

王婉宁, 贾宁. 动物元认知的研究进展 [J]. 中国实验动物学报, 2023, 31(9): 1217-1224.

Wang WN, Jia N. Research progress of animal metacognition [J]. Acta Lab Anim Sci Sin, 2023, 31(9): 1217-1224.

Doi:10.3969/j.issn.1005-4847.2023.09.013

动物元认知的研究进展

王婉宁, 贾宁*

(河北师范大学教育学院, 石家庄 050024)

【摘要】 元认知曾被认为是人类独有的高级认知能力, 动物是否具有元认知是比较心理学领域争论的热点问题之一。对该问题进行探讨, 有助于研究者们揭示元认知的系统发育根源, 绘制人类高级认知功能的进化历程。本文对过去二十五年间主要的动物元认知研究进行了梳理, 总结了不确定性监控范式、信息搜寻范式与信心判断范式三种常用的研究范式与对应的测量指标, 概述了动物元认知研究领域联想模型和元认知模型两种对立的解释倾向及其依据。针对联想模型与元认知模型的争论, 提出改进研究范式来检验元认知模型与创新理论以整合模型两种未来的研究方向。

【关键词】 动物元认知; 比较心理学; 元认知监控; 联想学习

【中图分类号】 Q95-33 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1005-4847 (2023) 09-1217-08

Research progress of animal metacognition

WANG Wanning, JIA Ning*

(College of Education Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Corresponding author: JIA Ning. E-mail: jianing@hebtu.edu.cn

【Abstract】 It is widely believed that metacognition is a specialized cognitive capacity that only humans possess. A contentious debate in the field of comparative psychology is whether animals have metacognition. The exploration of this question will help researchers to uncover the phylogenetic roots of metacognition and to map the evolutionary history of higher cognitive functions in humans. This article reviews the main animal metacognition studies in the past 25 years. We summarize three common research paradigms and corresponding measures: uncertainty monitoring, information seeking, and confidence judgment paradigms. Two opposing explanatory tendencies and their rationales are outlined in the field of animal metacognition research: associative and metacognitive models. In response to the debate between associative and metacognitive models, two future research orientations are proposed to improve the research paradigm to assess the metacognitive model and to innovate theory to integrate these models into a new one.

【Keywords】 animal metacognition; comparative psychology; metacognitive monitoring; associative learning

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

元认知是“对认知的认知”, 是以认知本身为对象的一种高阶认知能力^[1-2], 具有监控和控制的关键特征^[3]。元认知在人类的认知发展历程中出现得较晚, 与人类的陈述性认知系统 (declarative cognition system) 和自我意识 (self-awareness) 相

关^[4-7], 是人类独有的高级认知能力^[8]。比较心理学领域中动物元认知的研究挑战了该观点, 探讨了非人类的动物 (以下均称动物) 是否拥有与人类类似的元认知能力。研究该问题有利于加深理解动物的高级认知能力, 揭示元认知的系统发育根源,

【基金项目】 河北省教育科学规划重点资助课题 (2202090)。

Funded by Hebei Educational Science Planning Project (2202090)。

【作者简介】 王婉宁 (1998—), 女, 硕士, 研究方向: 认知与学习。Email: irenewangplus@outlook.com

【通信作者】 贾宁 (1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 认知与学习。Email: jianing@hebtu.edu.cn

绘制人类高级认知功能进化的历程^[9-10]。借鉴动物元认知研究中非言语的实验范式可以探究儿童早期的认知发展过程^[11],动物元认知模型的开发也为揭示阿兹海默症和自闭病的神经生物学基础提供了新途径^[12-13]。

人类元认知的定义包括了对自己 and 他人认知状态和过程的思考^[14],而动物普遍缺乏对其他动物心理状态的认知^[15]。在动物元认知研究领域,研究者们通常缩小元认知的指代范围,将其定义为“对自身状态的认知”^[16],即认为动物元认知是动物对自身心理状态或认知过程的监控和控制能力。动物元认知的探索源于 Premack 和 Woodruff 对黑猩猩心理理论的研究,实验发现黑猩猩能够理解人类行为的意图,并作出对应的反应^[17-18]。迄今已采用多种范式对动物元认知进行研究,但仍未达成对研究结果的一致解释^[19-21]。动物是否存在元认知这一问题存在联想模型 (associative model) 和元认知模型 (metacognitive model) 两种对立的解释倾向^[8,22-23]。联想模型认为动物不具备元认知能力,其在实验中表现出的元认知是低阶的联想学习的结果^[24-25]。元认知模型与之相反,认为动物拥有元认知能力^[10,20,26]。为了对动物元认知领域的研究进行更深入的梳理,本文总结了动物元认知研究的常用范式与指标,随后从联想模型与元认知模型的解释倾向出发,综述动物元认知领域的研究,并展望未来的研究方向。

1 动物元认知研究范式

人类元认知的研究主要通过言语报告体现“对自己是否知道的判断和评价”^[27],但对动物元认知的研究无法通过“言语”来直接判断它们是否“知道自己不知道”或“感到不确定”,只能间接通过行为进行推断^[28]。动物元认知研究的焦点为元认知监控,主要实验范式有不确定性监控范式 (uncertainty monitoring paradigm)、信息搜寻范式 (information seeking paradigm) 与信心判断范式 (confidence judgement paradigm)。

1.1 不确定性监控范式

不确定性监控范式考察前瞻性元认知监控 (prospective metacognition monitoring),即动物是否能够根据已有知识,对未来即将发生的事件进行前瞻性地评估。不确定性监控范式是最常使用的范式,其基本原理是如果动物能够根据之前试次的难

易程度对当前试次的难度作出预见性的判断,会直接拒绝对高难度该试次作出回答。该范式的常用任务有视觉密度辨别任务 (visual density discrimination task) 和相同-差异任务 (same-different task)。常用指标为不确定反应 (uncertainty response),体现了动物在不确定情境下的“迟疑”^[29-30],操作性定义为不确定选项的使用频次。视觉密度辨别任务让动物判断视觉刺激之间的异同并对刺激进行分类,可以通过按下不确定选项跳过不确定或者难以辨别的刺激直接跳转到新试次,避免了回答错误导致的惩罚^[31-32]。相同-差异任务只需要动物比较两个知觉刺激之间的关系,若认为刺激之间的差异接近“零”,则判断为“相同”,否则判断为“差异”。在对答案不确定时,可以按下不确定选项跳过当前试次来避免可能出现的惩罚^[33-34]。具有元认知的动物能适应性地使用不确定选项,即在简单试次中较少按下不确定选项,在困难试次中较多按下不确定选项。

1.2 信息搜寻范式

信息搜寻范式和下文的信心判断范式均考察动物的回溯性元认知监控 (retrospective metacognition monitoring),即动物是否具有回溯性地评估自身知识状态的能力。信息搜寻范式的基本原理为如果动物能够监控自身所拥有的知识,那么在缺乏做出确定回答的相应信息时,动物会主动寻找额外信息以避免随机猜测。信息搜寻范式常用的任务有食物隐藏任务 (food-concealment task) 和样本匹配任务 (match-to-sample task)。常用指标为信息搜寻行为 (information-seeking behavior),体现了动物在知道自己不知道时会主动寻求额外信息,操作性定义为寻求提示信息的频次。食物隐藏范式要求动物判断食物诱饵隐藏的位置。诱饵被放置在不透明的杯子中,倒扣在透明托盘上。具有元认知的动物能够在诱饵放置过程不可见与无法根据逻辑排除诱饵位置 (即同时存在三个不透明杯子,而非只有一个不透明杯子) 时,从透明托盘下方进行观察,以定位诱饵隐藏的位置^[35-36]。样本匹配任务则要求动物学习匹配颜色相同的按键,动物若具有元认知,会评估自己的知识状态,在记忆痕迹较弱时先寻求提示线索,再做出选择^[37-38]。

1.3 信心判断范式

信心判断范式体现了动物对自己是否知道的确信程度,其基本原理为如果动物能够监控自己所

拥有的知识,则能够对作答的正确与否作出信心程度的判断。信息搜寻范式常用的任务为决策后投注任务(post-decision wagering task),常用指标为信心判断等级(confidence judgement rate),操作性定义为作出选择之后的等待时间。Joo 等^[39]使用决策后投注任务进行的实验给大鼠(rats)呈现 6 个端口,每个试次随机在 2 个端口中先后亮起灯光,要求大鼠判断哪个是先亮起灯光的端口,判断后在所选端口停留 2 ~ 8 s。停留时间越长,代表信心判断等级越高。如果选择正确,停留时间越长食物奖励越高。选择错误没有食物奖励,停留时间越长,将损失更多开始新试次以获得奖励的机会。若大鼠能够进行元认知监控,将在高信心选项上投入更多的时间,使奖励最大化。

2 两种理论模型

动物元认知研究中目前存在联想模型和元认知模型两种对立的解释倾向。联想模型认为动物表现出来的元认知是低水平的联想学习的结果。元认知模型与之相反,认为动物拥有高水平的元认知能力。

2.1 联想模型

2.1.1 联想模型的主张与依据

联想模型使用联想学习机制来解释动物表现出的元认知,联想学习是观察线索和反应之间的时空连续性,用一套固定的关系在刺激物的表征之间进行解释。联想模型的理论基础是 Morgan^[40]提出的简明法则,该法则是比较心理学的基础理论之一。简明法则对动物的高阶认知持质疑态度,认为动物的行为若能用心理演化和发展尺度上较低的过程来解释,就不能用较高层次的心理过程来解释^[40]。因此,如果无法证明动物的行为的确使用了某种更加复杂的认知过程,就应该认为该行为是某种低阶心理过程的结果。联想模型参照了简明法则,认为动物不存在元认知,其表现出的元认知行为是联想学习的结果。

联想模型的主张有对应依据。从系统发育限制(phylogenetic restriction)的角度来看,人类和动物的智力进化程度相距甚远,动物不太可能普遍具有元认知。Inman 等^[41]对白羽王鸽(*Columba livia*)的记忆监测能力与对不确定选项的运用进行了研究,发现白羽王鸽不能灵活地使用不确定选项来回避难度较高的试次,不确定反应曲线也不受强化间隔

长短的影响。Sutton 等^[42]在 Inman 等^[41]的研究基础上增加了多项元认知实验,发现白羽王鸽对不确定选项的选择仍不随反应的正确率变化,测试后进行的信心判断也不随回答结果的正确与否而变化。而在智力水平最接近人类的灵长类中,也有物种无法灵活地使用不确定选项。Beran 等^[31]在视觉密度辨别任务中为了加强卷尾猴(*Capuchin monkey*)对不确定选项的学习,将错误反应后的惩罚时间从 20 s 提高到了 90 s,但仍有 5 只卷尾猴没有提高对不确定选项的适应性使用。上述实验中,动物虽然使用了不确定选项,但任务难度与类型等变化都未改变对不确定选项的选择频次或信心判断等级,可知动物在按下不确定选项时并没有意识到自己不知道。

Smith 等^[43]根据联想模型进行定量建模来描绘动物的“元认知行为”,以排除元认知模型的解释。模型尝试拟合恒河猴在一项视觉密度辨别任务中的实验数据^[44],被试在实验中除作出稀疏与密集两项主要反应外,还需要对难以辨别的刺激作出不确定反应。模型假设被试在记忆中存储了不同刺激-反应的强化组合,辨别时需要对刺激的内部主观印象(而非客观刺激水平)作出反应。模型包括感受性和不确定反应频次两个自由参数,不确定反应的频次在所有试次中保持恒定。模型良好拟合了实验数据,由此,Smith 等^[43]认为,恒河猴在该项任务中表现出的适应性的不确定反应是联想性质的。

2.1.2 联想模型的补充

Carruthers^[45]补充支持了联想模型对元认知低水平解释的合理性。他提出的“欲望-信念系统”(desire-belief system)认为进化形成的决策机制控制动物不确定反应的产生。动物在决策时会产生不同强度的欲望和信念,信念指对环境存在某种刺激与作出某种行为会获得相应结果的确信程度,欲望指想获得的结果。信念强度与欲望强度之间交互影响,组合成不同的目标状态,各状态之间相互竞争,试图控制行为。决策机制控制动物最终选择的目标状态与产生相应的行为。如果目标状态强度过于接近,动物产生了不确定感,则暂停选择,继续寻求新的信息或随机进行其他选择。如果目标状态强度相差较大,则产生较强目标对应的行为。根据该观点,动物的元认知行为只需使用低阶的决策能力,而无需高阶的元认知能力。

2.1.3 联想模型受到的质疑

联想模型在一定程度上降低了动物元认知实验结果解释中拟人化偏见的风险^[46]。但模型的解释力有限,主要受到两方面的质疑。

一方面,联想模型无法解释不确定反应和中间反应(middle response)的分离。联想模型的支持者认为不确定反应是联想性质的,但有实验表明不确定反应具备高阶的元认知性质^[47]。如在一项加入了中间反应和双任务范式的视觉密度辨别任务中^[44],动物除作出稀疏和密集两种主要反应外,还有第三种反应。第三种反应包括不确定反应和中间反应,动物可以对刺激连续体中的中间部分做出不确定反应或中间反应。中间反应是联想性质的,降低了动物的认知负荷,促使动物积极地将不确定或困难的刺激分类为中间刺激。实验要求动物同时进行密度辨别任务与记忆任务,结果表明,同时进行两项任务对不确定反应的影响远高于对稀疏、中间和密集反应的影响。双任务带来的高认知负荷基本没有对中间反应造成影响,即在高认知负荷条件下,中间反应和不确定性反应分离了。这种分离表明不确定性反应并非联想性质的,而可能代表了更高层次的元认知能力。

另一方面,联想模型无法解释不确定反应在复杂环境中的灵活应用。联想学习的实质是刺激与反应之间建立连结,该连结是一一对应的。若动物元认知是联想性质的,则动物无法灵活应对复杂的环境。一项风险动态变化的元认知实验中,恒河猴(*Macaca mulatta*)与人类被试需要对刺激物进行分类,并自由选择何时使用兑现反应(cash-out response)来领取累积的奖励^[48]。结果发现,恒河猴和人类为减少错误成本,均随实验难度和奖励数量灵活地调整决策标准,并随奖励地积累扩大兑现反应的使用范围。结果表明,恒河猴的不确定性监测和风险管理系统具有很大的灵活性。

2.2 元认知模型

2.2.1 元认知模型的主张

元认知模型认为,动物拥有监测包括记忆强度在内的关于自身的认知^[42],并由此控制行为的能力。具体表现为可以像人类一样监控自己的记忆、调节自己的行为或在陌生情境中寻找信息等。元认知模型的理论基础为信号检测论,该理论描述了人在不确定的情况下如何做出决定及其决策标准如何,通过对比人和动物在不确定情况下的决策标

准与模式能够衡量动物是否具有元认知。元认知模型还参考了人类元认知的标准模型^[3],即一个元水平层面的认知过程监测和控制着客体水平层面的认知过程。在简明法则的理论背景下,若想证明动物元认知的存在,动物所表现出的行为应是联想模型所无法解释的。

2.2.2 元认知模型的行为实验依据

行为实验发现许多物种都能表现出元认知。西方蜜蜂^[49](*Apis mellifera*)、黑蚁^[50](*Lasius niger*)可以通过衡量自己记忆的可靠性对不确定的环境做出相应反应。Watanabe 等^[51]让西丛鸦(*Aphelocoma californica*)观察两名实验员藏食物的过程,第一个实验员面前有 4 个并排的无盖空杯子,可以将食物放到任何一个杯子里;第二个实验员面前的 4 个杯子中有 3 个有盖,只能将食物放在唯一无盖的杯子里。两名实验员同时放食物,西丛鸦必须选择其中一名实验员观察。如果西丛鸦有元认知,那么它们会知道第一个实验员放置食物的位置的不确定性要更高,应更频繁地寻找食物隐藏的信息。结果表明,西丛鸦观察第一个实验员的时间确实更多。灵长类动物中,类人猿^[52](Great ape)、红毛猩猩^[53](*Pongo abelii*)、黑猩猩^[27,54](*Pan troglodytes*)、恒河猴^[55]都表现出了前瞻性和回溯性元认知监测。黑猩猩和红毛猩猩甚至还有更高层次的规划未来的能力^[56]。从进化角度出发,元认知对提高了动物的生存适应性,使动物能够认知自身状态,并据此控制自己的行为,具有重要的生存意义。由此,动物可能进化出元认知能力^[57]。值得注意的是,目前表现出元认知的动物除进化程度较高外,均为群居动物,相较独居动物有更高的社会性。我们推断社会互动带来的信息交换使经验更容易在群体内部传递,动物不需要亲身经历就能学习到大量经验,学习有利于动物发展出包括元认知在内的高级认知^[58]。

2.2.3 元认知模型的量化拟合依据

研究者依据信号检测论建立了相应的量化模型来证明动物元认知的存在^[43]。模型假设恒河猴在视觉密度辨别任务中监测到了不确定性的心理信号,并对刺激连续体设置了稀疏和密集反应的信心标准。模型设定了稀疏-不确定标准(criterion sparse-uncertain, CSU)和稀疏-密集标准(criterion uncertain-dense, CUD)两个自由参数。CSU 是区分连续体左端容易辨别的稀疏刺激与连续体中间困

难刺激的标准, CUD 是区分连续体右端容易辨别的密集刺激与困难刺激的标准。利用这些标准, 恒河猴可以在容易和确定(即高信心)的试次中使用稀疏和密集的反应, 在困难(即低信心)试次中使用不确定反应。该模型良好的拟合了恒河猴在该任务中的表现, 其表现也与人类的行为模式一致。

2.2.4 元认知模型的脑生理依据

人类元认知的关键脑区为前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC), 包括背外侧前额叶皮层^[59](dorsal lateral prefrontal cortex, dlPFC)、额极皮层^[60](frontopolar cortex)、前扣带回^[61](anterior cingulate cortex, ACC)和喙外侧前额叶皮层^[62](rostrolateral prefrontal cortex, rlPFC)等前额叶皮层下属于结构。研究者们也在动物的前额叶皮层区域发现了其元认知功能所对应的生理结构, 且物种进化水平越高, 动物元认知的功能脑区也更加精细复杂。大鼠元认知功能所对应的脑区主要为眶额皮层(orbitofrontal cortex)。Lak 等^[63]使用决策后投注任务研究了大鼠, 发现大鼠眶额皮层的失活会破坏其信心判断的准确性, 但不影响决策的准确性。恒河猴元认知功能所对应的脑区除眶额皮层外, 还包括额极皮层与灵长类所特有的背外侧前额叶皮层。Miyamoto 等^[64]使用 fMRI 技术发现恒河猴额极皮层的激活与元认知判断相关。Tanaka 等^[65]记录了恒河猴执行元认知任务时背外侧前额叶的单个神经元活动, 发现恒河猴的元认知任务表现与背外侧前额叶神经元的放电率相关。Cai 等^[66]采用经颅磁刺激技术(TMS), 结合时间赌注范式(temporal wagering paradigm)探究了恒河猴的元认知计算过程, 发现其元认知信息处理具有不同阶段。背外侧前额叶皮层中 Brodmann 区域 46 d(BA46 d)参与了早期的元认知计算, 且该计算具有高度时间敏感性。这些发现不仅为元认知模型提供了脑生理依据, 在进化程度不同的物种中发现的元认知功能脑区的共性与特性, 也为挖掘元认知的系统发育根源, 绘制人类高级认知功能的进化图谱提供了可能性。

3 未来研究的两种方向

针对目前动物元认知领域中联想模型和元认知模型的争论, 未来可以从改进研究范式来检验元认知模型与创新理论以整合模型两种方向出发进行深入研究。

3.1 改进研究范式来检验动物元认知模型

联想模型和元认知模型各解释了一部分研究结果, 但都存在局限性。未来研究应关注两种对立的解释倾向是否能共存于动物元认知领域。如果倾向于证明元认知模型的有效性, 拒绝联想模型, 研究范式的改进必不可少。在众多证据的汇聚下, 动物拥有元认知能力似乎显而易见, 但联想模型和元认知模型的共存意味着二者之间仍存在模糊地带。共存的主要原因是目前所使用的研究方法混杂了联想学习和元认知两种可能的解释。以常用的不确定性监控范式为例。最早对不确定性监控范式的批判来自任务中可能存在联想性质的奖励线索。动物在按下不确定选项后会得到食物或代币^[67-68], 因此动物选择不确定选项可能只是为了获得奖励, 并非具有元认知能力^[28]。奖励线索的存在使得无法排除动物不确定反应为联想性质这一可能性。研究者将奖励由即时反馈改进为延迟反馈, 阻断了不确定选项和奖励之间的联系, 发现恒河猴在没有奖励的情况下仍能适应性地使用不确定选项^[69]。由此, 进一步确信动物具有元认知。但在一项任务中的成功不足以得出动物具有元认知的结论, 研究者们继续采用多任务与跨领域任务进行研究, 并设定更严格的标准来探究不确定选项的使用^[32, 70]。如 Washburn 等^[32]采用学习系列范式(learning-set paradigm)对恒河猴进行了测试, 该范式以 6 个试次为一个任务集, 每个任务集更换一次任务类型。被试在第一个试次中选择不确定选项的频次比第 2 ~ 6 试次更多, 表明被试在面对新异任务时确实知道自己不知道。被试对新任务作出的快速、灵活的不确定反应削弱了联想模型的解释力, 行为模式更符合元认知模型。另外, 物种间风险厌恶(risk adverse)程度的差别也会掩盖动物元认知的存在。以往研究认为, 恒河猴能够灵活使用不确定反应避免惩罚, 而卷尾猴不具备该能力^[34, 71]。而 Smith 等^[72]研究发现恒河猴和卷尾猴都倾向于选择风险更大的选项, 且都尽量缩短错误反应后的惩罚时间。卷尾猴也能选择性的使用延迟截断反应(delay-truncation response)减少奖励较小时犯错过导致的惩罚时间, 只是其风险厌恶程度更低, 对不确定信号的敏感度较低, 能够承受高风险, 因此做出了更少的不确定性反应。迄今为止, 虽然研究者们屡次改进研究方法, 但仍未完全排除联想模型对动物元认知行为的可能解释^[73]。未来研究若倾向

于证明元认知模型的有效性,收集多方面的实验证据以增强解释力与进一步开发新的实验范式是较为有效的途径。

3.2 创新理论来整合动物元认知模型

值得注意的是,联想模型和元认知模型本质上均为全或无的分类方式,该方式可能使研究者们使用固定的探究路径,对某动物是否具有元认知做出武断的判定。因此,除证明两者之间孰对孰错以外,还可以从二者共存的角度出发开展未来研究。本文参照心理学中自闭症特质连续性 (autism continuum) 将自闭症视为连续谱的观点^[74],将两模型融合,提出了元认知连续体模型 (metacognitive spectrum model)。鉴于社会性和进化程度对动物元认知的重要作用以及二者的相对独立性,连续体模型根据社会性和进化程度两个维度对动物元认知进行描述,认为元认知在动物和人类中普遍存在,只是有不同程度的量化差异。这种量化差异并非由少到多的线性关系,而是进化程度和社会性合并出现在个体身上的复杂性。社会性和进化程度高的动物拥有更接近人类的、复杂的元认知能力,反之则拥有更简单版本的元认知能力。联想模型对元认知的判断标准极其严苛,而元认知模型的判断标准则相对宽松,二者处于元认知连续体的左右端点。连续体模型用同一把尺子衡量动物和人类的元认知,有利于探究人类元认知的早期发展根源,也能更明晰地描述动物元认知。将视野放在更大的发展尺度上,对所谓人类独享的认知机制产生出优越表现的可能性也越小。

参 考 文 献 (References)

- [1] 汪玲, 郭德俊. 元认知的本质与要素 [J]. 心理学报, 2000, 32(4): 458-463.
Wang L, Guo DJ. The nature and components of metacognition [J]. Acta Psychol Sin, 2000, 32(4): 458-463.
- [2] Smith JD. The study of animal metacognition [J]. Trends Cogn Sci, 2009, 13(9): 389-396.
- [3] Nelson TO. Metamemory: A theoretical framework and new findings [M]. Amsterdam: Elsevier; 1990.
- [4] Flavell JH. Metacognition and cognitive monitoring: a new area of cognitive-developmental inquiry [J]. Am Psychol, 1979, 34(10): 906-911.
- [5] Schwartz BL. Sources of information in metamemory: judgments of learning and feelings of knowing [J]. Psychon Bull Rev, 1994, 1(3): 357-375.
- [6] Dunlosky J, Bjork RA. Handbook of metamemory and memory [M]. New York: Psychology Press; 2008.
- [7] Koriat A. How do we know that we know? The accessibility model of the feeling of knowing [J]. Psychol Rev, 1993, 100(4): 609-639.
- [8] Smith JD, Couchman JJ, Beran MJ. Animal metacognition: a tale of two comparative psychologies [J]. J Comp Psychol, 2014, 128(2): 115-131.
- [9] Smith JD, Jackson BN, Church BA. The cognitive architecture of uncertainty [J]. Anim Behav Cogn, 2019, 6(4): 236-246.
- [10] Templer VL. Slow progress with the most widely used animal model: ten years of metacognition research in rats [J]. Anim Behav Cogn, 2019, 6(4): 273-277.
- [11] Liu Y, Su Y, Xu G, et al. When do You know what You know? The emergence of memory monitoring [J]. J Exp Child Psychol, 2018, 166: 34-48.
- [12] Phillips KA, Bales KL, Capitanio JP, et al. Why primate models matter [J]. Am J Primatol, 2014, 76(9): 801-827.
- [13] Nicholson T, Williams DM, Grainger C, et al. Relationships between implicit and explicit uncertainty monitoring and mindreading: evidence from autism spectrum disorder [J]. Conscious Cogn, 2019, 70: 11-24.
- [14] Carruthers P, Williams DM. Model-free metacognition [J]. Cognition, 2022, 225: 105117.
- [15] Couchman JJ, Beran MJ, Coutinho MV, et al. Do actions speak louder than words? A comparative perspective on implicit versus explicit meta-cognition and theory of mind [J]. Br J Dev Psychol, 2012, 30(1): 210-221.
- [16] Smith JD, Beran MJ, Couchman JJ, et al. Animal metacognition: problems and prospects [J]. Comp Cogn Behav Rev, 2009, 4: 40-53.
- [17] Tomasello M. Social cognition and metacognition in great apes: a theory [J]. Anim Cogn, 2023, 26(1): 25-35.
- [18] Premack D, Woodruff G. Does the chimpanzee have a theory of mind? [J]. Behav Brain Sci, 1978, 1(4): 515-526.
- [19] Kornell N, Son LK, Terrace HS. Transfer of metacognitive skills and hint seeking in monkeys [J]. Psychol Sci, 2007, 18(1): 64-71.
- [20] Couchman JJ, Coutinho MV, Beran MJ, et al. Beyond stimulus cues and reinforcement signals: a new approach to animal metacognition [J]. J Comp Psychol, 2010, 124(4): 356-368.
- [21] Foote AL, Crystal JD. "Play it Again": a new method for testing metacognition in animals [J]. Anim Cogn, 2012, 15(2): 187-199.
- [22] Smith JD, Beran MJ, Couchman JJ, et al. The comparative study of metacognition: sharper paradigms, safer inferences [J]. Psychon Bull Rev, 2008, 15(4): 679-691.
- [23] Wills AJ, Edmunds CER, Le Pelley ME, et al. Dissociable learning processes, associative theory, and testimonial reviews: a comment on Smith and Church (2018) [J]. Psychon Bull Rev, 2019, 26(6): 1988-1993.
- [24] Hampton RR. Multiple demonstrations of metacognition in nonhumans: Converging evidence or multiple mechanisms? [J]. Comp Cogn Behav Rev, 2009, 4: 17-28.
- [25] Crystal JD. Comparative approaches to metacognition: prospects,

- problems, and the future [J]. Anim Behav Cogn, 2019, 6(4): 254–261.
- [26] Perdue BM, Evans TA, Beran MJ. Chimpanzees show some evidence of selectively acquiring information by using tools, making inferences, and evaluating possible outcomes [J]. PLoS One, 2018, 13(4): e0193229.
- [27] Allritz M, McEwen ES, Call J. Chimpanzees (Pan troglodytes) show subtle signs of uncertainty when choices are more difficult [J]. Cognition, 2021, 214: 104766.
- [28] Smith JD, Couchman JJ, Beran MJ. The highs and lows of theoretical interpretation in animal-metacognition research [J]. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2012, 367(1594): 1297–1309.
- [29] Dotan D, Meyniel F, Dehaene S. On-line confidence monitoring during decision making [J]. Cognition, 2018, 171: 112–121.
- [30] Questienne L, Atas A, Burle B, et al. Objectifying the subjective: building blocks of metacognitive experiences in conflict tasks [J]. J Exp Psychol Gen, 2018, 147(1): 125–131.
- [31] Beran MJ, Smith JD, Coutinho MV, et al. The psychological organization of “uncertainty” responses and “middle” responses: a dissociation in capuchin monkeys (*Cebus apella*) [J]. J Exp Psychol Anim Behav Process, 2009, 35(3): 371–381.
- [32] Washburn DA, Smith JD, Shields WE. Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) immediately generalize the uncertain response [J]. J Exp Psychol, 2006, 32(2): 185–189.
- [33] Shields WE, Smith JD, Washburn DA. Uncertain responses by humans and Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) in a psychophysical same-different task [J]. J Exp Psychol, 1997, 126(2): 147–164.
- [34] Smith TR, Smith JD, Beran MJ. Not knowing what one knows: a Meaningful failure of metacognition in capuchin monkeys [J]. Animal Behav Cogn, 2018, 5(1): 55–67.
- [35] Marsh HL. Metacognitive-like information seeking in lion-tailed macaques: a generalized search response after all? [J]. Anim Cogn, 2014, 17(6): 1313–1328.
- [36] Lambert ML, Osvath M. Investigating information seeking in ravens (*Corvus corax*) [J]. Anim Cogn, 2020, 23(4): 671–680.
- [37] Roberts WA, Feeney MC, McMillan N, et al. Do pigeons (*Columba livia*) study for a test? [J]. J Exp Psychol, 2009, 35(2): 129–142.
- [38] Iwasaki S, Watanabe S, Fujita K. Pigeons (*Columba livia*) know when they will need hints: prospective metacognition for reference memory? [J]. Anim Cogn, 2018, 21(2): 207–217.
- [39] Joo HR, Liang H, Chung JE, et al. Rats use memory confidence to guide decisions [J]. Curr Biol, 2021, 31(20): 4571–4583.
- [40] Morgan CL. An introduction to comparative psychology [M]. London: Walter Scott Publishing Co; 1894.
- [41] Inman A, Shettleworth SJ. Detecting metamemory in nonverbal subjects: a test with pigeons [J]. J Exp Psychol, 1999, 25(3): 389–395.
- [42] Sutton JE, Shettleworth SJ. Memory without awareness: pigeons do not show metamemory in delayed matching to sample [J]. J Exp Psychol, 2008, 34(2): 266–282.
- [43] Smith JD, Zakrzewski AC, Church BA. Formal models in animal-metacognition research: the problem of interpreting animals' behavior [J]. Psychon Bull Rev, 2016, 23(5): 1341–1353.
- [44] Smith JD, Coutinho MV, Church BA, et al. Executive-attentional uncertainty responses by rhesus macaques (*Macaca mulatta*) [J]. J Exp Psychol Gen, 2013, 142(2): 458–475.
- [45] Carruthers P. Meta-cognition in animals: a skeptical look [J]. Mind Lang, 2008, 23(1): 58–89.
- [46] Buckner C. Morgan's Canon, meet Hume's Dictum: avoiding anthropofabulation in cross-species comparisons [J]. Biol Philos, 2013, 28(5): 853–871.
- [47] Paul EJ, Smith JD, Valentin VV, et al. Neural networks underlying the metacognitive uncertainty response [J]. Cortex, 2015, 71: 306–322.
- [48] Zakrzewski AC, Perdue BM, Beran MJ, et al. Cashing out: the decisional flexibility of uncertainty responses in rhesus macaques (*Macaca mulatta*) and humans (*Homo sapiens*) [J]. J Exp Psychol Anim Learn Cogn, 2014, 40(4): 490–501.
- [49] Perry CJ, Barron AB. Honey bees selectively avoid difficult choices [J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2013, 110(47): 19155–19159.
- [50] Czaczkes TJ, Heinze J. Ants adjust their pheromone deposition to a changing environment and their probability of making errors [J]. Proc Biol Sci, 2015, 282(1810): 20150679.
- [51] Watanabe A, Clayton NS. Hint-seeking behaviour of western scrub-jays in a metacognition task [J]. Anim Cogn, 2016, 19(1): 53–64.
- [52] Bohn M, Allritz M, Call J, et al. Information seeking about tool properties in great apes [J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 10923.
- [53] Mulcahy NJ. Orangutans (*Pongo abelii*) seek information about tool functionality in a metacognition tubes task. [J]. J Comp Psychol, 2016, 130(4): 391–399.
- [54] Beran MJ, Smith JD, Perdue BM. Language-trained chimpanzees (Pan troglodytes) Name what they have seen but look first at what they have not seen [J]. Psychol Sci, 2013, 24(5): 660–666.
- [55] Morgan G, Kornell N, Kornblum T, et al. Retrospective and prospective metacognitive judgments in rhesus macaques (*Macaca mulatta*) [J]. Anim Cogn, 2014, 17(2): 249–257.
- [56] Osvath M, Osvath H. Chimpanzee (Pan troglodytes) and orangutan (*Pongo abelii*) forethought: self-control and pre-experience in the face of future tool use [J]. Anim Cogn, 2008, 11(4): 661–674.
- [57] Hampton RR. Monkey metacognition could generate more insight [J]. Anim Behav Cogn, 2019, 6(4): 230–235.
- [58] Heyes C, Bang D, Shea N, et al. Knowing ourselves together: the cultural origins of metacognition [J]. Trends Cogn Sci, 2020, 24(5): 349–362.
- [59] Yuki S, Nakatani H, Nakai T, et al. Regulation of action

- selection based on metacognition in humans via a ventral and dorsal medial prefrontal cortical network [J]. *Cortex*, 2019, 119: 336–349.
- [60] Qiu L, Su J, Ni Y, et al. The neural system of metacognition accompanying decision-making in the prefrontal cortex [J]. *PLoS Biol*, 2018, 16(4): e2004037.
- [61] Morales J, Lau H, Fleming S. Domain-general and domain-specific patterns of activity supporting metacognition in human prefrontal cortex [J]. *J Neurosci*, 2018, 38: 3534–3546.
- [62] Fleming SM, Huijgen J, Dolan RJ. Prefrontal contributions to metacognition in perceptual decision making [J]. *J Neurosci*, 2012, 32(18): 6117–6125.
- [63] Lak A, Costa GM, Romborg E, et al. Orbitofrontal cortex is required for optimal waiting based on decision confidence [J]. *Neuron*, 2014, 84(1): 190–201.
- [64] Miyamoto K, Setsuie R, Osada T, et al. Reversible silencing of the frontopolar cortex selectively impairs metacognitive judgment on non-experience in Primates [J]. *Neuron*, 2018, 97(4): 980–989.
- [65] Tanaka A, Funahashi S. Persistent activity of prefrontal neurons as a source of confidence in working memory [A]. 2016 Neuroscience Meeting Planner [C]. Barcelona: Society for Neuroscience; 2016.
- [66] Cai Y, Jin Z, Zhai C, et al. Time-sensitive prefrontal involvement in associating confidence with task performance illustrates metacognitive introspection in monkeys [J]. *Commun Biol*, 2022, 5(1): 799.
- [67] Hampton RR. *Rhesus* monkeys know when they remember [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2001, 98(9): 5359–5362.
- [68] Foote AL, Crystal JD. Metacognition in the rat [J]. *Curr Biol*, 2007, 17(6): 551–555.
- [69] Smith JD, Beran MJ, Redford JS, et al. Dissociating uncertainty responses and reinforcement signals in the comparative study of uncertainty monitoring [J]. *J Exp Psychol Gen*, 2006, 135(2): 282.
- [70] Kornell N, Son LK, Terrace HS. Transfer of metacognitive skills and hint seeking in monkeys [J]. *Psychol Sci*, 2007, 18(1): 64–71.
- [71] Basile BM, Hampton RR, Suomi SJ, et al. An assessment of memory awareness in tufted capuchin monkeys (*Cebus apella*) [J]. *Anim Cogn*, 2009, 12(1): 169–180.
- [72] Smith TR, Beran MJ. Outcome expectancy and suboptimal risky choice in nonhuman primates [J]. *Learn Behav*, 2020, 48(3): 301–321.
- [73] Beran MJ, Menzel CR, Parrish AE, et al. Primate cognition: Attention, episodic memory, prospective memory, self-control, and metacognition as examples of cognitive control in nonhuman primates [J]. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*, 2016, 7(5): 294–316.
- [74] 陈静, 马芳, 王庭照. 自闭症谱系量表的理论与临床应用 [J]. *现代特殊教育*, 2020, 6: 72–80.
- Chen J, Ma F, Wang TZ. The oretric research and clinical application of the autism-spectrum quotient [J]. *Mod Special Educ*, 2020, 6: 72–80.

[收稿日期] 2023-02-07