

赵禹. fMRI 技术在犬科动物认知领域研究的应用 [J]. 中国实验动物学报, 2022, 30(8): 1107-1113.

Zhao Y. Progress of research into functional magnetic resonance imaging in the field of domestic dog cognition [J]. Acta Lab Anim Sci Sin, 2022, 30(8): 1107-1113.

Doi:10.3969/j.issn.1005-4847.2022.08.013

fMRI 技术在犬科动物认知领域研究的应用

赵禹*

(中国刑事警察学院警犬技术学院, 沈阳 110034)

【摘要】 家犬 (*Canis lupus familiaris*) 与人类社会生态高度融合, 已成为人类解析认知进化理论、进行比较认知研究、开展人类认知功能障碍性疾病研究的一种自然模型动物。功能性磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 是一种非侵入式、安全的能反映生物体大脑神经活动时空分布的神经影像学技术, 近年来被应用于家犬行为认知特征神经机制的研究。本文简介了 fMRI 技术; 概述了部分研究者使用视觉、嗅觉、听觉等不同的实验范式对家犬大脑开展 fMRI, 定位不同实验范式下被激活的大脑功能区, 从而揭示家犬认知的神经机制; 总结了 fMRI 技术在犬认知研究中技术和方法上的挑战。以期为国内开展家犬等动物认知研究者提供新的技术方法。

【关键词】 功能性磁共振成像; 家犬; 认知

【中图分类号】 Q95-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1005-4847 (2022) 08-1107-07

Progress of research into functional magnetic resonance imaging in the field of domestic dog cognition

ZHAO Yu*

(Department of Police-dog Technology, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110034, China)

Corresponding author: ZHAO Yu. E-mail: zglnlyzhaoyu@163.com

【Abstract】 Domestic dogs are highly integrated into human society and ecology, and have become a natural model animal for analyzing cognitive evolution theory, conducting comparative cognitive research, and conducting human cognitive dysfunction disease research. Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is a non-invasive and safe neuroimaging technique that can reveal the temporal and spatial distribution of biological brain neural activities. In recent years, fMRI has been used to study the neural mechanisms of behavioral cognitive characteristics in domestic dogs. This paper provides an introduction to the fMRI technique. We reveal how the neural mechanisms of dog cognition were studied using fMRI of dog brains to locate the activated functional brain areas under different experimental paradigms, such as vision, smell, and hearing. The technical and methodological challenges of fMRI in canine cognitive research are also summarized. This paper provides a theoretical basis and reference for researchers who carry out cognition studies on domestic dogs and other animals.

【Keywords】 functional magnetic resonance imaging; domestic dog; cognition

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

动物认知学可以定义为研究动物思考和行为的过程及机制的一门科学^[1]。家犬是第一个被人

类驯化的物种^[2], 尽管起源进化问题一直以来在学术界存在争议^[3-5]。但由于其与人类社会生态的深

【基金项目】 国家自然科学基金 (31702028)。

Funded by National Natural Science Foundation of China (31702028).

【作者简介】 赵禹 (1983—), 男, 硕士, 研究方向: 警犬行为认知遗传研究。Email: zglnlyzhaoyu@163.com

度融合,近年来,已成为继非人灵长类动物、啮齿类动物、鸦科鸟类等动物之后,研究非人类物种行为认知特征的一种新的热门模型动物。家犬被广泛用于比较认知研究、认知进化理论解析及人类认知功能障碍性疾病自然模型动物研究等方向^[6-10]。目前,家犬认知领域的研究除了通过设计能体现犬认知能力的各种实验范式,观察分析家犬在各实验范式中的行为表现^[11-12],研究其认知表型特征,已发展到使用脑电图(EEG)、眼动追踪(eye-tracking)、功能性磁共振成像(fMRI)等多种技术研究家犬行为认知特征深层次神经机制的研究^[13-14]。其中,fMRI 是一种新兴的、非侵入式、安全、无创、能反映生物体大脑神经活动时空分布的神经影像学技术^[15]。近年来,fMRI 技术广泛用于家犬(以下简称犬)认知神经机制的研究中。

1 fMRI 技术简介

功能性磁共振成像(fMRI)是一种无侵入、无创的主要用于对生物体大脑活动皮层区域进行准确定位的一种成像技术。20 世纪 90 年代,Belliveau 等^[16]使用 fMRI 技术,应用灌注成像,采用视觉刺激范式,观察到了人类视觉皮层区域的大脑活动影像。Ogawa 等^[17]开发的血氧水平依赖性成像(Blood Oxygenation Level Dependent, BOLD)的 fMRI 技术广泛应用于大脑皮层功能定位。BOLD-fMRI 也是目前应用最广泛的脑功能成像技术。该技术应用的生理基础是当大脑中某个特定区域的神经元被激活时,该脑区的神经元放电并耗氧,导致局部血氧水平短暂下降。接着含氧血液流向激活神经元所在区域,以满足神经元的局部能量需求,使局部血氧水平很快增加,这种血液中的氧气量超过了神经元活动所消耗的氧气量,因此该区域的含氧血液过多会导致局部磁化率下降(因为氧合血红蛋白是抗磁性的),导致磁共振信号强度增加。

fMRI 技术广泛应用于人脑功能及心理机制的研究。基于 fMRI 技术的人脑功能研究主要在任务态和静息态两种状态下开展。任务态功能磁共振成像(task fMRI, tfMRI)是指受试者通过执行视觉、语言、思维、听觉等特定的任务,根据特定脑区血氧含量的变化从而定位出该任务下大脑活跃区域的数据成像。静息态功能磁共振成像(resting-state fMRI, RS-fMRI)是指在没有明确任务的情况下,语言、注意力、听觉、视觉等各功能脑区在静息状态下

表现出的自发低频波动数据成像。

2 基于 fMRI 技术的犬认知研究

MRI 技术用于研究犬脑的解剖结构早于 fMRI 技术用于研究犬脑功能。对犬进行磁共振扫描分析前,一般要对犬进行麻醉,麻醉的目的是使犬在磁共振设备中保持静止,而麻醉不会改变犬的大脑结构,因此兽医领域中将 MRI 技术用于犬脑退行性疾病诊断、认知功能障碍等临床疾病的诊断。由于麻醉的使用必然会改变犬的意识状态、妨碍犬的注意力、并降低血流和呼吸速率。这可能导致参与认知加工的大脑区域的激活模式不被发掘。为了获得正常状态下的犬脑部功能成像数据,研究者们开始尝试不使用麻醉,使用训练有素的犬进行图像采集。Tóth 等^[18]通过逐步训练,使犬适应了磁共振仪器的环境和噪音,并在犬清醒、无约束静止的状态下,成功获得了犬脑部磁共振成像的数据。但这项研究只包括了犬脑部的结构扫描。不久后,研究人员就获得了犬清醒状态下的脑部功能扫描成像。Berns 等^[19]首次发表了清醒和无约束状态下家犬的 fMRI 数据采集。该小组研究人员通过正强化的方式训练了两头犬在收集 fMRI 高质量成像图像所需的时间内保持静止,实验中犬的头部运动小于 1 mm,无需药物镇定和身体绑定。研究人员采用视觉刺激范式,让犬观看之前形成条件反射的表示食物奖励和无奖励的两种不同的手势信号。通过 fMRI 成像,观察到两头犬对有奖赏手势信号反应的脑部尾状核区域激活更明显。目前为止,世界范围内共有五个独立的研究小组—两个在美国(佐治亚州亚特兰大市和奥尔本市)、两个在欧洲(匈牙利布达佩斯市和奥地利维也纳市)、一个在墨西哥(克雷塔罗),开展了清醒、无约束状态下,通过视觉、嗅觉、听觉等不同的实验范式设计对犬脑部进行 fMRI,定位不同实验范式下犬脑部特定区域的激活状态,进而确定犬的认知神经机制^[20]。

2.1 基于视觉范式的认知研究

Berns 等^[19]在开发了一套让犬在保持静止、清醒和专注于认知任务的情况下进行 fMRI 的技术后,又在更多的样本犬中实验了该方法的可靠性。Berns 等^[21]在 13 头受试犬中发现有 8 头犬对奖励的手势信号在尾状核有激活信号,验证了 fMRI 技术在犬脑功能分析中结果的可靠性,可以在犬清醒的状态下完成。Berns 等^[22]使用 fMRI 技术,通过观察

49 头训练中的服务犬对熟悉训导员和陌生人给出的表示奖励或不奖励的手势信号脑部尾状核、杏仁核和视觉皮层区域激活情况,结合犬的训练结果,经过分析发现,成功的服务犬(不管是熟悉的训导员还是陌生人给出的手势信号)都产生了尾状核激活,而杏仁核没有过度激活,得出了使用 fMRI 技术可以预测犬经过训练后能否成为一头合格服务犬的结论。Dilks 等^[23]使用 fMRI 技术对 6 头接受过在磁共振扫描仪中保持静止训练的犬进行了视觉面部识别能力研究。在犬的颞叶中发现了一个区域,该区域对人脸和犬脸的反应明显高于对日常物体图像的反应,而这种面部选择性在犬的初级视觉皮层中没有发现。该实验证明了犬颞叶皮质中存在专门的面部选择区域,揭示了专注于面部处理的神经机制并非灵长类动物独有,可能有助于解释犬对人类社会线索的高度敏感。Cook 等^[24]收集了犬在观察它们主人喂另外一头逼真的假犬模型时的 fMRI 脑部数据,研究了犬杏仁核激活与通过犬行为评估研究量表(Canine Behavioral Assessment and Research Questionnaire, C-BARQ)测试犬攻击性气质之间的关联。C-BARQ 测试结果显示更具攻击气质的犬,在观察到主人喂假犬时,表现出杏仁核区域更高的激活。这种机制可能与人类的嫉妒有一些相似之处。Cook 等^[24]还发现,当犬反复观察到该情景时,杏仁核区域反应惯化,表明基于暴露的干预措施对潜在攻击性犬的价值。

Gillette 等^[25]为了研究犬脑中真实世界和二维图像视频刺激是否具有等效性,向犬和人分别展示真实世界的人和物体以及相同人和物体的视频,使用 fMRI 对犬和人进行扫描成像。在犬和人的脑部,发现颞后上沟(犬的外侧裂)和枕外侧复合体(犬的内外侧回)对实时和视频刺激都有显著的激活区域。只有犬的外侧裂区域对活体面部的激活程度明显高于视频面部,而在人类中,梭形面部区域和后颞上沟对活体面部的反应明显高于视频面部。证明了仅使用视频刺激,也可以定位到犬脑部激活区域,尽管真实世界的刺激可能更突出。Karl 等^[14]为了研究犬与人的关系,向磁共振设备中保持静止的犬分别展示其主人和陌生人的快乐或者愤怒表情的视频。结果表明,犬主人快乐或愤怒的表情都激活了犬与人类依恋处理的有关大脑区域。相比之下,陌生人的视频主要激活犬视觉和运动加工有关的大脑区域,而熟悉的人总体上激活相对较弱。

大多数快乐的刺激会激活与奖赏处理相关的尾状核,而愤怒的刺激会激活边缘区域。结合眼动追踪技术和行为偏好测试数据都支持照主人脸部的优势角色,并且与 fMRI 实验的结果一致。初步为犬与人类互动时假定的依恋系统的参与提供新颖和融合的见解。Cook 等^[26]为探究犬对与社交和食物奖励偏好的神经基础,首先训练 15 头犬对 3 个不同的物品(玩具车、玩具马和梳子)分别与口头表扬、食物奖励和对照(什么都没有)建立联系。3 种物品任务下分别对清醒犬功能磁共振成像,比较腹侧尾状核的激活情况。结果表明,相对于对照刺激,尾状核对奖赏预测刺激更为活跃。15 头犬中有 13 头表现出赞扬奖励与食物奖励大致相当或更大的激活了尾状核。尾状核反应的个体差异表明,对一些犬来说,社会奖励可能比食物奖励更高,这可能有助于解释社会互动在犬训练中的明显功效。

2.2 基于嗅觉范式的认知研究

嗅觉被认为是犬最强大、最重要的感觉。Berns 等^[27]使用嗅觉范式研究了犬对人类和同种动物的社会认知。经过训练的犬在磁共振成像仪中保持静止不动。分别对受试犬呈现 5 种气味(自我、熟悉人、陌生人、熟悉犬、陌生犬),分析受试犬脑区的激活情况,重点分析犬脑尾状核区域激活情况(因为该区域的激活与积极期望有关,而且该区域的解剖位置也很明确)。结果表明,犬脑嗅球部被五种气味激活的程度相似,而尾状核区域被熟悉人的气味最大程度激活。犬尾状核的激活表明,犬不仅能从其他气味中分辨出熟悉人的气味,而且与它有着积极的联系。这说明了犬嗅觉的力量,并为人类在犬生活中的重要性提供了重要证据。Jia 等^[28]利用 fMRI 技术,通过比较清醒和麻醉状态下犬大脑对不同气味浓度的神经反应,研究犬嗅觉背后的认知过程。结果显示,在出现高浓度和低浓度气味时,清醒和麻醉状态下犬的嗅球和双侧梨状叶均表现出强烈激活。并且,激活强度及空间范围由浓度介导,气味浓度越高,激活强度越大。清醒状态下的犬表现出内侧、上、眶额叶皮质和小脑等区域的激活,所有这些区域都与认知过程有关,而麻醉犬的这些区域没有激活,推测麻醉会降低气味的处理, fMRI 技术的应用可以更真实反映犬嗅觉系统活动的神经基础。Prichard 等^[29]通过对 18 头犬分别呈现与食物奖励相关的目标气味(a)、无关联的分心气味(b)以及两种气味的混合物(ab),获得清醒犬

各任务态下的 fMRI 数据,研究犬对 a、b 及混合气味 ab 辨别的神经机制。研究人员获得了每头犬在 3 种气味刺激呈现过程中脑部神经激活情况(主要关注 3 个已知的与气味处理有关的区域,即尾状核、杏仁核和嗅球)数据。研究者使用 SPSS 24(IBM) 中的混合模型程序分析发现 3 种气味刺激在尾状核、杏仁核和嗅球中都存在神经差异证据($P = 0.004$),这 3 种气味刺激因气味类型而显著不同($P < 0.001$)。post-hoc 检验对 3 个模型进行多次比较校正后,尾状核和嗅球这两个结果变得不显著,只有杏仁核区域显示出气味刺激之间的显著差异($P < 0.0001$)。犬杏仁核区域激活情况最大限度地区分基于刺激-奖赏关系的气味刺激(a),而混合物(ab)激活与无奖赏刺激(b)相似。Berns 等^[27]和 Jia 等^[28]进行的研究为犬嗅觉神经成像的有效性提供了证据。嗅球一直与气味的处理有关,麻醉的使用和气味的强度与嗅觉的处理直接相关。此外,尾状核的激活支持基于奖赏的气味处理。而 Prichard 等^[29]的结果显示杏仁核区域的激活更能体现基于奖励的气味刺激。鉴于这些研究发现,有明确的证据表明,fMRI 技术可用于探索犬的嗅觉加工。

2.3 基于听觉范式的认知研究

听觉在犬生活的许多方面起着重要作用,对于犬与人类和同类的沟通都非常重要。Bach 等^[30]使用简单的高斯噪声和规则的间隔声(regular interval sounds, RIS)两种声音刺激模式,获得了 10 头麻醉比格犬听觉刺激后的解剖图像和功能扫描图像。结果通过组分析,确定与右上橄榄核、外侧丘系和内囊位置相匹配的显著激活。此外,发现了听觉皮层被大量激活的证据。RIS 条件(包括基音)与高斯噪声(无基音)的对比显示,在与左侧内侧膝状体核位置匹配的区域中有显著影响。

Andics 等^[31]使用 fMRI 技术对犬和人的声音敏感脑区的功能和位置进行了比较研究。11 头犬和 22 个人参与试验,在扫描过程中呈现了一组相同的听觉刺激,以寻找功能相似的声音敏感皮层区域。证明犬的声音区域存在,并且与人类前颞部的声音区域表现出相似的模式。研究结果表明,在人和犬两个物种中,都发现了大脑对声音情绪效价线索的敏感性,定位在相似的非初级听觉区域。犬的外侧裂周围区域和人的颞上沟和额叶下皮质均显示出皮质声敏感性。这两个物种在内侧膝状体中均表现出敏感性。在犬的大脑中,确定了对犬的发声以

及人类的发声和环境声音最为活跃的亚区域。几乎所有人类听觉激活区域对人类发声都是最大的,尽管内侧膝状体对犬的发声表现出最大的激活。

Gábor 等^[32]结合犬的行为与 fMRI 数据,研究了犬与说话人的社会关系对犬脑语音处理区域的影响。发现犬对主人的行为依恋得分与犬听到主人声音引起的尾状核神经活动增加程度正相关;次级听觉尾侧外侧裂脑回的活动增加;听到主人赞许后犬尾状核活动增加。通过识别犬依赖于社会关系的神经奖赏反应,揭示了人类婴儿与母亲、犬与主人的依恋调节神经机制的相似性。

Cuaya 等^[33]使用 fMRI 研究了犬大脑的语音检测和语言表征。使用多体素模式分析(MVPA)发现,双侧听觉皮层区域代表自然语音和加扰语音的方式不同;在右听觉区域,长头犬的分类器性能更好。这种用于语音检测的神经能力不是基于对语音的优先处理,而是基于对声音自然度的敏感性。此外,在自然语言的情况下,两种语言在次级听觉皮层和皱褶前回都有不同的活动模式;年龄较大的犬对熟悉和不熟悉的语言的反应差异较大,表明语言接触量的作用。在两种语言的混乱版本中,没有区域表现出不同,这表明自然语音中语言之间的活动差异反映了对语言特定规律的敏感性,而不是对光谱语音线索的敏感性。这些表明,不同的皮层区域支持犬大脑中的语音自然性检测和语言表征。

犬认知神经机制的研究领域很广,大部分研究者采用通过犬的视觉、嗅觉、听觉等不同的实验范式设计对清醒状态的犬脑部进行 fMRI,有的研究者根据自己的实验目的在实验中运用了不只一种感觉范式,有的还结合了犬的行为表型及其他一些实验方法(如:脑电图、眼动追踪等)探索反映犬认知的神经机制。本文仅列举了部分研究者的实验成果,为国内开展家犬等动物认知领域研究提供思路参考。

3 fMRI 技术应用于犬认知研究的挑战

在犬 fMRI 研究中,目前使用的 fMRI 硬件设备及脑影像数据采集、统计分析处理的方法标准都是为人类开发的。除了注意犬在磁共振仪中静止的训练方法、犬的安全性等问题外,尤其要重视提升犬 fMRI 方法参数上的改进,从而获取各任务态下犬大脑更为真实、清晰、准确的成像信息,进而反映犬的认知本质。

3.1 犬运动问题

犬在各种实验范式的任务态下保持静止是 fMRI 应用的前提,运动状态下的受试犬无法开展 fMRI 研究。Berns 等^[19]开发了正强化训练法,首次获得了清醒和无约束状态下家犬的 fMRI 数据采集。目前为止,并非所有类型的犬都能开展此项研究,这是由犬的训练性能决定的。研究人员认为理想受试犬的气质特征是冷静、具有好奇心、适应新环境快、不惧噪音、不恐高,在封闭环境中具有保持放松的能力,最重要的是在训练期间表现出好的动机驱动力。尽管 Berns 等^[19]、Jia 等^[28]、Andics 等^[31]训练犬的方法略有不同,但都遵循经典的条件反射和操作式条件反射的原理。目前未见有训练方法成功率比较的报道。任何训练方法的首要目标都是减少训练时间,同时保持所需的犬的某种行为。一般经过训练后的犬在磁共振仪中保持静止的时间至少 4 min,保持静止的时间与收集足够数量的 fMRI 所需的时间相对应(实际持续时间取决于成像序列和实验设计)。这期间,即使训练有素的犬也会有摇头、吞咽等影响 fMRI 数据的动作出现。数据分析中应特别强调进行数据处理(舍弃过度移动的图片 and 去除微小运动产生的伪影)。例如,一些研究人员使用外置红外摄像机跟踪犬头部运动的数据,对数据中的运动相关伪影进行回顾性校正^[34]。

3.2 犬安全问题

由于磁共振环境中存在极高的声压级,工作时的声级范围在 65 ~ 95 dB,峰值在 120 ~ 131 dB,噪声可引起犬的不适甚至短期听力损伤^[35]。在设计犬 fMRI 实验时, Cook 等^[36]给犬佩戴消音耳罩来进行降噪处理,可以降噪高达 28 dB。也有研究者采用或改变扫描参数,从而在扫描过程中衰减声压级^[37]。除了噪声水平外,犬的射频比吸收率(SAR)也存在安全问题。尽管没有针对非人类受试者的此类指南,但研究人员有责任在 MRI 实验中使用犬来评估受试者经历的 SAR 水平。犬在扫描设备内时,最好遵守 FDA 对人类的标准^[20]。此外,将实验犬放入 MR 环境之前必须确保犬体内没有任何铁磁性材料,体内存在导电材料可能会致过热和烧伤。

3.3 硬件设备及软件参数

犬的大脑与人类的大脑神经解剖学差异明显,脑容积较人类小,血管和神经元生理等许多方面存在差异^[38-40]。Huber 等^[41]建议为犬开发专门定制的 fMRI 硬件和数据分析方法,以获得犬脑部更清晰

的功能图像,提高犬 fMRI 的敏感性和特异性。

3.3.1 线圈选择

犬 fMRI 的图像质量比人类 fMRI 图像质量要低。主要是因为犬进行 fMRI 的射频线圈和成像协议未按照犬的神经解剖学特点定制。犬的大脑最大为人脑的三分之一,大脑区域与人类大脑区域有很大的生理差异。已发表的犬类 fMRI 研究使用的都是不同类型的人类 MRI 线圈。线圈的几何形状没有针对犬的头部进行优化,靠近犬大脑的射频通道数量有限。由于通道数量较少,与人类功能磁共振成像相比,时间和空间分辨率的预期成像性能都很低。专门为特定物种定制的线圈(如绒猴) fMRI 成像质量已显出巨大的优势^[41]。

3.3.2 场强参数选择

Martín-Vaquero 等^[42]用麻醉犬分析 3T 和 7T 扫描仪两种场强之间图像质量的差异。结果表明,犬脑部的图像在 3T 和 7T 场强的扫描仪中质量相当,由磁化率和化学位移引起的噪声在 7T 扫描仪中更加明显,建议使用 3T 扫描仪。这与预期的场强增加会提升图像的空间分辨率和对比度分辨率结果相反。与 3T 不同,从 7T 获得高质量的功能磁共振成像数据需要选择适当的序列参数(随场强变化)和使用高阶填隙。因此,如果做得好,像 7T 这样的高场强有可能提供更高的信噪比和更小的体素,这在犬类成像中至关重要,因为犬类的大脑结构相对小于人类。Jacqmot 等^[43]比较了 1.5T、3T 和 7T 场强下犬脑部 T2 加权图像。结果也显示 7T 超高场图像在不同磁性组织之间的界面容易出现伪影,3T MR 成像在评估犬脑解剖成像综合效果较好,成像伪影较少。

3.3.3 血流动力学响应函数(HRF)

要探究 fMRI 数据与神经活动的关系,研究 HRF 模型是关键。由于不同物种大脑大小、形状及血管和神经元生理特征存在差异,不同物种的 HRF 有所不同。例如,在清醒的啮齿动物中,HRF 峰值的潜伏期为 2 s,而人类使用的标准 HRF 的峰值潜伏期为 6 s^[34]。以往犬的功能磁共振成像研究通常使用人类的 HRF。Boch 等^[44]揭示了犬在视觉刺激范式下,HRF 峰值比人类更早出现,并表明使用定制的犬的 HRF 对提高犬 fMRI 检测能力具有重要作用。

3.4 实验的严谨性

鉴于犬 fMRI 是一个新兴领域,实验严谨性还有很多需要不断完善的方面。如:犬没有主观性,缺

乏任务刺激传递给犬的时间控制,这在 BOLD 信号的一般线性建模中是一种缺陷^[19];关于犬 fMRI 研究的样本量普遍较小,而由于犬的品种、性别及个体的认知差异,可能导致结果分析存在偏差^[41];缺乏公认的高质量的犬大脑皮层图谱限制了研究人员对犬脑功能机制的精准研究。最近已有研究人员开展犬大脑皮质图谱的研究制定,以便为今后开展犬脑功能研究的精准区域定位使用^[45-46]。

4 展望

使用 fMRI 技术开展犬在清醒、无约束、静止状态下的认知机制研究,除了有从事犬认知研究的研究人员,还需要专业训练犬在磁共振仪中保持静止的训练团队和磁共振操作分析团队通力合作。随着 fMRI 技术在犬认知领域研究工作的不断应用,越来越多的关于犬认知的神经机制被揭秘。这不仅使人类更了解犬,而且在比较认知研究和解析认知进化理论中都取得了不少的成果,也为人类开展认知功能障碍性疾病研究提供了一种新的模型动物。此外,fMRI 技术应用于犬认知领域研究,还可以提高工作犬的选育进程。以往我国工作犬(如:军警犬、导盲犬等)的选择都在犬的行为水平开展。而工作犬能否胜任工作,除了外在的行为表型,内在的认知能力(如:执行能力、工作记忆、社会认知等)至关重要^[47-48]。开展工作犬认知水平的研究是工作犬选育的一个新的领域和方向。通过设计科学的任务实验范式,用 fMRI 研究那些经过严格训练并在工作中取得成功的工作犬的脑部激活区域特征模式,从而更好的识别工作犬的认知特征标准。

参 考 文 献(References)

- [1] Krichbaum S, Davila A, Lazarowski L, et al. Animal Cognition [M]. New York: USA Oxford University Press; 2020.
- [2] Bergström A, Frantz L, Schmidt R, et al. Origins and genetic legacy of prehistoric dogs [J]. Science, 2020, 370(6516): 557-564.
- [3] Vilà C, Savolainen P, Maldonado JE, et al. Multiple and ancient origins of the domestic dog [J]. Science, 1997, 276(5319): 1687-1689.
- [4] Thalmann O, Shapiro B, Cui P, et al. Complete mitochondrial genomes of ancient canids suggest a European origin of domestic dogs [J]. Science, 2013, 342(6160): 871-874.
- [5] Frantz LAF, Mullin VE, Pionnier-Capitan M, et al. Genomic and archaeological evidence suggest a dual origin of domestic dogs [J]. Science, 2016, 352(6290): 1228-1231.
- [6] Boch M, Wagner IC, Karl S, et al. Similarities and differences of face and body perception in the dog (Canis familiaris) and human brain [EB/OL]. [2021-08-18]. <https://www.biorxiv.org/content/biorxiv/early/2021/08/18/2021.08.17.456623.full.pdf>.
- [7] Karl S, Sladky R, Lamm C, et al. Neural responses of pet dogs witnessing their caregiver's positive interactions with a conspecific: an fMRI study [J]. Cereb Cortex Commun, 2021, 2(3): tgab047.
- [8] Sanches FJ, de Melo JC, Ferreira SP, et al. Aging-related episodic-like memory decline in dogs [J]. Behav Brain Res, 2022, 22: 113762.
- [9] Mondino A, Gutiérrez M, González C, et al. Electroencephalographic signatures of canine cognitive dysfunction [EB/OL]. [2022-01-28]. <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2022.01.28.478033v1.full.pdf>.
- [10] Andics A, Miklósi Á. Neural processes of vocal social perception: Dog-human comparative fMRI studies [J]. Neurosci Biobehav R, 2018, 85: 54-64.
- [11] Bensky MK, Gosling SD, Sinn DL. The world from a dog's point of view: a review and synthesis of dog cognition research [J]. Adv Stud Behav, 2013, 45: 209-406.
- [12] Lea SEG, Osthaus B. In what sense are dogs special? Canine cognition in comparative context [J]. Learn Behav, 2018, 46(4): 335-363.
- [13] Kujala MV, Kauppi JP, Törnqvist H, et al. Time-resolved classification of dog brain signals reveals early processing of faces, species and emotion [J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 1-13.
- [14] Karl S, Boch M, Zamansky A, et al. Exploring the dog-human relationship by combining fMRI, eye-tracking and behavioural measures [J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 1-15.
- [15] Buchbinder BR. Functional magnetic resonance imaging [J]. Handb Clin Neurol, 2016, 135: 61-92.
- [16] Belliveau JW, Kennedy DN, McKinsty RC, et al. Functional mapping of the human visual cortex by magnetic resonance imaging [J]. Science, 1991, 254(5032): 716-719.
- [17] Ogawa S, Lee TM, Kay AR, et al. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation [J]. PNAS, 1990, 87(24): 9868-9872.
- [18] Tóth L, Gácsi M, Miklósi Á, et al. Awake dog brain magnetic resonance imaging [J]. J Vet Behav, 2009, 4(2): 50.
- [19] Berns GS, Brooks AM, Spivak M. Functional MRI in awake unrestrained dogs [J]. PLoS One, 2012, 7(5): e38027.
- [20] Karl S, Boch M, Virányi Z, et al. Training pet dogs for eye-tracking and awake fMRI [J]. Behav Res Methods, 2020, 52(2): 838-856.
- [21] Berns GS, Brooks A, Spivak M. Replicability and heterogeneity of awake unrestrained canine fMRI responses [J]. PLoS One, 2013, 8(12): e81698.
- [22] Berns GS, Brooks AM, Spivak M, et al. Functional MRI in awake dogs predicts suitability for assistance work [J]. Sci Rep, 2017, 7: 1-10.
- [23] Dilks DD, Cook P, Weiller SK, et al. Awake fMRI reveals a specialized region in dog temporal cortex for face processing [J]. Peer J, 2015, 3: e1115.

- [24] Cook P, Prichard A, Spivak M, et al. Awake fMRI reveals covert arousal in aggressive dogs under social resource threat [EB/OL]. [2017-10-14]. <https://www.biorxiv.org/content/biorxiv/early/2017/10/14/203323.full.pdf>.
- [25] Gillette KD, Phillips EM, Dilks DD, et al. Using live and video stimuli to localize face and object processing regions of the canine brain [J]. *Animals*, 2022, 12(1): 108.
- [26] Cook PF, Prichard A, Spivak M, et al. Awake canine fMRI predicts dogs' preference for praise vs food [J]. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2016, 11(12): 1853-1862.
- [27] Berns GS, Brooks AM, Spivak M. Scent of the familiar: An fMRI study of canine brain responses to familiar and unfamiliar human and dog odors [J]. *Behav Process*, 2015, 110: 37-46.
- [28] Jia H, Pustovsky OM, Waggoner P, et al. Functional MRI of the olfactory system in conscious dogs [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1): e86362.
- [29] Prichard A, Chhibber R, King J, et al. Decoding odor mixtures in the dog brain: an awake fMRI study [J]. *Chem Senses*, 2020, 45(9): 833-844.
- [30] Bach JP, Lüpke M, Dziallas P, et al. Auditory functional magnetic resonance imaging in dogs-normalization and group analysis and the processing of pitch in the canine auditory pathways [J]. *BMC Vet Res*, 2016, 12:32.
- [31] Andics A, Gácsi M, Faragó T, et al. Voice-sensitive regions in the dog and human brain are revealed by comparative fMRI [J]. *Curr Biol*, 2014, 24: 574-578.
- [32] Gábor A, Andics A, Miklósi Á, et al. Social relationship-dependent neural response to speech in dogs [J]. *Neuroimage*, 2021, 243: 118480.
- [33] Cuaya LV, Hernández-Pérez R, Boros M, et al. Speech naturalness detection and language representation in the dog brain [J]. *NeuroImage*, 2022, 248: 118811.
- [34] Thompkins AM, Deshpande G, Waggoner P, et al. Functional magnetic resonance imaging of the domestic dog: research, methodology, and conceptual issues [J]. *Comp Cogn Behav Rev*, 2016, 11: 63-82.
- [35] Venn RE, McBrearty AR, McKeegan D, et al. The effect of magnetic resonance imaging noise on cochlear function in dogs [J]. *Vet J*, 2014, 202(1): 141-145.
- [36] Cook PF, Spivak M, Berns GS. One pair of hands is not like another: caudate BOLD response in dogs depends on signal source and canine temperament [J]. *Peer J*, 2014, 2: e596.
- [37] Baker MA. Reduction of MRI acoustic noise achieved by manipulation of scan parameters-A study using veterinary MR sequences [J]. *Radiography*, 2013, 19(1): 11-16.
- [38] Schoenebeck JJ, Ostrander EA. The genetics of canine skull shape variation [J]. *Genetics*, 2013, 193(2): 317-325.
- [39] Hecht EE, Smaers JB, Dunn WD, et al. Significant neuroanatomical variation among domestic dog breeds [J]. *J Neurosci*, 2019, 39(39): 7748-7758.
- [40] Horschler DJ, Hare B, Call J, et al. Absolute brain size predicts dog breed differences in executive function [J]. *Anim Cogn*, 2019, 22(2): 187-198.
- [41] Huber L, Lamm C. Understanding dog cognition by functional magnetic resonance imaging [J]. *Learn Behav*, 2017, 45(2): 101-102.
- [42] Martín-Vaquero P, Da Costa RC, Echandi RL, et al. Magnetic resonance imaging of the canine brain at 3 and 7 T [J]. *Vet Radiol Ultrasound*, 2011, 52(1): 25-32.
- [43] Jacqmot O, Van Thielen B, Hespel AM, et al. T2-weighted turbo spin-echo magnetic resonance imaging of canine brain anatomy at 1.5T, 3T, and 7T field strengths [J]. *Anat Rec (Hoboken)*, 2022, 305(1): 222-233.
- [44] Boch M, Karl S, Sladky R, et al. Tailored haemodynamic response function increases detection power of fMRI in awake dogs (*Canis familiaris*) [J]. *NeuroImage*, 2021, 224: 117414.
- [45] Czeibert K, Andics A, Petneházy Ö, et al. A detailed canine brain label map for neuroimaging analysis [J]. *Biol Futura*, 2019, 70(2): 112-120.
- [46] Johnson PJ, Luh WM, Rivard BC, et al. Stereotactic cortical atlas of the domestic canine brain [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 1-16.
- [47] MacLean EL, Brian H. Enhanced selection of assistance and explosive detection dogs using cognitive measures [J]. *Front Vet Sci*, 2018, 5: 236.
- [48] Hare B, Ferrans M. Is cognition the secret to working dog success? [J]. *Anim Cogn*, 2021, 24(2): 231-237.

[收稿日期] 2022-06-21