简单易学,便于搭建,可获得性高,整个行为实验平台所用到的设备之间可通过简单的接口连接即可实现通信。Bonsai提供了强大的图形化编程界面,Arduino IDE中也有功能强大的函数,可以灵活实现不同的行为学范式任务。Bonsai在实时处理上的应用也非常广泛,比如用于精准控制微流控装置中的液滴体积、实时行为视频追踪和闭环电生理记录^[10,12,20-22]。

该系统也存在一定的局限性,比如在行为学数

据分析的实时性和自动化^[23]。目前采用的办法是将Bonsai采集的视频数据用ANY maze分析。但是随着深度学习方法的进步推动了行为学复杂分析工具的发展,其中Deeplabcut是一款先进的动物姿态估计软件包,它提供定制的网络,能够基于视频帧预测目标动物的姿态,并且可以在离线批量处理模式下快速运行。有研究团队已实现将训练好的轻量级Deeplabcut模型集成到Bonsai中^[21],实现了低延时的实时姿态估计^[24]。后续改进工作可添加这个分析功能,提高行为学数据分析的实时化和自动化。

作者贡献声明 易建勇 行为学平台搭建和范式设计,代码编写,数据采集和统计,制图,论文

撰写和修订。彭建亚 行为学平台搭建和范式设计,代码编写,数据采集和统计,制图。倪剑光 研究设计和指导,论文修订。

利益冲突声明 所有作者均声明不存在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] Silverstein SE, O'sullivan R, Bukalo O, *et al.* A distinct cortical code for socially learned threat [J]. *Nature*, 2024, 626(8001):1066-1072.
- [2] Kim A, Keum S, Shin HS. Observational fear behavior in rodents as a model for empathy [J]. *Genes, Brain Behav*, 2019, 18(1):e12521.
- [3] Kitamura T, Ramesh K, Terranova JI. Understanding others' distress through past experiences: the role of memory engram cells in observational fear [J]. *Adv Neurobiol*, 2024, 38:215-234.
- [4] Terranova JI, Yokose J, Osanai H, *et al.* Hippocampal-amygdala memory circuits govern experience-dependent observational fear [J]. *Neuron*, 2022, 110(8):1416-1431.
- [5] Curzon P, Rustay NR, Browman KE. Cued and contextual fear conditioning for rodents [EB/OL]. (2009) [2025-10-29]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK5223/>.
- [6] Amaral-júnior PA, Mourão FAG, Amancio MCL, *et al.* A custom microcontrolled and wireless-operated chamber for auditory fear conditioning [J]. *Front Neurosci*, 2019, 13:1193.
- [7] Lopes G, Bonacchi N, Frazão J, *et al.* Bonsai: an event-based framework for processing and controlling data streams [J]. *Front Neuroinform*, 2015, 9:7.
- [8] D'ausilio A. Arduino: a low-cost multipurpose lab equipment [J]. *Behav Res Methods*, 2012, 44(2):305-313.
- [9] Chen X, Li H. ArControl: an arduino-based comprehensive behavioral platform with real-time performance [J]. *Front Behav Neurosci*, 2017, 11:244.
- [10] Guilbeault NC, Guerguiev J, Martin M, *et al.* BonZeb: open-source, modular software tools for high-resolution zebrafish tracking and analysis [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):8148.
- [11] Buccino AP, Lepperød ME, Dragly SA, *et al.* Open source modules for tracking animal behavior and closed-loop stimulation based on Open Ephys and Bonsai [J]. *J Neural Eng*, 2018, 15(5):055002.
- [12] Lopes G, Farrell K, Horrocks EA, *et al.* Creating and controlling visual environments using BonVision [J]. *eLife*, 2021, 10:e65541.
- [13] Siegle JH, López AC, Patel YA, *et al.* Open Ephys: an open-source, plugin-based platform for multichannel electrophysiology [J]. *J Neural Eng*, 2017, 14(4):045003.
- [14] Tarcsay G, Boubilil BL, Ewell LA. Low-cost platform for multianimal chronic local field potential video monitoring with graphical user interface (GUI) for seizure detection and behavioral scoring [J]. *eNeuro*, 2022, 9(5):ENEURO.0283-22.2022.
- [15] Rautio IV, Holmberg EH, Kurup D, *et al.* A novel paradigm for observational learning in rats [J]. *Cogn Neurodyn*, 2024, 18(2):757-767.
- [16] Allsop SA, Wichmann R, Mills F, *et al.* Corticoamygdala transfer of socially derived information gates observational learning [J]. *Cell*, 2018, 173(6):1329-1342.
- [17] Terranova JI, Yokose J, Osanai H, *et al.* Systems consolidation induces multiple memory engrams for a flexible recall strategy in observational fear memory in male mice [J]. *Nature Commun*, 2023, 14(1):3976.
- [18] Keum S, Shin HS. Neural basis of observational fear learning: a potential model of affective empathy [J]. *Neuron*, 2019, 104(1):78-86.
- [19] 巩臣, 张炎杰, 张檬, 等. 一种开源的多功能动物行为学实验系统 [J]. *中国比较医学杂志*, 2020, 30(4):92-98.
- [20] Ajuwon V, Cruz BF, Carriço P, *et al.* GoFish: a low-cost, open-source platform for closed-loop behavioural experiments on fish [J]. *Behav Res Methods*, 2024, 56(1):318-329.
- [21] Lopes G, Monteiro P. New open-source tools: using Bonsai for behavioral tracking and closed-loop experiments [J]. *Front Behav Neurosci*, 2021, 15:647640.
- [22] Neto JP, Mota A, Lopes G, *et al.* Open-source tool for real-time and automated analysis of droplet-based microfluidic [J]. *Lab Chip*, 2023, 23(14):3238-3244.
- [23] Sun Y, Zhang J, Wang Q. *et al.* RpiBeh offers a versatile open source solution for rodent behavior tracking and closed loop interventions [J]. *Sci Rep*, 2025, 15:29429.
- [24] Kane GA, Lopes G, Saunders JL, *et al.* Real-time, low-latency closed-loop feedback using markerless posture tracking [J]. *eLife*, 2020, 9:e61909.

(收稿日期:2025-11-19; 编辑:王蔚)