

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：反馈通过降低感官噪音和校准知觉-反应映射来优化视知觉（“人工智能基础”专栏）

作者：孙琪

第一轮

责编委：

我快速的浏览了稿件，对稿件的意见与两位外审专家一致。建议作者根据专家审稿意见逐一修改并回复，尤其要阐述清楚研究的意义与创新性。

外审 (给作者的意见)

本研究探讨了反馈在视知觉估计中的计算机制，具有较强的理论前瞻性和科学严谨性。作者成功地将“反馈”这一核心变量引入了“高效编码—贝叶斯解码—感知-动作映射”的级联计算框架，不仅在行为层面上复现了反馈对感知偏差的修正作用，更通过计算建模的方法，精准定位了反馈在信息处理不同阶段的贡献。整体而言，论文逻辑较清晰，模型比较详尽，为理解视觉适应与学习提供了有价值的理论视角。 1、引言部分对“感知-动作映射”阶段受反馈调节的计算必要性论述尚显薄弱。 2、在关于反馈如何降低“感官噪声”的推导部分，缺乏与神经生理学证据的必要关联。建议补充少量关于反馈通路如何调节视觉皮层神经元增益或降低发放变异性的文献，以增强计算模型参数变化的生物学解释力。 3、论文提到参考前人研究确定 40 名被试，但未提供正式的功效分析。

外审 (给作者的意见)

本研究针对感觉过程中，反馈对于感官噪音的编码过程进行了以实验为基础的建模研究。以被试间设计方法，操纵知觉任务后有无真实刺激的反馈，同时对于刺激的范围进行操纵。然后针对上述数据使用了七个贝叶斯推断模型进行分析。结果表明，反馈的影响在于降低感官噪音以及知觉-反应映射关系的调控。

总体而言，这篇论文是一篇以计算视觉为基础的，结合现在主流的高效编码理论和贝叶斯建模的论文。

研究设计合理，建模选择符合试验任务。

具体有如下意见：

- 1、行为实验部分合理。但是有一个关键研究点在于探索“（可供选择的）反应范围”会影响“感觉精度”。这一点我看到引言中大致提到，并有单点论文为支撑证据。问题在于，可选的反应范围都涵盖（大于）了刺激范围，那么如果（亦是实际发现的证据）被试在更大可选范围内精度下降，是否说明本身的噪音极大，即实际感受到的光流刺激实际极为混沌。亦说明，在较小范围内，反应了一定的高级认知功能的调制（而不是目前 Bayesian 建模所涉及的？）。这部分我理解可用高效编码理论来涵盖，但是可能无法全部解释。
- 2、建模部分表述稍显夸张，看似做了 7 个模型。其实本质等于类似 GLM 中的分层回归（即一个一个放入模型的变量，通过类似 AIC、BIC 或者别的方法，比较模型的强度和可解释性）。所以本质测试的模型量有限。
- 3、本研究发现也接近 Sun 等 2025 的结果，请作者说明这是 incremental 的进展，还是全新

进展。这对于评估论文质量和前沿性息息相关。

回应： 感谢编委专家老师和两位审稿人提供的深刻而富有建设性的修改意见。在本次修改中，我们依据审稿人的建议对全文进行了系统修改，并逐条进行了回应。您和审稿人的建议对本研究的质量提升具有重大帮助！万分感谢您和审稿人付出的宝贵时间！祝您春天快乐！

审稿人 1:

本研究探讨了反馈在视知觉估计中的计算机制，具有较强的理论前瞻性和科学严谨性。作者成功地将“反馈”这一核心变量引入了“高效编码—贝叶斯解码—感知-动作映射”的级联计算框架，不仅在行为层面上复现了反馈对感知偏差的修正作用，更通过计算建模的方法，精准定位了反馈在信息处理不同阶段的贡献。整体而言，论文逻辑较清晰，模型比较详尽，为理解视觉适应与学习提供了有价值的理论视角。

回应： 感谢审稿人高质量建设性建议。在本次修改中，我们依据您和另外一位审稿人的建议，对文章进行了修改，希望能回答或解决您提到的问题。再次感谢您的宝贵建议，祝您春天快乐，工作顺利！

1、引言部分对“感知-动作映射”阶段受反馈调节的计算必要性论述尚显薄弱。

回应： 该意见非常具有建设性，突出了本研究在逻辑方面明显的欠缺。针对本建议，我们重点做了如下修改：

- (1) 修改了引言最后一段，解释了计算必要性，具体而言“然而，上述研究大多孤立地考察反馈对单一认知环节的影响，未能在统一的知觉计算框架内比较其相对重要性。更重要的是，Sun 等（2025）的研究揭示了一个关键事实：在无反馈条件下，知觉-反应映射本身是一个高度灵活且可自由缩放的计算环节，其缩放因子 α 直接决定了行为偏差的模式（ $\alpha < 1$ 导致低估， $\alpha > 1$ 导致高估）。这表明，内部知觉表征可能是相对稳定且无偏的，而行为偏差在很大程度上源于知觉向行为输出转换时的不确定性校准。从计算必要性的角度看，提供反馈最直接、最经济的功能应当是校准这个“可变增益”，而非动态重构长期进化形成的自然先验。基于这一理论推论，本研究在 Sun 等（2025）的光流自身运动方向估计任务基础上，构建了七个贝叶斯观察者模型，系统检验反馈是通过降低感官噪声（ κ ）、更新先验整合权重（ w ，还是校准知觉-反应映射（ α ）来优化视知觉。行为结果发现，反应范围效应复现（偏差随反应范围增大而增大），且反馈显著提升了估计精确性；模型比较表明，反馈主要通过降低感官噪声（Varrier et al., 2020；亦见 Treue & Trujillo, 1999）和适应性调整知觉-反应映射增益来改善知觉行为，而先验整合权重不受影响。由此可见，反馈通过同时优化感觉编码与校准知觉-反应映射来精细改善视知觉。”
- (2) 此外，在总讨论的第二段后，增加一段，来 recall 并讨论该必要性，具体而言“本研究的另一个重要理论贡献在于，从计算必要性的角度验证了反馈作用于知觉-反应映射的合理性。在 Sun 等（2025）的级联框架中，知觉-反应映射是一个独立且高度灵活的计算环节。无反馈条件下，观察者缺乏外部基准，只能基于反应范围的物理边界进行主观缩放，导致 α 的自由度很大，从而产生从低估到高估的系统性偏差。提供反馈后，观察者获得了真实方向的绝对参照，此时最经济的校准策略并非重构稳定的自然先验（如正前方偏向），而是直接调整那个将内部知觉“投射”到外部反应

的可变增益 (α)。这一理论推论在本研究中得到了实证支持：模型比较显示，同时包含反馈依赖的 α 和 κ 的模型 (M4) 最优，而涉及先验权重更新 (w) 的模型并未表现出更好的拟合度，且 w 在有无反馈条件下无显著差异。这表明，感觉系统在接收反馈时，优先选择校准行为为输出通路和提升早期编码信噪比，而非修正对环境统计的先验信念。这一发现为理解知觉学习中“反馈驱动哪些过程”提供了清晰的计算边界。”

- (3) 最后，我们在模型方法和结果部分也做了必要说明，来强化计算逻辑、建模清晰度、结果对引言的呼应。

2、在关于反馈如何降低“感官噪声”的推导部分，缺乏与神经生理学证据的必要关联。建议补充少量关于反馈通路如何调节视觉皮层神经元增益或降低发放变异性的文献，以增强计算模型参数变化的生物学解释力。

回应： 感谢审稿人提出这一建设性意见。我们完全同意！将计算模型中的参数变化与神经生理学证据相连接，能够显著增强研究的生物学解释力。根据建议，我们在“总讨论”部分新增了一段专门的论述（第三段），具体修改如下：

- (1) **明确 κ 参数的神经生理学映射：**指出模型中的感官噪声参数 (κ) 可理解为视觉皮层神经元群体活动中的发放变异性或信号增益的倒数。
- (2) **补充关键神经生理学文献：**Varrier et al. (2020): 不可靠反馈会抑制 V1 中朝向解码的神经信号，降低信噪比；可靠反馈则能增强神经反应的可靠性和选择性。Treue & Trujillo (1999) 与 Xue et al. (2017): 注意和任务相关性能够调节高级视觉区（如 MST）神经元的发放增益和变异性。
- (3) **建立理论关联：**基于上述证据，我们提出本研究中提供的反馈相当于一种强化信号，可能通过类似机制——降低皮层神经元的发放变异性（即减少“神经噪声”）或优化群体编码的协同性——来提升感觉编码的精度。因此，计算模型中的 κ 参数变化可视为对这些神经调节过程的行为水平映射。

我们相信，这一补充有效地将计算模型的参数变化与已知的神经调节机制联系起来，增强了全文的理论连贯性和生物学解释力。再次感谢审稿人的细致指导。

讨论部分的第三段内容如下“此外，“反馈降低感觉噪声”这一计算结论也具有明确的神经生理学解释。模型中的感官噪声参数 (κ) 可理解为视觉皮层神经元群体活动中的发放变异性或信号增益的倒数。已有研究表明，视觉反馈能够调节早期视觉皮层的神经活动: Varrier 等 (2020) 发现，不可靠反馈会抑制 V1 中朝向解码的神经信号，降低信噪比；而可靠反馈则可增强神经反应的可靠性和选择性。更一般地，注意和任务相关性已被证明能够调节高级视觉区（如 MST）神经元的发放增益和变异性 (Treue & Trujillo, 1999; Xue et al., 2017)。本研究提供的反馈相当于一种强化信号，可能通过类似的机制——例如降低皮层神经元的发放变异性（即减少“神经噪声”）或优化群体编码的协同性——来提升感觉编码的精度。因此，计算模型中的 κ 参数变化可视为对这些神经调节过程的行为水平映射。”

3、论文提到参考前人研究确定 40 名被试，但未提供正式的功效分析。

回应： 已补充修改被试章节，请见“本研究共招募 40 名在校大学生。所有被试均不了解实验目的，且视力或矫正视力正常。采用 G*Power 3.1.9.7 软件进行先验样本量估计。根据 2

(反馈: 有 vs. 无, 组间) $\times$ 3 (反应范围: 80°、160°、240°, 组内) 的混合实验设计, 本研究关注的核心效应为反馈的组间主效应及其与反应范围的交互作用。根据同类研究(Sun et al., 2025, $N=18$, 无反馈条件), 设定反应范围效应的中等效果量(偏 $\eta^2 = 0.06$, 对应 Cohen's $f = 0.253$), 显著性水平 $\alpha = 0.05$, 统计功效 $1 - \beta = 0.80$, 组间水平数为 2, 组内测量次数为 3, 重复测量间相关系数设为 0.5, 球形假设校正系数 $\epsilon = 1$, 计算得到所需最小总样本量为 34 名被试。为平衡组间设计并预防数据脱落, 本研究最终招募 40 名被试, 随机分为两组: 第一组 20 名(男性 10 名, 女性 10 名, 年龄 18-25 岁)完成无反馈条件; 第二组 20 名(男性 10 名, 女性 10 名, 年龄 18-23 岁)完成有反馈条件。本实验经我校伦理审查委员会批准, 所有被试在实验前均签署知情同意书。”

再次感谢审稿人拨冗审稿!! 提供了富有建设性的修改意见! 万分感谢! 祝您春天愉快!

.....

审稿人 2:

本研究针对感觉过程中, 反馈对于感官噪音的编码过程进行了以实验为基础的建模研究。以被试间设计方法, 操纵知觉任务后有无真实刺激的反馈, 同时对于刺激的范围进行操纵。然后针对上述数据使用了七个贝叶斯推断模型进行分析。结果表明, 反馈的影响在于降低感官噪音以及知觉-反应隐射关系的调控。

总体而言, 这篇论文是一篇以计算视觉为基础的, 结合现在主流的高效编码理论和贝叶斯建模的论文。

研究设计合理, 建模选择符合试验任务。

回应: 感谢审稿人对研究的肯定, 并给予的高质量建设性建议。在本次修改中, 我们依据您和另外一位审稿人的建议, 对文章进行了修改, 希望能回答或解决您提到的问题。再次感谢您的宝贵建议, 祝您春天快乐, 工作顺利!

具体有如下意见:

1、行为实验部分合理。但是有一个关键研究点在于探索“(可供选择的)反应范围”会影响“感觉精度”。这一点我看到引言中大致提到, 并有单点论文为支撑证据。问题在于, 可选的反应范围都涵盖(大于)了刺激范围, 那么如果(亦是实际发现的证据)被试在更大可选范围内精度下降, 是否说明本身的噪音极大, 即实际感受到的光流刺激实际极为混沌。亦说明, 在较小范围内, 反应了一定的高级认知功能的调制(而不是目前 Bayesian 建模所涉及的?)。这部分我理解可用高效编码理论来涵盖, 但是可能无法全部解释。

回应: 感谢审稿人提出这一深刻的理论问题。我们完全理解审稿人的关切: 反应范围增大导致估计变异性增加, 是否暗示着光流刺激本身的内部噪声极大, 以至于被试在宽范围下感受到的刺激“极为混沌”? 以及, 窄范围下表现出的较高精度是否反映了高级认知功能(如策略性收缩、响应校准)的调制, 而不仅仅是贝叶斯建模所描述的低级知觉过程? 我们认真思考了这一问题, 并从以下几个方面进行回应:

第一, 刺激的物理属性和内部噪声在不同反应范围条件下是完全相同的。本研究中, 所有反应范围条件(80°、160°、240°)下的光流刺激完全相同(同一种子、同一点阵、同一运动速度和方向), 因此“实际感受到的光流刺激”的混沌程度(即外部噪声和内部噪声的固有水平)在条件间是恒定的。如果变异性增大仅仅是由于刺激本身混沌, 那么 80°条件下也应该出现同样高的变异性——然而事实并非如此(图 3b 可见 80°范围下标准差远小于 240°范围)。因此, 反应范围导致的变异性增加不能归因于刺激噪声水平的变化, 而是反映了从知觉到反应输出阶段的可变增益(即知觉-反应映射缩放)的影响。

第二, 高效编码-贝叶斯模型通过“知觉-反应映射”这一参数化环节, 恰好能够解释这种

范围依赖的行为变化。 Sun 等（2025）和本研究的模型一致表明：缩放因子 α 随反应范围增大而线性增大，将内部相对稳定的知觉估计投射到更宽的外部响应尺度上，从而放大了估计偏差和变异性。这一解释是简约的（仅增加一个参数 α ），且能够定量拟合个体数据（本研究中模型拟合 $R^2 > 0.96$ ）。审稿人提到的“高级认知功能的调制”，如果存在，其净效应也会体现在 α 参数的变化上——例如被试可能在窄范围下有意识地压缩响应范围（一种策略性收缩），这实际上已经被 $\alpha < 1$ 所捕捉。

第三，窄范围下的较高精度并不必然要求预设额外的高级认知过程。 在窄范围（80°）条件下，受限于物理响应边界，被试无法大幅外推其估计，因此知觉-反应映射的缩放因子 α 自动小于 1，导致压缩偏向（低估）和较小的变异性。这种压缩发生在知觉到动作的转换阶段，而非必须依靠主动的策略性注意分配。当然，我们并不排除被试在一定程度上使用了高级认知资源（如主动校准响应规则），但这些行为效应已经被当前模型中的 α 参数吸收，且不需要引入额外的认知模块。高效编码理论结合贝叶斯推断提供了一个无需求助于自由意志或显性策略的规范性解释。

第四，未来研究可以进一步分离“知觉-反应映射”与“高级认知调制”。 我们同意审稿人的见解，即可能存在高级认知因素（如决策标准、风险偏好、反应信心等）与反应范围产生交互。事实上，在我们团队正在进行的工作中，已经尝试通过操纵反应延迟、反馈类型以及指示语来考察这些因素。初步结果表明，知觉-反应映射的缩放效应即使在高度自动化条件下仍然存在，而高级认知因素更多影响的是反应的起始点或反应时间，而非偏差模式。这些发现将进一步支持映射阶段是一个相对独立且自动化的计算环节。

我们在总讨论的倒数第二段中补充了该论述“此外，本研究中反应范围效应主要通过知觉-反应映射的线性缩放得到定量解释。然而，我们注意到，在更宽的反应范围下，估计变异性的增加虽然可以用缩放因子 α 的增大来拟合，但并不排除高级认知过程（如响应策略的主动调整、信心校准或注意力分配）的潜在贡献。未来研究可通过独立操纵反应范围与认知负荷，或分别操纵反应范围与刺激不确定性，进一步分离映射缩放与高级认知调制对知觉行为的相对贡献。”

总之，我们认为，高效编码约束的贝叶斯模型——特别是引入了知觉-反应映射线性缩放环节——已经能够很好地解释反应范围依赖的精度变化，而不需要额外的高级认知模块。您提出的“刺激混沌”解释与实验控制不符（刺激相同）；而“高级认知调制”虽然可能存在，但当前模型已通过参数 α 将其吸收，未来研究可进一步分解两者的贡献。感谢审稿人的深刻评论，这有助于我们更清晰地界定模型的适用范围。

2、建模部分表述稍显夸张，看似做了 7 个模型。其实本质等于类似 GLM 中的分层回归（即一个一个放入模型的变量，通过类似 AIC、BIC 或者别的方法，比较模型的强度和可解释性）。所以本质测试的模型量有限。

回应： 非常严谨的建议！我们理解审稿人可能认为七个模型本质类似于 GLM 中的分层回归（逐步放入变量）。实际上，M1 至 M4 确实构成参数递增的嵌套序列，用以检验反馈是否依次影响映射缩放(α)、感官噪声(κ)和先验权重(w)。然而，M5 至 M7 并非 M4 的简单参数扩展：M5 和 M6 将实验先验的边界(b)设为自由参数，考察先验范围是否受反馈调节；M7 则完全改变了先验形式（用截断自然先验替代加权整合先验），代表了一种替代性的理论假设。这些模型之间的比较，不是简单的参数增减检验，而是不同理论机制的竞争。为避免读者产生类似误解，我们在建模部分增加一段，明确指出各模型的理论假设及其关系。同时，我们认同审稿人关于“表述不宜夸张”的建议，已将“构建了七个贝叶斯推断模型”等措辞调整为“基于不同理论假设构建了七个备择模型”。感谢您的指正。

具体段落内容如下“为探究反馈如何调节朝向知觉，特别是基于引言中提出的计算必要

性分析（反馈最可能校准灵活可变的知觉-反应映射，而非更新稳定的先验），构建了七个备择模型。”

“总之，我们通过上述七个递进的备择模型，以精确识别反馈作用的计算环节。需要说明的是，上述七个模型并非简单的参数递增序列，而是代表了关于反馈作用靶点的不同理论假设。其中，M1 至 M4 构成一组嵌套模型，依次增加反馈对知觉-反应映射缩放因子 (α)、感官噪声 (κ) 和先验权重 (w) 的调节作用。M5 和 M6 则在 M3 和 M4 的基础上，进一步考察实验先验的边界 (b) 是否也受反馈调节——这涉及先验分布形式的改变，与 M4 并非单纯的参数嵌套关系。M7 则提出一种替代性假设：反馈可能促使感觉系统直接截断自然先验的尾部（剔除 $\pm 40^\circ$ 以外的朝向），而非采用加权整合策略。通过比较这七个模型在解释行为数据上的优劣，我们旨在判定哪种理论假设最能解释反馈效应的计算机制——是降低噪声 (κ)、更新先验 (w/b)，还是校准映射 (α)。”

希望内容能在一定程度上解答您的建议！万分感谢！

3、本研究发现也接近 Sun 等 2025 的结果，请作者说明这是 incremental 的进展，还是全新进展。这对于评估论文质量和前沿性息息相关。

回应： Excellent comment! 我们在总讨论增加了一段（第四段），来强化本研究 with Sun et al. (2025) 的关联，具体可请见总讨论的第四段“需要明确指出，本研究在实验范式与基础模型上直接继承了 Sun 等（2025）的工作，但并非简单增量复制。首先，本研究首次将反馈变量引入其级联框架，将模型解释范围从“开环知觉”拓展到“闭环知觉学习”场景。其次，通过操纵反馈有无结合多模型比较，本研究首次在计算层面分离了感官噪声、先验权重和映射缩放对反馈的差异化响应，尤其发现反馈不影响先验整合这一反直觉结果。最后，本研究不仅证实了 Sun 等（2025）关于“反馈可快速重新校准”的推测，更精确揭示了重新校准的计算靶点是映射增益和感官噪声而非先验。因此，本研究是在继承其理论骨架基础上的实质性理论跃迁。”

随后，通过三段来具体解释当前与 Sun et al. (2025) 在具体细节上的关联。再次感谢您的建议！！

再次感谢审稿人拨冗审稿！！提供了富有建设性的修改意见！万分感谢！祝您春天愉快！

第二轮

审稿人 1 意见：

作者已经认真修改了之前的提问，我这没有进一步的问题。

审稿人 2 意见：

在这篇论文中，作者很好的地阐述了“高效编码 - 贝叶斯 - 知觉/反应”三级联计算框架，从计算机制层面系统考察了反馈如何影响并优化视知觉。总体撰写准确，理论有一定深度，在计算视觉角度有充分的意义，也有明显的理论领先性。

尤其是最后的算建模方面，作者基于不同的理论假设构建了七个贝叶斯观察者模型，在参数增加的基础上，系统性探索反馈作用靶点的竞争性理论机制的意义，有很强的建模推广意义。

在这次修改中，我个人认为我提出的问题均得到了妥善的回答和修改。

整体来看，这是一篇理论框架完整、计算建模深入、论证逻辑自洽的计算视觉研究。它在继承前人理论骨架的基础上完成了实质性的理论提升，将级联框架的解释范围从开环知觉拓展到了闭环知觉学习场景，对本期刊的定位来说是相当契合的。

编委意见：建议录用发表。

主编 1 意见：

稿子可以发，还需要小修，文字上规范一些，比如摘要，最后都没有结论，请补充

回应：

万分感谢您拨冗审阅，对文章的支持！

本次修改，我们对摘要进行了重新打磨，补充了结论，详见“视知觉的系统性偏差可由“高效编码—贝叶斯解码—知觉-反应映射”级联计算框架解释。然而，该框架主要基于无反馈条件下的开环知觉构建。反馈作为知觉学习的核心要素，其在此级联过程中的计算靶点尚不明确。本研究采用 2 （反馈：有/无，组间） $\times 3$ （反应范围： 80° 、 160° 、 240° ，组内）混合实验设计，结合七种备择贝叶斯观测者模型，系统检验反馈对感官噪声(κ)、先验整合权重(w)及映射缩放因子(α)的调节。行为结果显示，反馈显著削弱了宽反应范围下的高估偏差并降低了估计变异性。模型比较筛选出最优模型，其参数揭示反馈显著提高了感官编码精度 (κ 增大) 并降低了映射增益 (α 减小)，但先验整合权重 (w) 无显著变化。结论表明，反馈通过降低感觉编码噪声与校准知觉-反应映射增益双重机制优化视知觉，而非更新先验信念；该发现从计算层面支持了先验构建与反馈驱动调节的可分离性，并将开环知觉框架成功拓展至闭环学习场景。”

此外，我们对引言和总讨论的收尾段也进行了打磨修订，让其与讨论进行呼应，提升文章论证的严谨性，

引言请见：“……基于这一理论推论，本研究在 Sun 等人 (2025) 的光流自身运动方向估计任务基础上，构建了七个备择贝叶斯观察者模型，旨在分离并检验三种核心的竞争性计算假设：即反馈是通过降低感官噪声 (κ)、更新先验整合权重 (w)，还是校准知觉-反应映射增

益 (α) 来优化视知觉。行为结果复现了反应范围效应（偏差随反应范围增大而增大），并揭示反馈显著提升了估计精确性；通过多模型比较，研究发现反馈主要通过降低感官噪声 (Varrier et al., 2020; 亦见 Treue & Trujillo, 1999) 和适应性减小知觉-反应映射增益来改善知觉行为，而先验整合权重不受反馈调节。由此可见，反馈通过同时优化感觉编码与校准知觉-反应映射这两条路径来精细改善视知觉，而非依赖于对先验信念的更新。”

总讨论请见：“总之，本研究不仅成功复现 Sun 等（2025）反应范围效应，更关键的是，将反馈作为关键变量嵌入“编码—解码—映射”的统一知觉计算框架，揭示了其通过降低感觉编码噪声和校准知觉-反应映射增益来优化视知觉的“节俭计算”策略。尤为重要的是，本研究发现反馈并动态调节先验权重，表明知觉系统在面对外部误差信号时，优先选择对感觉输入和动作输出环节进行在线校准，而非重构由进化与长期经验塑造的稳定长时先验。这一“先验保守性”与“编码/映射灵活性”的计算分离，打破了传统知觉学习中“反馈必然更新内部模型（先验）”的隐含预设，为理解闭环知觉适应过程提供了全新的理论边界。它提示，生物体在动态变化的复杂环境中，可能通过一种按需分配计算资源的原则来实现高效、稳健的适应性学习。未来研究可进一步结合脑成像技术，探索这一计算分离的神经层级特征，并将该理论框架延展至脑机接口、运动康复训练及具备实时反馈机制的类脑智能系统构建中，以验证其在不同复杂度任务中的普适性。”

最后，我们也对文章的其他位置进行了小修。感谢您的指正！

祝您夏天安康！

主编 2 意见：同意发表。