

《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：昼夜节律对认知功能的特异性调控

作者：闫凯凯，郭博文，陈星，毛天欣，饶恒毅

第一轮

审稿人 1 意见：

《昼夜节律对认知功能的特异性调控》围绕昼夜节律对认知功能的影响，汇集了跨范式、跨模态的研究结果，试图探讨节律效应在不同认知功能上的异同及其神经机制，选题具有一定科学价值和应用价值，作者收集的资料也较为丰富。然而，从系统综述的标准来看，全文尚未形成清晰的问题导向或理论驱动的主线，也未建立能够解释“昼夜节律的特异性调控”这一核心论题的综述框架，一些关键概念界定不明，证据组织过程存在大量“只述不论”的问题，导致本文的结构逻辑松散，在机制阐述的严谨性和理论贡献方面尚显不足。

回应：

非常感谢审稿人对本文所提出的建设性意见。我们认真研读后认为，审稿人所指出的核心问题是：原稿虽汇集了大量跨范式、跨模态研究证据，但未能围绕一个清晰的理论问题构建解释性框架，导致不同层面的证据并列堆叠，未能有效回答“不同内在机制驱动的昼夜节律如何调控不同认知功能”这一科学问题。基于这一认识，本轮修改的重点不是简单的补充文献或调整章节顺序，而是围绕上述核心问题，系统重构全文的论述主线、概念界定与证据组织方式，分别从生理基础、行为表现和神经证据三个方面，阐述昼夜节律调控不同认知功能的具体机制。下面我们将针对审稿人提出的各条具体意见，逐一说明相应的修改内容。

意见 1：

在自检报告中，作者表明本文“旨在系统阐明不同内在机制驱动的昼夜节律如何差异化调控认知功能”，但全文按分块式的框架组织信息，缺乏“问题导向”、“逐层递进”式的综述主线。第 2 节(概念及生理机制)、第 3 节(行为表现)、第 4 节(神经机制)本应相互支撑，共同回答标题中的“特异性调控”是什么、源于什么，但三者呈现并列孤立的关系：第 2 节用教科书式的论述介绍了昼夜节律产生的“分子时钟—中央时钟—激素”系统，第 3 节罗列了以往研究发现的不同认知任务表现的日间峰/谷时段，却未将节律效应的现象级差异与对应的神经生理机制做关联性探讨；第 4 节讨论觉醒系统、丘脑、边缘系统的节律现象，但没有解释这些脑机制上的节律效应其如何映射到不同类型认知功能的节律差异。

回应：

感谢审稿人对全文综述主线提出的关键性意见。我们认同原稿在结构上偏向分块式呈现，生理机制、行为表现与神经证据之间的关联不足，未能形成围绕“昼夜节律如何差异化调控认知功能”的问题导向型论述主线。针对这一问题，我们在修订中对第 2-4 节的整体逻辑进行了系统性调整，使其围绕不同内在机制如何导致认知节律差异逐层展开，而非并列呈现。具体修改包括：

第一，在第 2 节生理机制部分，避免了教科书式的罗列。在介绍分子时钟、中枢时钟与内分泌系统后，在第 2.2.3 节末尾增加了论述，我们指出，SCN 既可通过直接神经投射快速调节皮层下觉醒系统，也可通过调控褪黑素、皮质醇等激素的节律分泌，将时间信号广泛传递至特定脑区。从而为后文区分“一般性觉醒调控”与“功能特异性调节”提供机制框架(p.5)；

第二，在第 3 节行为表现中，我们按照审稿人的建议，将节律性行为模式与潜在调控路径进行整合分析。具体而言，我们首先在 3.1 与 3.2 节中分别总结了广义与狭义昼夜节律对不同认知功能的影响，然后在 3.3 小结中，进一步归纳出：无论是广义还是狭义昼夜节律研究，均显示出一致的“晨低晚高”模式，同时不同认知功能在峰值相位和敏感性上存在差异。这两种模式可能分别对应“一般性的觉醒调控机制”与“功能特异性的时序调节机制”(p.11-12)；

第三，在第 4 节神经机制部分，鉴于目前直接建立行为-神经对应关系的研究仍然有限，我们对现有相关证据进行梳理与整合。结果显示，丘脑、下丘脑和蓝斑核等觉醒系统的节律性活动，为“一般性调控”提供了初步支持；而不同认知功能相关脑区的差异化活动节律，则为“特异性调控”提供了线索。我们在第 4 节中对这些证据进行了归纳，使其与第 3 节提出的行为框架形成呼应(p.12-15)。

通过上述修改，本文已由原先偏重分层介绍的综述结构，调整为围绕“不同内在机制驱动的昼夜节律如何差异化调控认知功能”这一核心科学问题展开的整合性、问题导向型综述，从而更清晰地呈现生理机制、行为与神经证据之间的逻辑关联。

意见 2：

引言的切入点用意不明。前两段主要围绕“昼夜节律紊乱的现实危害”“现代社会的作息风险”等内容展开，而非直接聚焦“昼夜节律如何影响认知功能及其神经机制”。这一写法虽有科普价值，但看起来对领域内的“科学问题”聚焦不足。

回应：

感谢您的细致评审和宝贵意见。我们同意您提出的原稿中科学问题聚焦不足的问题。我们已经根据您的意见对引言部分进行了修改，使其更直接地切入核心科学问题。在修改后的引言中：在第一段中，我们删减了部分关于现代社会作息风险的背景内容，保留了必要的背

景，以避免科普式铺陈。在第二段中，我们首先聚焦于昼夜节律效应这一现象，然后指出现有研究发现该效应在不同认知领域中并不完全同步，并且在神经机制上也观察到大脑皮层与皮层下结构在一天中具有不同的活动波动模式，从而引出昼夜节律对认知功能及其神经机制可能具有特异性调控这一核心科学问题(p.1)。通过上述调整，引言的切入点更加明确，并与全文的研究主线形成呼应。

意见 3:

“昼夜节律的认知表征”这一说法令人困惑。“认知表征”(cognitive representation)在认知科学中通常指心理表征或信息编码方式，而本章实际讨论的是不同认知功能在一天中随时间的行为波动(如 KSS、PVT、N-back、风险决策、道德判断等)。因此，“认知表征”并不能准确描述该部分的内容，容易让读者误解为本章涉及内在认知结构或加工模式的表征机制，而非行为表现的时序变化。

回应:

感谢审稿人对术语使用的细致指正，使用“认知表征”这一术语确实可能会引起误解。因此，我们已将标题由“昼夜节律的认知表征”修改为“昼夜节律对不同认知功能的调控”，以避免概念混淆(p.6)。

意见 4:

本文的各章节内部也存在较多“只述不论”的问题。比如，作者在 3.1 的工作记忆和风险决策部分，作者收集了一些结果不一致的研究，但未讨论这些差异是否来源于任务敏感度、测试的时间窗口、样本时型、测量次数等方法学差异，直接把研究间的异质性归为“领域特异性”，缺乏严谨性，也无法让读者理解为何按这个框架分类的认知功能就受不同节律机制的影响。再比如，作者在 4.1 与 4.2 部分似乎仅仅把神经机制的相关证据作为补充性知识呈现，罗列了觉醒系统与边缘系统的节律研究，但这些结果未被用于解释不同认知功能为何产生节律相位的差异。为什么风险决策的节律与警觉性不同步？为什么复杂执行功能的“改善时段更早”？现有神经证据能否支持“功能特异性调节”的观点？当前文章缺乏综述应有的系统整合和讨论深度。

回应:

感谢审稿人指出的部分章节中存在“只述不论”的这一关键问题。我们在修订过程中也意识到，原稿在部分内容表述中过于依赖研究结果的罗列，未能充分体现综述应有的整合和讨论。针对这一问题，我们主要做了以下修改：

第一，针对工作记忆、风险决策等结果异质性较高的领域，我们在第 3.1 节的总结部分与 3.3 节中，不再将其简单归为领域特异性，而是系统分析了可能的方法学来源(如测量时间

窗口覆盖不全、任务敏感性不足)及潜在的神经机制差异,明确了异质性的两种可能解释(p.11-12)。

第二,针对“把神经机制的相关证据作为补充性知识呈现,罗列了觉醒系统与边缘系统的节律研究,但这些结果未被用于解释不同认知功能为何产生节律相位的差异”的问题。我们仔细审阅后发现,目前直接探讨行为-神经关联的研究目前尚不充分,我们对现有相关证据进行了框架化梳理,结果发现,丘脑、下丘脑和蓝斑核等觉醒系统的节律性活动,为“一般性调控”提供了初步支持;而不同认知功能相关脑区的差异化活动节律,则为“特异性调控”提供了线索。我们在第4节中对这些证据进行了归纳,使其与第3节提出的行为框架形成对应(p.12-15)。

第三,针对审稿人提出的具体问题,“风险决策与警觉性节律不同步”和“复杂执行功能改善时段较早”,我们在行为总结(第3.1节, p.11)与神经机制讨论(第4.2.1节, p.14)中结合既有神经影像证据进行了机制性探讨。基于 Muto 等人(2016)关于前额叶激活峰值较晚的发现,我们指出,这种不同步很可能源于内源性昼夜节律系统对不同神经环路进行了特异性的时序调控,使其活动节律存在相位差异。这为“功能特异性调控”的存在提供了直接的神经机制解释。

意见 5:

“狭义/广义”的昼夜节律分类操作性较弱。作者在 2.1 节提出“广义(S+C)”与“狭义(C)”的区别,但只是根据研究范式的松散描述进行划分,并未建立明确标准。TOD、CR、FD 三种范式究竟是“连续体”还是“分类工具”?为什么 TOD 范式为何可直接视为 S+C 效应,为什么 CR 范式在分离 S 过程与 C 过程方面更具优势?这种划分是否得到领域内一致认可,利用该分类能否有效解释图 2 所总结的效应差异?

回应:

感谢审稿人对该部分提出的深入而关键的意见。我们完全认同,有效的概念区分必须建立在明确且可操作的方法学标准之上,而不应仅基于对研究范式的描述性划分。根据您的建议,我们对第 2.1 节相关内容进行了系统修订(p.3),旨在明确分类依据,并增强其解释效力。

第一,关于广义(S+C)与狭义(C)昼夜节律效应的操作性标准。修订后,我们不再基于研究范式的描述性差异进行划分,而是将分类依据明确建立在两个方法学维度之上:(1)实验设计上,是否对光照、活动等关键掩蔽因素进行严格标准化控制;(2)数据分析中,是否采用数学模型分离睡眠稳态过程(S)与昼夜节律过程(C)的独立贡献。当研究不满足上述任一标准时,其所报告的认知日内波动被视为广义昼夜节律效应,反映的是内源性节律、睡眠稳态共同作用的混合效应。当同时满足上述两个标准时,其所分离出的、纯粹由内源性生物钟驱动的认

知成分，则被定义为狭义昼夜节律效应(p.3)。

第二，关于 TOD、CR 与 FD 三种范式的性质。我们在修订中明确指出，这三种范式并非严格的离散分类工具，而是在控制混淆变量与分离 S/C 过程能力上存在系统差异的方法学手段。在多数日间记录法(TOD)研究中，由于未严格控制光照、活动与进食等强掩蔽因素，且通常未结合双过程建模，其观测到的认知波动难以区分 S 与 C 的相对贡献，因此观测结果更接近广义效应(S+C)。相比之下，恒定常规程序(CR)与强制去同步化程序(FD)不仅在实验设计上最大限度削弱了外部干扰，其数据结构也支持并要求采用数学模型来分离 S 与 C 成分，因此在分离狭义昼夜节律效应方面具有方法学优势。

第三，关于该分类对图 2 中效应差异的解释效力。我们在图 2 中分别汇总了不同范式下的研究结果，并区分展示了包含 TOD、CR 和 FD 的总体效应模式，以及仅基于 CR/FD 且经建模分离后的狭义昼夜节律效应。通过这一对比，可以更清晰地识别哪些认知功能的节律性主要源于内源性 C 过程，哪些则更依赖于 S 与 C 的交互作用，从而为理解不同认知领域节律差异的潜在神经机制提供依据。

第四，关于该分类在领域内的共识程度。目前“广义/狭义昼夜节律效应”这一术语尚未成为领域内的通用表述，但“认知表现同时受睡眠稳态(S)与内源性节律(C)共同调控”的双过程观点已得到广泛认可(例如，Borbély, 1982; Borbély et al., 2016; Cajochen & Schmidt, 2025; Dijk et al., 1992)。本文提出的分类是在这一经典理论框架基础上，对不同研究设计与分析策略所揭示效应层级的操作性细化，旨在提高不同研究结果之间的可比性与解释清晰度。

Borbély, A. A. (1982). Sleep regulation: Circadian rhythm and homeostasis. In D. Ganten & D. Pfaff (Eds.), *Sleep* (pp. 83-103). Springer.

Borbély, A. A., Daan, S., Wirz-Justice, A., & Deboer, T. (2016). The two-process model of sleep regulation: A reappraisal. *Journal of Sleep Research*, 25(2), 131-143.

Dijk, D. J., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (1992). Circadian and sleep/wake dependent aspects of subjective alertness and cognitive performance. *Journal of Sleep Research*, 1(2), 112-117.

Cajochen, C., & Schmidt, C. (2025). The circadian brain and cognition. *Annual Review of Psychology*, 76(1), 115-141.

意见 6:

作者在展望中提出“发展个体化多模态神经模型”“基于低谷期的精准光干预”“利用时域干涉刺激深部结构”等前沿方向，但前文并未建立机制模型、也未验证不同认知任务的节律差异可用于干预的因果基础。因此，这些展望更像是“列举可能的发展方向”，而非基于本文综述所得出的理论延伸，看起来有些脱节。

回应：

感谢审稿人对展望部分提出的批评意见。我们承认原稿中部分展望确实存在与前文理论与证据基础衔接不足、内容偏宽泛的问题。在修订中，我们对展望部分进行了实质性修改，明确以本文综述所总结的行为模式与神经证据为出发点，对未来研究方向进行收束和限定，使其成为对本文理论框架的延伸。具体修改如下：

第一，在 5.1 节中，我们删除了原先较为宽泛的计算建模提法，将研究重点明确聚焦于采用多模态神经成像验证双重调控机制。基于前文行为与神经证据的综述，我们指出，当前研究在神经层面尚缺乏对一般性调控和特异性调控的直接检验，并且现有研究多依赖线性模型，未能充分考虑 S 与 C 过程的非线性交互。因此，未来研究的关键在于利用多模态神经数据与更合适的计算模型，分离出 C 过程的神经信号，并系统检验其在不同脑区/功能网络中的同步性与异质性，从而在神经层面验证本文提出的调控框架(p.15)。

第二，在 5.2 节中，我们明确将光照干预的讨论建立在本文行为综述结果之上。修订后，我们强调未来研究应基于图 2 所总结的不同认知功能的节律低谷与恢复时段，检验针对特定认知功能自身节律低谷实施时序化干预，是否能够产生相对特异的行为改善效果。这一方向直接源于本文对认知节律异质性的系统总结，旨在探索该特异性是否具有可塑性及其潜在应用价值(p.15-16)。

第三，在 5.3 节中，我们进一步强化了因果干预方向与前文证据之间的逻辑衔接。修订后，我们明确提出未来因果研究的干预靶点应直接源于前文综述中与特定认知节律相关的关键脑区(如丘脑)。同时，我们提出利用新兴的时域干涉(TI)刺激等技术，直接检验特定脑区活动到特定认知节律的因果假设，从而为本文提出的功能特异性调控机制提供因果层面的验证路径(p.16)。

.....

审稿人 2 意见：

文章结构合理，逻辑清晰，明确并区分不同内在机制驱动的昼夜节律效应，通过整合分子时钟、中央时钟及内分泌系统三个维度的生理证据，为机制区分提供理论基础；此外，该文章全面归纳昼夜节律效应在主观困倦、警觉性注意、工作记忆、复杂执行功能、风险决策和道德行为认知领域的特异性表现模式，为昼夜节律和认知研究提供了系统的描述。但文章存在以下不足之处：

意见 1：

神经机制章节主要侧重于高空间分辨率的影像学描述，脑电作为一种重要的神经成像方

式，尤其在认知领域起到非常重要的作用，但文章尚未提及相关脑电研究的支撑。此外，建议将现有的 fMRI 结果与已知的脑电特征进行关联性讨论，以增强机制推导的严密性。

回应：

非常感谢审稿人的宝贵建议。我们完全认同，脑电作为高时间分辨率的神经成像技术，对于揭示认知过程的动态机制具有不可替代的作用。根据您的意见，我们在修订中系统补充了相关脑电证据，并加强了与 fMRI 发现的关联讨论(p.13-14)，具体修改如下：

第一，在 4.1.1 节中，我们补充了 EEG 证据，重点阐述了 θ 频段功率等电生理指标如何即时反映皮层整体唤醒状态的昼夜波动，并将其与 fMRI 所揭示的觉醒相关脑区的活动节律相联系，从而在时空维度上共同支持一般性调控路径(p.13)；

第二，在 4.2.1 节中，我们引入了 ERP 证据，说明认知加工不同阶段也存在昼夜差异性调节，以增强特异性调控路径的机制解释力度(p.14)。

意见 2：

图 1 里面文字是两种语言，建议使用一种语言。

回应：

感谢审稿人的细致指出，我们已将图 1 中的文字统一为单一语言(p.6)。

意见 3：

图 1 的图例位置全部放在图 1 下面。

回应：

感谢您的细致审阅，已将图 1 的图例统一置于图下方(p.6)。

意见 4：

图 2 的图例里面补充一下 K 值概念。

回应：

感谢审稿人指出该处表述不清，我们已经对图例里 K 值的概念进行了补充(p.8)。

意见 5：

3.2 章节中说“研究通常通过双过程模型及其衍生模型在分析中实现事后分离，从而揭示纯粹由 C 过程驱动的认知波动。”这个分离的数学方法是否在这个章节的参考文献中使用一致？这些作者们的数学分离是否考虑了非线性交互作用？还是只是简单的加法模型？

回应：

感谢审稿人的提问。针对 3.2 章节中数学分离方法的问题：

第一，核心数学方法基本一致。所引用的研究(Åkerstedt & Folkard, 1995; Muck et al., 2022; Van Dongen et al., 2012)尽管在模型名称或参数估计细节上存在差异，但其数学核心均基于 Borbély 睡眠调节双过程模型。它们都采用加法模型的基本形式：

$$P(t) = \beta S(t) + \gamma C(t) + \kappa + \varepsilon$$

即将认知表现建模为稳态过程(S)与昼夜节律过程(C)的线性加权和。因此，在分离 S 与 C 独立贡献这一目标上，所采用的方法是本质一致且有效的。P(t)：在时间 t 的预测表现。S(t)：稳态过程值，随清醒时间指数衰减，随睡眠时间指数恢复。C(t)：昼夜节律过程值，通常为正弦函数或其变体。 β, γ ：分别代表 S 和 C 过程对表现影响的权重(缩放因子)。 κ ：截距，代表基础表现水平。 ε ：误差项。

第二，这些研究在模型中。都是基于其采用的数据(主要为相对短时的睡眠剥夺)及所遵循的经典模型框架(Achermann et al., 1993; Dijk et al., 1992)，普遍认为在该时间尺度下 S 与 C 过程的非线性交互效应可以忽略，因此模型未包含交互项。例如，Van Dongen 等人(2012)明确指出，在最初 36 小时内，交互作用可被合理忽略。此外，Dijk 等人(1992)和 Van Dongen & Dinges (2003)的研究表明，显著的交互作用通常在持续清醒超过 16-18 小时后、尤其在昼夜节律低谷期与高睡眠压力叠加时才变得突出。虽然后续更长时程的研究揭示了显著的交互效应(如 Cohen et al., 2010; Wyatt et al., 2004)。

Cohen, D. A., Wang, W., Wyatt, J. K., Kronauer, R. E., Dijk, D.J., Czeisler, C. A., & Klerman, E. B. (2010). Uncovering residual effects of chronic sleep loss on human performance. *Science Translational Medicine*, 2(14), 14ra3. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3000458>

Dijk, D.J., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (1992). Circadian and sleep/wake dependent aspects of subjective alertness and cognitive performance. *Journal of Sleep Research*, 1(2), 112-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.1992.tb00021.x>

Van Dongen, H. P. A., & Dinges, D. F. (2003). Investigating the interaction between the homeostatic and circadian processes of sleep-wake regulation for the prediction of waking neurobehavioural performance. *Journal of Sleep Research*, 12(3), 181-187. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2869.2003.00357.x>

Wyatt, J. K., Cecco, A.-R. D., Czeisler, C. A., & Dijk, D.-J. (2004). Circadian temperature and melatonin rhythms, sleep, and neurobehavioral function in humans living on a 20-h day. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 287(4), R818-R828. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00220.2004>

意见 6:

英文摘要需要进一步润色。

回应:

感谢您指出的问题，我们已经请专业人士对摘要部分进行了语言润色，以确保其表达清晰，符合学术规范(p.21)。

第二轮

审稿人 1 意见:

感谢作者的修改，没有其他意见。

审稿人 2 意见:

感谢您对上一轮审稿意见所作的详尽且高质量的回复。您对所有问题都进行了认真的考虑和修改。这些修订极大地提升了稿件的清晰度、严谨性和完整性。基于目前的版本，建议对全文进行最终的格式检查和修改。如第三节 3 出现的(Psychomotor Vigilance Task, PVT)和 3.1.1 出现的(wake maintenance zone, WMZ)括号内首字母大小写不同，建议全文格式保持一致；等等。

回应:感谢审稿人细致的建议。我们已根据您的建议对全文进行了系统的格式检查与统一修改，包括规范括号内英文术语的大小写格式(p.2-3,7,10,13-14)，以确保全文格式一致。修改处已用紫色进行标注。

第三轮

编委 1 意见:

作者认真修改和回复审稿人的意见，已达到发表水平，建议发表。

编委 2 意见:

同意发表。

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，达到了发表水平，同意发表。