

## 修改说明

非常感谢两位审稿专家提出的中肯建议。我们根据建议对文章进行了相应的修改，并用红色在文中进行标注，其他改动用绿色标注，以便专家和编辑部复审。修改说明中的蓝色字体为修改后内容的摘抄。

### 审稿专家 1

本稿件综述了认知控制与瞳孔反应的关系及其脑机制，具有一定的创新性，但是还存在以下几个方面还需要进一步考虑：

1、瞳孔反应是一种比较复杂的视觉反应，瞳孔变化中，既包括瞳孔对外界环境光线变化的反应，也包括认知任务引起的瞳孔变化，也许还有一些情绪反应，比如对外界信息的兴趣变化反应。因此，在探讨认知控制与瞳孔反应的关系的时候，建议作者补充一些内容，对这些相关因素进行叙述。

回复：感谢专家的建议，我们在“引言”部分补充了一些内容，简要介绍了引起瞳孔反应的因素。修改后内容为：

“……随后的研究发现，除了亮度以及对视觉信息的注意、加工所引起的瞳孔光反应（pupil light response）和视物距离改变引起的瞳孔近反应（pupil near response）外，瞳孔大小还受到唤醒、心理努力和认知负荷的影响，产生心理感觉瞳孔反应（psychosensory pupil response）（Mathôt, 2018）。认知控制的瞳孔测量研究关注了后者，即由任务或刺激引发心理加工随之产生的瞳孔变化。”（见正文第 1 页 12-16 行）

2、在综述相关研究文献的时候，建议增加对研究核心操作的叙述，以此体现对瞳孔反应记录和认知任务之间的严谨性。

回复：感谢专家的中肯建议，我们之前仅考虑了前人研究结论对后续研究的参考意义，忽略了核心操作对后续研究的指导价值。根据建议，我们在“1 瞳孔反应的测量指标”中增加了计算 TEPR 时校正基线的选择、TEPR 指标的含义、分析时窗的选择、测量瞳孔反应时的注意事项等方面的内容，修改后内容为：

“……由于试次前基线校正更容易消除试次间的随机波动对瞳孔大小的影响（Mathôt, 2018），认知控制的瞳孔测量研究一般使用刺激前 200-500 ms 时窗中的平均瞳孔大小作为校正基线。TEPR 包括瞳孔的扩张和收缩，但认知过程主要与瞳孔扩张有关（Peinkhofer et al., 2019），常用指标有平均瞳孔扩张、扩张峰值、峰值潜伏期（Beatty & Lucero-Wagoner, 2000）。平均瞳孔扩张是分析时窗中瞳孔扩张的平均值；扩张峰值是该时窗中的瞳孔扩张最大值；峰值潜伏期是从特定事件开始，如刺激呈现，到出现瞳孔扩张峰值的时间。也有研究者使用瞳孔大小的动态变化指标，如分析时窗内瞳孔变化的斜率，或直接分析瞳孔变化轨迹，利用连续测量信号中的所有可用信息（van Rij et al., 2019）。具体的分析时窗可以选择从特定事件开始至试次结束的整个时窗（Laeng et al., 2011; Zekveld et al., 2020），也可以选择 TEPR 条件差异最大的 500-1000 ms 时窗（da Silva Castanheira et al., 2021; Rondeel et al., 2015）。

为避免无关因素的影响，在测定瞳孔反应时需要保持实验环境和实验材料的亮度一致，注视点或实验材料需置于屏幕中央。在瞳孔数据采集期间，要求被试始终注视屏幕中央，并

建议使用固定装置（如下颌托架）减少头部运动、保持注视距离恒定。”（见正文第 1 页 28 行-第 2 页 12 行）

在“3.2 不同认知控制任务中的任务诱发瞳孔反应”中区分了线索与目标刺激同时呈现和先后呈现时的研究结果。修改后内容为：

“在线索任务切换中，当线索与目标刺激同时呈现时，任务切换引起的 TEPR 显著大于任务重复（da Silva Castanheira et al., 2021; Isabella et al., 2019; Rondeel et al., 2015）；当线索提前 1500 ms 呈现，并且在目标刺激呈现后继续保留，任务切换的 TEPR 大于任务重复，但这一差异仅出现在目标刺激呈现后时窗（Yanaoka et al., 2021）。”（见正文第 4 页 9-12 行）

3、在“2 基线瞳孔大小与认知控制”部分，下面两个二级主题分别是工作记忆容量和认知控制任务表现，这两个二级主题不是认识控制的核心内容。

回复：感谢专家的中肯建议，根据您的建议，我们从认知灵活性（切换）、抑制和工作记忆更新三方面对相关研究进行综述。由于我们未能检索到基线瞳孔大小与工作记忆更新的相关研究，鉴于工作记忆容量（working memory capacity, WMC）与认知控制具有正相关（Unsworth & Robison, 2017），且工作记忆更新的任务成绩与 WMC 的复杂广度任务（complex span tasks）成绩具有较高的正相关（Wilhelm et al., 2013），我们在综述工作记忆更新相关研究时保留并精炼了 WMC 与基线瞳孔大小的相关研究。修改后内容为：

“一些研究关注了基线瞳孔大小与认知控制的关系。在考察认知灵活性的威斯康辛卡片分类任务（Wisconsin card sorting task, WCST）和内/外维度集转换任务（intra/extradimensional set shifting task, IEDT）中，被试需要通过试错学习掌握周期性变化的任务规则。研究发现，这两项任务中被试的试次前基线瞳孔大小在规则改变的探索阶段增加，而在规则应用阶段减少，这意味着规则转换过程中试次前基线瞳孔大小的变化是规则探索的有力指标；而且在 IEDT 中，被试的实验前基线瞳孔大小与特定阶段的错误率负相关，该阶段注意力必须转移到先前未注意的刺激特征上（Pajkossy et al., 2017, 2018）。这些证据表明个体的基线瞳孔大小与认知灵活性有关。

在考察抑制控制的 Stroop 和反眼跳任务中，任务成绩与试次前基线瞳孔大小或实验前基线瞳孔大小均无显著相关（da Silva Castanheira et al., 2021; Unsworth & Robison, 2017b; Unsworth et al., 2019），但也有研究发现反眼跳的任务成绩与实验前基线瞳孔大小正相关（Tsukahara & Engle, 2021）。

目前尚未见研究直接考察基线瞳孔大小与工作记忆更新的个体差异的关系。一些研究关注了工作记忆容量（working memory capacity, WMC）与基线瞳孔大小的关系，其结论不尽相同。有的研究发现基线瞳孔大小与 WMC 正相关（Tsukahara & Engle, 2021; Tsukahara et al., 2016），而另一些则发现两者无关（Aminihajibashi et al., 2020; Unsworth et al., 2021a; Unsworth et al., 2019）。

总体而言，基线瞳孔大小与认知控制的相关研究较少，且结论并不一致。研究结论的差异可能来源于认知任务、基线、照明以及刺激亮度等实验操作方面的不同（陆润豪等，2021; Tsukahara & Engle, 2021）。年龄、性别、种族等混淆变量也可能影响基线瞳孔大小与认知控制的关系（Unsworth et al., 2021b）。因此，目前尚无确切证据显示基线瞳孔大小与认知控制个体差异具有线性相关。”（见正文第 2 页 14 行-第 3 页 7 行）

Unsworth, N., & Robison, M. K. (2017). The importance of arousal for variation in working memory capacity and attention control: A latent variable pupillometry study. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 43(12), 1962-1987.

Wilhelm, O., Hildebrandt, A., & Oberauer, K. (2013). What is working memory capacity, and how can we measure it? *Frontiers in Psychology*, 4, 433.

#### 4、题目“TEPR 与认知控制”的英文建议改为中文。

**回复：**已按建议将相应标题修改为“3 任务诱发瞳孔反应与认知控制、3.1 任务诱发瞳孔反应反映认知努力、3.2 不同认知控制任务中的任务诱发瞳孔反应、3.3 任务诱发瞳孔反应与认知控制的个体差异”。

5、展望中，建议聚焦本文的主题“认知控制的瞳孔反应”展开，从认知控制的不同方面进行展望。

**回复：**感谢您的建议。根据建议，我们增加了利用 TEPR 揭示不同认知控制加工的时间动力过程、考察多重认知控制任务中 TEPR 指示认知努力的有效性和灵敏性、探讨认知控制个体差异与 TEPR 的关系等方面的内容，并对原有内容进行了删减和重新组织。修改后内容为：

“首先，基线瞳孔大小对认知控制个体差异的反映有待进一步研究。至今，此类研究较少，且主要采用非经典的认知控制任务，得出的结论也不一致。由于基线瞳孔大小被认为反映了 LC-NE 系统基音活动的水平(Aston-Jones & Cohen, 2005)，而 LC-NE 基音活动与 WMC 成倒 U 型关系(Unsworth & Robison, 2017a)，因此基线瞳孔大小有可能与认知控制存在类似的非线性相关，即具有中等水平基线瞳孔大小的个体其认知控制更强，而基线瞳孔较大和较小的个体其认知控制更差。今后需要在考虑混淆因素和非线性相关的基础上系统考察基线瞳孔大小与认知控制的关系。此外，一些研究发现是基线瞳孔大小的变异性（标准差或变异系数）而非平均值与 WMC 和抑制控制（反眼跳、Stroop）的任务成绩相关(Aminihajbashi et al., 2019; Unsworth & Robison, 2017b)，后续研究须关注基线瞳孔大小的变异性与认知控制个体差异的关系。

第二，TEPR 能够以一定的时间精确度跟踪认知努力相关的大脑活动变化(Joshi & Gold, 2020)，有助于研究者辨别不同认知控制加工的开始和衰减。例如，Hershman 等(2021)利用连续记录的 TEPR 揭示了颜色词 Stroop 任务中，先出现词义与书写颜色矛盾造成的信息冲突，后出现自发单词阅读与颜色命名竞争造成的任务冲突。后续研究可以利用 TEPR 揭示不同认知控制加工的时间动力过程，比如分离刺激呈现前由线索切换引起的任务设置重构代价和刺激呈现后产生的任务设置干扰代价(da Silva Castanheira et al., 2021)。已有研究仅考察了单一认知控制中的 TEPR，后续研究还可以在同一任务中操纵多种认知控制加工，考察复杂认知控制任务中 TEPR 指示认知努力的有效性和灵敏性。此外，关于 TEPR 与认知控制个体差异的研究较少，后续研究可以进一步探讨控制成本、加工速度等认知控制的个体差异与 TEPR 的关系。

第三，多技术融合，探究 LC-NE 在不同认知控制加工中的作用，进一步揭示认知控制的皮层下脑机制。已有研究结合瞳孔测量和脑电技术揭示了 LC-NE 系统在任务切换和抑制

控制加工中的调节机制，LC-NE 在工作记忆更新中的作用机制还有待研究揭示。TEPR 相对于 EEG 数据的滞后可能会限制该方法的应用，不同生理测量技术之间如何更好地融合是未来值得探究的问题。除了多生理技术的融合外，后续研究还可以利用机器学习技术分解由信息加工的不同成分引起的 TEPR，在非侵入的情况下探索认知加工不同阶段的神经回路激活（Schriver et al., 2020）。

最后，将最新的瞳孔测量研究成果应用于实践领域。瞳孔反应对认知努力敏感，瞳孔测量也不会干扰个体正在进行的任务。因此，可以利用瞳孔指标监测个体在学习、工作或驾驶过程中的认知努力，动态调整任务难度或提醒个体休息，提高学习效果和工作绩效，避免疲劳造成安全事故。另外，TEPR 可以反映老龄化以及一些疾病导致的认知控制功能变化（de Vries et al., 2021; Jiménez et al., 2021; Marandi & Gazerani, 2019），后续研究可采用低成本的瞳孔测量检测认知控制功能缺陷，跟踪疾病发展和治疗效果。”（见正文第 7 页 27 行-第 9 页 2 行）

## 审稿专家 2

本文结构清晰，论点独特明确，参考文献较新。正文虽然有与前人综述交叉的内容，但是相关文献综述可以成为本文论点的良好支撑。需要修改的地方在于：p7“综上所述，认知控制能力的个体差异不仅在于付出认知努力的多少，还在于对努力的使用效率。其内在机制可能是 LC-NE 系统功能的差异”如何能得出是“内在机制可能是 LC-NE 系统功能的差异”？这一段之前没有很好的铺垫，这一段之后也没有马上对这个论点进行论述，因此这个结论看起来非常突兀。建议适当修改上下文结构和加入一些承上启下的句子，让文章看起来更流畅，论点更可靠。

**回复：**感谢专家的细致审阅，我们此处确实缺少过渡。根据您的意见，我们将此段后半句“其内在机制可能是 LC-NE 系统功能的差异”移动到“4.2 认知控制与瞳孔反应的神经科学相关”中，在论述了 LC-NE 系统在认知控制加工中具有重要作用后，再指出“认知控制的个体差异很可能与 LC-NE 系统功能的差异有关”。（见正文第 7 页 11-13 行）

此外，我们将原来那一段修改为如下内容：

综上所述，认知控制能力的个体差异不仅在于付出认知努力的多少，还在于对认知努力的使用效率。这些差异都可能反映在 TEPR 上，下文将从瞳孔反应脑机制的角度阐述引起这些个体差异的内在机制。（见正文第 5 页 6-8 行）

