

# 《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：动作如何影响元认知？——基于认知模型和神经机制的探讨

作者：程晓荣 仇式明 定险峰 范昭

## 第一轮

### 审稿人 1 意见：

文章综述了动作对元认知的影响及其可能的认知与神经机制。动作和元认知的关系是元认知研究领域近年来关注的重要问题之一，本文对该领域进行了系统的梳理。以下建议请作者参考。

**意见 1：**把元认知偏差、元认知敏感性、元认知效率，称为“从信心衍生出的其它测量指标”，不太妥当。因为这些指标本身不是被测量出来的，而是基于信心判断的结果和任务表现之间的关系，计算得到的指标。可以考虑使用“元认知判断的特征”、“元认知判断的重要方面”（Fleming & Lau, 2014 使用 two aspects 来表述 sensitivity and bias）或其他作者认为更合适的说法，但不应当称为测量指标。

**回应：**感谢审稿人指出我们不恰当的表述。结合审稿人的建议，我们在修改稿中把“测量指标”改成了“衡量元认知的指标”，并明确说明元认知偏差、元认知敏感性、元认知效率是基于知觉判断和信心评分的关系计算出的指标，以反映元认知判断的不同方面。（见修改稿第 173 行到第 176 行或见下面）。

*修改稿第 173 行到第 176 行：*

元认知判断主要表现为信心判断，即通过按键反应(Fleming et al., 2015)或口头报告(Gajdos et al., 2019)来评估个体对其信心程度的判断。除了原始的信心评分之外，还存在一些衡量元认知的指标，这些指标通过计算知觉判断与信心评分之间的关系得出(请见综述 Fleming & Lau, 2014; Rausch et al., 2023)。

**意见 2：**元认知敏感性(metacognitive sensitivity)的测量指标，除了 meta-d'以外，另一种常用的指标是 Type II ROC 曲线下的面积，具体见 Fleming & Lau, 2014。

**回应：**感谢审稿人的建议。确实，第二类 ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲线下的面积(Area under ROC, AUROC2)大小也是衡量元认知敏感性的指标之一，AUROC2 越大，元认知敏感性越高。结合审稿人的建议，我们在修改稿中增加了对衡量元认知敏感性指标更详细的描述(见修改稿第 176 行到第 188 行或见下面)。

*修改稿第 176 行到第 188 行：*

2.元认知敏感性(metacognition sensitivity)，指被试能够正确区分自己的正确和错误判断的程度，也被称为元认知正确率、第二类敏感性/辨别力。信号检测理论认为，信心判断仅仅依赖于知觉信息，元认知敏感性反映了在进行信心判断时可获得的知觉信息，而不受元认知偏差的影响。元认知敏感性可以由第二类 ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲线下面积(Area under ROC, AUROC2)的大小来衡量，AUROC2 越大，元认知敏感性越高(Fleming & Lau, 2014; Maniscalco & Lau, 2012)。鉴于 AUROC2 的计算容易受到被试在知觉判断任务中表现的影响(Galvin et al., 2003), Maniscalco 和 Lau (2012)提出了一种新的元认知敏感性衡量方法。该方法基于第一类 ROC 和第二类 ROC

之间的紧密关联(Galvin et al., 2003), 在假设被试能够将知觉信息完全用于元认知判断(即理想观察者)的前提下, 通过观测到的第二类反应数据, 反向确定相对应的第一类反应的敏感性指标——记作  $meta-d'$ , 借以衡量实际的元认知敏感性。 $meta-d'$ 与第一类反应的敏感性采用相同单位, 因此可以直接进行比较。

**意见 3:** 183 行, “如果某个被试的  $meta d'$ 和  $d'$ 相等, 则元认知敏感性最大, 元认知效率也最高”, 这个观点仅仅是理论上成立, 是 Maniscalco & Lau, 2012 在提出  $meta-d'/d'$ 这个指标的时候给出的理论假设。但是在实际的研究中, 经常会看到  $Mratio$  大于 1 的情况, 建议说明这一点。

**回应:** 感谢审稿人的建议。 $meta-d'/d' = 1$  这一理想情况的前提假设是个体做出 Type1 和 Type2 判断的信息来源完全一致(Maniscalco & Lau, 2012)。基于信号检测论,  $Mratio$  不会大于 1, 但实际上, 这两种判断的信息来源在很多情况下会存在差异, 许多研究者都在实验中确实发现了  $Mratio < 1$ , 但也有一些研究发现  $Mratio > 1$ 。结合审稿人的建议, 我们在修改稿中增加了对  $Mratio$  大于“1”的情况说明(见修改稿第 188 行到第 197 行或见下面)。

*修改稿第 188 行到第 197 行:*

3. 元认知效率(metacognitive efficiency), 指特定客观任务表现( $d'$ )下的元认知敏感性水平, 通常用  $meta d'/d'$ 来衡量(Fleming & Lau, 2014), 也称为  $Mratio$ 。如果某个被试的  $meta d'$ 和  $d'$ 相等, 则元认知敏感性最大, 元认知效率也最高。从信号检测论观点出发,  $Mratio$  不会大于 1。确实在很多研究中都发现元认知效率低下, 即  $Mratio$  小于 1 (Shekhar & Rahnev, 2021b)。但这两种判断的信息来源在很多情况下会存在差异, 特别是越来越多的研究表明, 元认知证据可能不仅仅依赖于知觉任务的证据(Wokke et al., 2020), 而且在元认知判断和客观任务执行过程中,  $meta-d'$ 和  $d'$ 本身均会受到多个因素的影响。因此, 在实际研究中,  $Mratio$  大于 1 的情况并不罕见(Charles et al., 2020; Faivre et al., 2018)。

**意见 4:** 212 行, “matched-performance / different-confidence” 这个术语的使用不妥。MPDC 指代的是一种特定的现象, 即两种实验条件下的任务成绩是一致的, 但是信心判断的程度不同。这确实能够反应出知觉表现与信心判断所依赖的信息并不完全相同, 但不能代表所有的“任务表现与信心判断依赖信息不相同”的现象。而在章节 3 的第一段描述的研究结果里, 不是都属于 MPDC 的范畴。

**回应:** 感谢审稿人的建议。确实, MPDC 只是部分研究发现的一种特定现象, 并不能代表所有的“任务表现与信心判断依赖的信息不相同”的现象。结合审稿人的建议, 我们在修改稿中重新对 MPDC 进行了描述, 明确指出 MPDC 是一种为“任务表现与信心判断依赖的信息不相同”提供实验证据的特定现象(见修改稿第 226 行到第 233 行或见下面)。

*修改稿第 226 行到第 233 行:*

知觉表现与信心判断之间的信息分离还体现在一种被称为“表现匹配/信心不同”(MPDC, matched-performance/different-confidence)的现象中。MPDC 现象具体表现为, 不同实验条件下的知觉任务成绩相同, 但信心判断的程度却存在显著差异。研究者在以运动点阵(Maniscalco et al., 2020; Rollwage et al., 2020)和视觉光栅(Samaha et al., 2016)等为刺激材料的研究中均发现了显著的 MPDC 现象。MPDC 现象表明, 知觉表现与信心判断所依赖的信息并不完全相同。信心判断不仅依赖于感知觉信息, 还可能受到知觉-运动加工路径中其他因素的影响。导致“表现匹配/信心不同”现象发生的一个可能原因是反应动作为信心提供了额外的证据。

意见 5: 329 行“初级视皮层”应当为初级运动皮层。

回应: 感谢审稿人指出我们错误的表述。结合审稿人的建议, 我们在修改稿中改正了这一错误表述(见修改稿第 348 行到第 349 行或见下面)。

*修改稿第 348 行到第 349 行:*

Palmer 等人(2016)发现在初级运动皮层 M1 上施加连续的 Theta 节律磁刺激, 同样可以改变信心判断。

意见 6: 层级模型和信心的‘噪音’-‘增效’权衡理论, 是否适合作为解释“动作改变元认知”的理论? 因为这两个理论虽然说明了个体的信心判断可能会受到知觉过程以外的信息的影响, 但是并没有说明这个信息究竟是来源于动作, 还是来源于其他方面。同样地, 在后面的神经机制部分, 作者讨论的 Di Gregorio et al., 2022 这项研究也只是说明信心判断依赖的信息和反应过程存在分离, 但并没有确切证明信心判断额外依赖的信息来自于动作。所以, 建议作者对全文当中支持“动作影响元认知”的研究证据和理论观点进行再次梳理, 辨别出哪些研究结论和理论确切支持了信心判断额外依赖的信息就是来源于动作, 而哪些研究结论和理论只是说明信心判断和反应阶段依赖的信息不完全相同但并没有明确指出动作在其中的作用。

回应: 感谢审稿人的建议。(1) 我们根据审稿人的建议对文章中的相关理论和实验证据进行了梳理和思考, 并同意审稿人的意见, 即层级模型和信心的“噪音-增效”权衡理论等决策后模型并非专门针对“动作信息影响元认知”而提出的, 而是针对“知觉外信息影响元认知”进行解释。然而, 由于动作本身就是一种知觉外信息, 后者能够涵盖前者, 因此针对知觉外信息的模型也适用于解释动作信息的影响。为了更加清晰、准确的表达我们的观点, 我们在修改稿中特别进行了如下说明(也见修改稿第 475 行到第 484 行), 即“值得注意的是, 上述某些决策后模型——例如层级模型和信心的‘噪音-增效’权衡理论等——虽然一致认为感知后除了噪音外还可能额外信心证据影响信心判断, 但是并没有对额外信心证据的来源有清晰界定, 这些来源可能不仅仅限于动作信息, 还包括预期(Olawole-Scott & Yon, 2023)、唤醒度(Legrand et al., 2021)、动机(Hoven et al., 2022)等其它因素。这些模型虽然并不专门为‘动作信息影响元认知’提供理论解释, 但是确实能够为‘动作信息影响元认知’提供理论解释。本文介绍的位于知觉决策之后的动作信息改变元认知的诸多实验事实(包括反应速度、动作强度、反应顺序、动作冲突、动作观察等对元认知的影响, 见 Faivre et al., 2020; Fleming et al., 2015; Mazancieux et al., 2023; Palsler et al., 2018; Sanchez et al., 2024; Siedlecka et al., 2021; Wokke et al., 2020), 则为这些模型提供了直接的实验证据。”

(2) 另外, 我们也同意审稿人对于 Di Gregorio 等人(2022)研究的评述, 即该研究仅提供了信心判断依赖的信息和反应过程存在分离的神经证据, 但并没有直接证明信心判断额外依赖的信息来自于动作。但是值得注意的是, 虽然该研究并未直接操纵动作信息, 也未直接证明信心判断所依赖的额外信息来自于动作, 但  $\alpha$  波对信心判断的影响只在刺激呈现之后和信心判断之前这个阶段, 而这个阶段也正是知觉反应阶段, 动作信息不可避免地被纳入, 与知觉信息一起形成元认知。有可能正是因为动作信息的加入,  $\alpha$  调节才能够改变元认知。为了更加清晰、准确的表达我们的观点, 我们在修改稿中明确指出 Di Gregorio 等人的研究并未直接证明信心判断额外依赖的信息来自于动作, 并增加了基于 Di Gregorio 等人的研究结果解释动作影响元认知机制的详细论述(见修改稿第 601 行到第 618 行或见下面)。

*修改稿第 601 行到第 618 行:*

最近的一项研究专门探讨了  $\alpha$  振荡在知觉决策中的作用(Di Gregorio et al., 2022)。他们首先发现刺激呈现之前的  $\alpha$  波的快频率与正确反应相关, 而慢频率与错误反应相关。 $\alpha$  波的波幅则与信心有关; 刺激呈现之后的  $\alpha$  波频率对正确率没有影响, 而低的  $\alpha$  波幅与

高的信心评估和元认知敏感性相关联。此外，他们通过 TMS（经颅磁刺激）调节发现，刺激呈现之前的  $\alpha$  调节只能改变反应敏感性，不能改变元认知表现，而在刺激呈现之后信心判断之前（中间有知觉反应）的  $\alpha$  调节只能改变元认知敏感性，不能改变反应敏感性。他们的研究不仅表明反应和信心是分离的，还为  $\alpha$  波速度和波幅在神经机制上的双分离提供了因果证据。他们认为刺激呈现之前的  $\alpha$  波频率决定了知觉偏差的水平，这个偏差被带入随后对刺激的加工中；而刺激之后的  $\alpha$  波波幅则与前期的感觉证据一起调节信心判断。虽然这个研究中 TMS 对  $\alpha$  波的调节是在枕叶区域，主要目的是调节  $\alpha$  波改变知觉加工，但也说明了  $\alpha$  波对信心判断的决定性作用。虽然 Di Gregorio 等人的研究并未直接证明动作信息被元认知利用，但  $\alpha$  波对信心判断的影响只在刺激呈现之后和信心判断之前这个阶段，而这个阶段也正是知觉反应阶段，动作信息不可避免地被纳入，与知觉信息一起形成元认知。有可能正是因为动作信息的加入， $\alpha$  调节才能够改变元认知。虽然被调节的部位位于枕叶， $\alpha$  波在此的作用很有可能在于抑制无关的知觉信息，但也有可能抑制无关的动作信息或者调节知觉证据与动作信息的整合。在未来的研究中有必要加入刺激呈现和信心判断之间没有知觉反应动作的条件从而进一步验证动作在  $\alpha$  调节所起的作用，也可以通过改变  $\alpha$  调节的脑区从而进一步研究  $\alpha$  波对元认知的作用。

**意见 7:** 642 行，“由于动作反应的速度、强度等信息均能影响该反应的正确可能性，因此更快反应速度、更大反应强度会导致信心增加”。为什么动作反应的速度和强度会影响反应的正确可能性？反应的正确可能性应当依赖知觉过程的信息，而动作反应的信息主要出现在知觉决策之后。

**回应:** 感谢审稿人指出我们不正确的表述。事实上，动作反应的速度和强度影响的是对‘反应正确性的主观评估’，而不是‘反应正确性’；我们在修改稿中对这句话进行了重写（见修改稿第 696 行到第 698 行或见下面）。

*修改稿第 696 行到第 698 行:*

一方面，如果信心反映的是某个决定是正确的可能性，那么由于动作反应的速度、强度等信息均能影响对该反应正确性的主观评估，因此更快的反应速度、更大的反应强度都会导致信心增加。

**意见 8:** 649-650 行，作者提出，可以结合神经科学方法，“探索行为指标上无法区分但具有明显预期差异的两种信心假说的元认知神经对应物”。能否更具体一点指出，两种信心假说在神经机制上可能的差异点在哪里？这种差异对于回答“动作影响元认知”的机制又有什么意义？

**回应:** 感谢审稿人的建议。(1) 通过进一步梳理目前有关元认知神经对应物(neural correlates of metacognition, NCM)的研究，我们发现了两个关键的脑电成分——后部错误正波(posterior error positivity, Pe)和中顶部正波(centro-parietal positivity, CPP)，分别与两种信心假设相关(前者认为信心反映了一个决定是正确的可能性，后者认为信心反映的是赞成某个决定的证据量)。具体讲，Pe 发生在个体做出知觉判断的动作反应后的 200 至 400 毫秒内，其波幅随着参与者对错误判断的信心增加而增大，即被试越坚信自己做出了错误反应，Pe 波幅越大(Boldt & Yeung, 2015; Feuerriegel et al., 2022)，反映了个体能够监控自身做出的知觉判断的正确概率。CPP 也是潜在的元认知神经对应物之一，其波幅随着个体对自己知觉判断的信心增强而增大(Gherman & Philiastides, 2015; Rausch et al., 2020)，被认为是反映了支持所选选项的证据积累程度(Philiastides et al., 2014; Kelly et al., 2021)。CPP 通常被认为发生在知觉刺激呈现后和个体做出知觉判断的动作反应前的这一段时间内。例如，Ko 等人(2024)通过两种方法来确定 CPP 的时间窗口，一种由知觉刺激的呈现时间点决定，即刺激呈现后的 350 至 500

毫秒内；另一种由个体做出动作反应的时间点决定，即做出动作反应前的 130 至 70 毫秒内。但是，有研究者发现在个体做出对知觉判断的动作反应后至个体做出信心判断前的时间窗口内，原本观测到 CPP 的电极点上仍能观察到证据积累的神经反应，这一成分被称之为“选择后 CPP”(post-choice CPP) (Grogan et al., 2023)。综上，信心假设一（信心反映决定的正确性）的神经机制可能与 Pe 相关，而信心假设二（信心反映证据量）可能与 CPP 有关。

(2) 通过将上述的两种 NCM (Pe 和 CPP) 与对动作反应速度(Patel et al., 2012)、动作强度(Gajdos et al., 2019)等动作信息的操纵相结合，研究者可以比较在动作信息操纵的影响下，两个 NCM 与信心评分变化的相关关系，从而给区分两种信心假说提供更多的证据，有助于研究者更有针对性的解释目前动作影响元认知的行为实验的结果。更为重要的是，在确定 NCM 的基础上系统观测随着动作信息的操纵，NCM 变化的具体模式有助于研究者进一步明确动作影响元认知的时间动态。

我们在修改稿中增加了对两种信心假说在神经机制上可能的差异点的论述，以及这种差异如何帮助我们进一步明晰“动作影响元认知”的机制（见修改稿第 701 行到第 726 行或见下面）。

*修改稿第 701 行到第 726 行：*

然而，行为指标无法区别这两种关于信心内容的假说，一个可能的探索方向是通过将神经科学手段与对动作反应速度(Patel et al., 2012)、动作强度(Gajdos et al., 2019)等动作信息的操纵相结合，利用关键神经指标，探索行为指标上无法区分但具有明显预期差异的两种信心假说的元认知神经对应物(neural correlates of metacognition, NCM) (Overhoff et al., 2021)。根据前人研究，两个关键的脑电成分——后部错误正波 (posterior error positivity, Pe)和中顶部正波(centro-parietal positivity, CPP)，有可能分别与上述两种信心假设（一种认为信心反映了一个决定是正确的可能性，另一种认为信心反映的是赞成某个决定的证据量）相关，对两种信心假设进行区分。具体讲，Pe 发生在个体做出知觉判断的动作反应后的 200 至 400 毫秒内，其波幅随着参与者对错误判断的信心增加而增大，即被试越坚信自己做出了错误反应，Pe 波幅越大(Boldt & Yeung, 2015; Feuerriegel et al., 2022)，反映了个体能够监控自身做出的知觉判断的正确概率。CPP 也是潜在的元认知神经对应物之一，其波幅随着个体对自己知觉判断的信心增强而增大(Gherman & Philiastides, 2015; Rausch et al., 2020)，被认为是反映了支持所选选项的证据积累程度(Kelly et al., 2021; Philiastides et al., 2014)，通常被认为发生在知觉刺激呈现后和个体做出知觉判断的动作反应前的这一段时间内。例如，Ko 等人(2024)用两种分析方法确定 CPP 的时间窗口，一种由知觉刺激的呈现时间点决定，即刺激呈现后的 350 至 500 毫秒内；另一种由个体做出动作反应的时间点决定，即做出动作反应前的 130 至 70 毫秒内。但是，有研究者发现在个体做出对知觉判断的动作反应后至个体做出信心判断前的时间窗口内，原本观测到 CPP 的电极点上仍能观察到证据积累的神经反应，这一成分被称之为“选择后 CPP”(post-choice CPP) (Grogan et al., 2023)。因此，信心假设一（信心反映决定的正确性）的神经机制可能与 Pe 相关，而信心假设二（信心反映证据量）可能与 CPP 有关。研究者可以比较在动作信息操纵的影响下，两个 NCM 与信心评分变化的相关关系，从而给区分两种信心假说提供更多的证据，有助于研究者更有针对性的解释目前动作影响元认知的行为实验的结果。更为重要的是，在确定 NCM 的基础上系统观测随着动作信息的操纵，NCM 变化的具体模式有助于研究者进一步明确动作影响元认知的时间动态。总之，只有厘清了信心所真正反映的心理内容，才能更好地解释动作改变元认知的认知与神经机制。

.....

## 审稿人 2 意见:

该论文系统综述了动作对元认知影响的研究进展,整体不错,文献引用比较丰富,具有时效性,对该领域是重要的总结。

**意见 1:** 该综述最大的问题是对动作本身的神经机制介绍很少,在缺乏对动作神经机制的介绍的前提下探讨动作对元认知影响的神经机制,不太具有说服力。动作和感知(action and perception)是一个重要的学科分支,Goodale 和 Milner 1992 对视觉的双通路理论首次详细阐明动作与感知系统之间的差别,建议作者结合双通路理论讨论感知与动作系统的差别,比较知觉决策和动作决策之间的关系,结合动作的神经机制考察动作对元认知影响的神经机制。

**回应:** 感谢审稿人的建议。根据审稿人的建议,我们在修改稿中(见修改稿第 486 行到第 502 行或见下面)增加了对动作系统的介绍,强调知觉系统和动作系统由不同的视觉通路控制但又存在交互,并最终汇集至前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)。这一信息传递的过程为动作影响元认知提供了神经基础。

### *修改稿第 486 行到第 502 行:*

前人研究发现大脑中存在不同的神经通路分别负责控制对外界刺激的感知和实时的动作反应。Goodale 和 Milner (1992)首次提出视觉双通路模型,认为视觉系统内存在两条神经通路,即腹侧通路(ventral stream)和背侧通路(dorsal stream),分别负责个体对外界刺激的视觉感知(例如识别物体的某个特征)与视觉引导的动作反应(例如抓握视野内的某个物体)。两条通路从初级视皮层(primary visual cortex)出发,分别投射到不同的脑区:腹侧通路主要投射到下颞叶皮层(inferotemporal cortex),而背侧通路则投射到后顶叶皮层(posterior parietal cortex) (Milner & Goodale, 1993, 1995),最终两条通路都投射至前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)。研究表明,在目标指引的行为中,个体首先把目标信息在腹侧通路中保持,当目标被选定时,目标信息则在背侧通路中传递从而引导行为动作(Tang et al., 2022)。动作信息包括手的移动速度和移动方向等则可以在额顶神经网络(包括运动皮层和前运动皮层等)中得到加工传递(Archambault et al., 2011)。值得注意的是,研究者指出,腹侧通路和背侧通路并不是完全隔离,而是在信息传递过程中存在交互(Milner, 2017)。Giarrocco 和 Averbeck(2021)通过层次聚类分析法进一步发现,腹侧通路和背侧通路在后扣带回(posterior cingulate)和海马(hippocampus)等脑区发生信息交互和整合后,最终汇集至前额叶皮层。而前额叶皮层正是元认知发生的关键脑区。因此,从腹侧通路传递的知觉信息与背侧通路传递的动作信息都有可能被前额叶皮层加工利用,形成元认知判断,这为动作影响元认知提供了神经基础。

**意见 2:** 由于缺乏对动作系统的介绍和理解,该综述中存在一些不太正确的结论。首先,该综述认为动作信息“介于知觉与元认知之间”。

**回应:** 感谢审稿人指出我们不恰当的表述。在探究动作对元认知影响的研究中,按照时间顺序,动作反应通常发生在刺激呈现(知觉)之后和信心判断(元认知)之前。正是由于动作反应在元认知判断之前发生,动作信息才有可能影响元认知。我们在修改稿中对这句话进行了重写(见修改稿第 402 行到第 404 行或见下面),以更清晰的表达三者发生的顺序关系。

### *修改稿第 402 行到第 404 行:*

根据层级模型,出现在刺激知觉加工之后、元认知判断之前的动作信息以动态方式参与元认知决策,既有可能成为一种元认知证据从而提升后期的元认知决策,也可能成为一种噪音而对元认知决策施加干扰。

**意见 3:** 另外,摘要不够通俗易懂,比如什么是知觉决策,什么是元认知证据和知觉证据?

**回应:** 感谢审稿人的建议。我们对摘要中不够通俗易懂的部分进行了修订(见修改稿第 103 行到第 106 行或见下面),主要减少了专业术语的使用,以及增加了对部分专业术语的解释,以提升摘要的清晰度和可读性。例如,我们将“知觉决策”替换为“对刺激的某个特征(如朝向)进行知觉判断”,在“元认知证据”和“知觉证据”前增加了更加详细的解释:“用于元认知评估的信息(元认知证据)”和“用于知觉判断的信息(知觉证据)”。

*修改稿第 103 行到第 106 行:*

本文认为,动作影响元认知的实验证据表明,在对刺激的某个特征(如朝向)进行知觉判断之后,知觉反应的动作信息仍会影响元认知,这支持了元认知模型中的决策后模型。这些决策后模型认为用于元认知评估的信息(元认知证据)与用于知觉判断的信息(知觉证据)不同但相关,并分别侧重于层级加工、贝叶斯计算、信心增效等方面。

**意见 4:** 另外需要解释什么是阈下动作。

**回应:** 感谢审稿人的建议。我们在修改稿中增加了对“阈下动作”更详细的解释(见修改稿第 277 行到第 282 行或见下面)。

*修改稿第 277 行到第 282 行:*

在 Gajdos 等人的研究中,他们给被试呈现 33ms 时长的一个低对比度光栅,并要求被试用左手和右手的大拇指判断光栅朝向,同时记录被试的大拇指拇短屈肌的肌电。被试做出按键反应前的肌电反映了个体的运动准备活动,由于此时被试还未做出外显的动作反应,因此也被称为阈下动作。通过肌电分析,Gajdos 等人(2019)发现,部分试次的按键反应前存在阈下动作激活;虽然阈下动作激活不影响光栅朝向判断,但是这些试次的信心判断要高于无阈下激活的试次。

---

## 第二轮

**审稿人 1 意见:** 同意发表。

**审稿人 2 意见:** 作者回答了我的大部分问题,只是有一些小的错误需要修改。

**意见 1:** “在目标指引的行为中,个体首先把目标信息在腹侧通路中保持,当目标被选定时,目标信息则在背侧通路中传递从而引导行为动作(Tang et al., 2022)。”这句叙述是有问题的,信息并不是先在腹侧通路后在背侧通路,腹侧和背侧是相对独立的两条平行通路。

**回应:** 感谢审稿人指出我们不恰当的表述。在之前的手稿中,我们确实错误地表述为信息先经过腹侧通路后进入背侧通路。对此,我们在修改稿中已做出调整,以突显腹侧和背侧通路是相对独立的平行通路,不同类型的信息在两条通路中分别加工(见修改稿第 492 行到第 494 行或见下面)。

*修改稿第 492 行到第 494 行:*

进一步的实证研究也表明,在目标导向行为中,目标刺激的视觉特征在腹侧通路中被编码和识别,而与选定目标相关的动作信息则在背侧通路中被加工和计算(Tang et al., 2022)。

**意见 2:** “动作反应通常发生在刺激呈现(知觉)之后”,刺激呈现之后并不等于知觉之后,知觉是感觉的基础上形成的比感觉更复杂而完整的心理体验过程。病人即使没有知觉,也可以完成动作,所以动作不是发生在知觉之后。

**回应:** 感谢审稿人指出我们不恰当的表述。我们的确不应该想当然地预设刺激呈现之后必然

会发生知觉体验，因此我们对相关表述做了调整，删除了将刺激知觉和刺激呈现建立必然联系（见修改稿第 402 行到第 404 行，或见下面）。

*修改稿第 402 行到第 404 行：*

根据层级模型，在刺激呈现后、元认知判断之前的动作信息以动态方式参与元认知决策，既有可能成为一种元认知证据从而提升后期的元认知决策，也可能成为一种噪音而对元认知决策施加干扰。

---

### 第三轮

**编委 1 意见：**同意发表。

**编委 2 意见：**该稿件对动作与元认知之间的关系进行了系统论述，提供了较为丰富的材料，也对未来研究提出了具体展望。具有一定参考价值。然而，内容过于庞大，正文部分就超过了 2 万字。具体而言，有些地方只是详细介绍相关研究内容，而缺少深入分析。如“3 动作改变元认知的实验证据”中，有的一整段只是介绍一项研究。因此，应加强整合，从理论高度概括相应内容，而不是仅拘泥于具体研究。建议修改后发表。

**回应：**感谢编委的建议。根据这些建议，我们将正文从约 21516 字精简至 13781 字。具体的修改主要包括：1) 优化文章结构，删除冗长、冗余或不必要的章节，保留核心信息。例如，删除了“2 知觉元认知研究范式与衡量指标”部分，将相关的元认知研究范式与衡量指标融入其他章节中；2) 整合文章内容（包括正文和摘要），合并信息量较少的内容，避免重复表达，并对过于松散的部分进行了整合，提升文章的逻辑连贯性；3) 优化理论表述，强化了对相关理论的评述和分析，增加了研究内容的深度。对理论进行评述时，突出理论之间的比较，以及不同研究之间的联系和理论意义，使文章框架更加紧凑、聚焦。4) 优化文献叙述方式，减少了单一文献的叙述，避免任何段落只介绍单一研究。例如，将“表现匹配/信心不同”(MPDC, matched-performance/different-confidence)现象的描述进行了高度浓缩，并与其他相关研究融合，不再单独论述。此外，对“3.1 对运动皮层的干扰影响元认知”部分进行了重组，加入了新的研究支持，减少了对单一研究的依赖。

---

**主编意见：**稿件经过多位专家的审阅，作者进行了认真的修改，达到发表水平，同意发表。