《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：瞳孔测量辅助孤独症儿童筛查诊断的方法原理及机制
作者：骆红，祁亚培，谢超香

第一轮

审稿人 1 意见：

该论文整体写作流畅，内容详实、格式规范，表述较为严谨。论文内容关注瞳孔在自闭症儿童诊断与筛查中的方法原理及机制，具有较好的理论价值和应用指导意义。不过，从整体来看，论文内容结构框架似乎没有跳出已有综述的框架，整体内容框架还需做较大调整以更符合当前论文主题。具体建议如下：

意见 1：“1 前言”的研究问题不明确。目前的引言只是指出国内用瞳孔测量技术研究自闭症群体少，并没有聚焦研究主题。建议在引言部分指出以往同类综述研究的不足，并合理且有逻辑地提出本研究的问题，即回答为什么要关注“瞳孔测量辅助自闭症儿童筛查诊断的方法原理及机制”。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已根据您的建议对前言部分做了调整。（详见手稿 1 引言第三段）

意见 2：“2 瞳孔测量的原理与方法”与已有综述（如，杨晓梦等.(2020).瞳孔是心灵的窗口吗？ ——瞳孔在心理学研究中的应用及测量.心理科学进展,28(7),1029－1041）内容主题有重叠。建议删减、压缩，重点围绕研究主题介绍瞳孔测量用于筛查与诊断自闭症的方法原理。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已对 2 瞳孔测量的原理与方法部分进行了系统的精简与调整，确保内容紧密围绕本研究主题展开，避免与已有综述内容重复。具体修改如下：

1. 针对“2.1 瞳孔反应的生理与神经基础”，我们大幅压缩了对通用神经通路的背景性描述，仅保留与孤独症瞳孔研究直接相关的关键机制（例如，交感与副交感神经、乙酰胆碱能、蓝斑-去甲肾上腺素系统），删除了与主题关联较弱的内容。（详见手稿 2.1 瞳孔反应的生理与神经基础）

2. 针对“2.2 瞳孔测量的指标与参数”，我们根据孤独症领域的实证研究惯例，删除了不常报告的指标，仅聚焦两类核心指标：①瞳孔光反射中的基线直径、收缩潜伏期和收缩幅度；②复杂视觉刺激研究中的基线直径与瞳孔扩张幅度，使指标介绍更具针对性。（详见手稿 2.2 瞳孔测量的指标与参数）

意见 3：“4 瞳孔测量在自闭症儿童筛查诊断中的应用价值”似乎没有很好地呼应主题（没有如作者在自检报告中所说要讲清楚“能怎么用”）， 其思路是围绕不同自闭症的症状对应的瞳孔异常表现；但从题目看，该研究的重点是“方法原理”。因此，一种比较清晰的思路应是围绕瞳孔指标的不同维度（如收缩幅度），来告诉读者根据瞳孔的哪些变化（或结合

其他什么维度的指标），可以推测出个体在哪个方面（如感知加工、注意转移等）出现问题，进而可以推测该个体是否有自闭倾向或者是否可被诊断为自闭症。因为既然要用于诊断，我们只能从个体的行为表现去推测其是否为自闭症，而不能从已有自闭症的特点（如社交回避等）去倒推该个体的瞳孔表现应该是什么样的。

建议提取自闭症个体瞳孔反应的特异性维度有哪些（即能与其他群体区别开来的典型瞳孔反应）；重点描述通过哪些瞳孔变化可以得知个体哪些功能出现异常，最后需要综合哪些方面可推测个体有自闭风险或可断定其患有自闭症。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们认同您提出的应从瞳孔指标出发、指向功能异常与诊断推断的思路，且根据您的建议对文章结构与论述逻辑进行了系统性重构与调整，具体修改如下：

1. 我们提炼并归纳了可区分孤独症与典型发育儿童的核心瞳孔指标。主要包含三个部分：光刺激诱发瞳孔反应（包括收缩潜伏期、相对收缩幅度）、复杂视觉刺激诱发瞳孔发应（社会和非社会刺激、情绪刺激、以及注意定向任务中的瞳孔反应）、基线瞳孔直径（由于瞳孔光反射和复杂视觉刺激均包含基线瞳孔直径，且这一指标在过往研究中的结果高度不一致，因此，我们单独归纳了这一指标，并讨论了可能产生结果不一致的原因）；（详见手稿 3 孤独症儿童的异常瞳孔反应）

2. 我们根据这些异常的指标归纳了其背后涉及的神经机制，并就这些异常推测个体哪个方面可能出现问题。主要包含三个部分：

①自主神经调节失衡（对应收缩潜伏期延长及相对收缩幅度减小），孤独症儿童对光刺激敏感性异常推测其感觉加工异常（例如 Nyströmetal.,2015; Daluwatte et al., 2015）；（详见手稿 4.1 自主神经调节失衡：感觉加工异常）

②蓝斑-去甲肾上腺素系统功能失调（对应社会和非社会刺激诱发的异常瞳孔反应以及在注意定向任务中的异常瞳孔反应），孤独症儿童对社会刺激的瞳孔反应减弱，对非社会刺激的瞳孔反应反而增强，表明其对社会和非社会刺激自下而上的感觉显著性加工异常（例如，Polzer et al., 2022; Bast et al., 2023）。此外，在注意定向任务中发现，孤独症儿童对外源性刺激的定向能力受损，而对内源性刺激的定向能力相对完好或增强，说明其外源性刺激所依赖的腹侧额定注意网络的激活异常，从而延迟了对外源性刺激的定向能力，表现出注意难以从当前目标脱离的现象（Boxhoorn et al., 2019; Keehn et al., 2021）。（详见手稿 4.2 蓝斑-去甲肾上腺素系统功能失调）

③杏仁核-前额叶调控异常（对应情绪面孔诱发的异常瞳孔反应），孤独症儿童对情绪面孔的唤醒模式并非一成不变，而是会根据情绪效价（Reisinger et al., 2020）、面孔熟悉度（Nuske, Vivanti & Dissanayake, 2014; Nuske et al., 2015）、有无意识加工（Nuske, Vivanti, Hudry & Dissanayake, 2014; Tamietto & Gelder, 2010）以及孤独症个体异质性（Nuske et al., 2015）而呈现出高唤醒或低唤醒，我们均分析了导致异常唤醒的原因。同时，不论是高唤醒，亦或是低唤醒都是帮助理解孤独症社交情绪沟通障碍的重要证据与神经生理基础。（详见手

稿 4.3 杏仁核-前额叶调控异常：情绪唤醒调节失衡）

参考文献：

Bast, N., Mason, L., Ecker, C., Baumeister, S., Banaschewski, T., Jones, E. J. H., Murphy, D., Buitelaar, J. K., Loth, E., Pandina, G., & Freitag, C. M. (2023). Sensory salience processing moderates attenuated gazes on faces in autism spectrum disorder: a case–control study. *Molecular Autism*, *14*(5), 1-16.

Boxhoorn, S., Bast, N., Supèr, H., Polzer, L., Cholemkery, H., & Freitag, C. M. (2019). Pupil dilation during visuospatial orienting differentiates between autism spectrum disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *61*(5), 614–624.

Daluwatte, C., Miles, J. H., Sun, J., & Yao, G. (2015). Association between pupillary light reflex and sensory behaviors in children with autism spectrum disorders. *Research in Developmental Disabilities*, *37*, 209–215.

Keehn, B., Kadlaskar, G., Bergmann, S., McNally Keehn, R., & Francis, A. (2021). Attentional disengagement and the locus coeruleus – norepinephrine system in children with autism spectrum disorder. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *15*, 716447.

Nuske, H. J., Vivanti, G., & Dissanayake, C. (2014). Reactivity to fearful expressions of familiar and unfamiliar people in children with autism: an eye-tracking pupillometry study. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, *6*(1), 14.

Nuske, H. J., Vivanti, G., & Dissanayake, C. (2015). No evidence of emotional dysregulation or aversion to mutual gaze in preschoolers with autism spectrum disorder: An eye-tracking pupillometry study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *45*(11), 3433–3445.

Nuske, H. J., Vivanti, G., Hudry, K., & Dissanayake, C. (2014). Pupillometry reveals reduced unconscious emotional reactivity in autism. *Biological Psychology*, *101*, 24–35.

Nyström, P., Gredebäck, G., Bölte, S., & Falck-Ytter, T. (2015). Hypersensitive pupillary light reflex in infants at risk for autism. *Molecular Autism*, *6*(1), 10.

Polzer, L., Freitag, C. M., & Bast, N. (2022). Pupillometric measures of altered stimulus-evoked locus coeruleus-norepinephrine activity explain attenuated social attention in preschoolers with autism spectrum disorder. *Autism Research*, *15*(11), 2167–2180.

Reisinger, D. L., Shaffer, R. C., Horn, P. S., Hong, M. P., Pedapati, E. V., Dominick, K. C., & Erickson, C. A. (2020). Atypical social attention and emotional face processing in autism spectrum disorder: Insights from face scanning and pupillometry. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *13*(76), 1-14.

Tamietto, M., & de Gelder, B. (2010). Neural bases of the non-conscious perception of emotional signals. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(10), 697–709.

意见 4：建议作者考虑，瞳孔变化与其他眼动指标之间的关联，即在考虑瞳孔指标时是否需要结合其他眼动指标（或其他指标）综合评估自闭症症状，这样可以较为全面的解读瞳孔反应在自闭症个体整个眼动行为中的独特贡献。

回应：感谢专家的宝贵意见！瞳孔反应与注视分布、眼跳反应时、注视次数等眼动指标高度关联，尤其在复杂视觉任务中，多指标联合分析能够更完整揭示孤独症个体的行为与神经特征。此前手稿对这类关联的阐述不够充分，现已针对性补充，具体修改如下：

1. 瞳孔异常表现部分：结合眼动指标佐证

①情绪面孔加工：补充孤独症儿童对眼部注视比例偏低的眼动结果，明确这是其情绪瞳孔唤醒异常的重要诱因，为异常反应提供直接行为证据；（详见手稿 3.3.2 对情绪面孔的瞳

孔反应异常 第一段倒数 1-10 行）

②注意定向任务：纳入眼跳反应时数据，清晰说明孤独症儿童瞳孔异常与注意转移困难的对应关系，强化结论说服力；（详见手稿 3.3.3 在注意定向任务中的瞳孔反应异常第一段 8-18 行）

③视觉搜索任务：补充首次注视目标时间更短的特征，即孤独症儿童能够更快从干扰刺激中定位目标的能力，再结合瞳孔的动态变化，以此来说明其搜索效率更高；（详见手稿 3.3.3 在注意定向任务中的瞳孔反应异常第二段倒数 3-5 行 ）

2. 同时，在解释异常神经机制方面，我们也在必要的地方结合了其他指标，例如：

①视觉搜索优势：结合左侧视野偏好减弱、注意分配更均匀的注视模式，从行为层面解释其搜索效率提升的潜在机制；（详见手稿 4.2.2 注意脱离困难第二行 6-10 行）

②情绪唤醒失衡：关联对眼部注意减弱的眼动结果，进一步阐明杏仁核-前额叶调控异常的行为基础，完善机制推断逻辑；（详见手稿 4.3 杏仁核-前额叶调控异常：情绪唤醒调节失衡第二段倒数 5-6 行；第三段倒数 1-4 行）

意见 5：建议总结与展望进一步与研究主题呼应，从研究主题出发来做总结与展望。

回应：感谢专家的宝贵意见！根据您的建议，我们对总结与展望部分进行了全面优化，严格紧扣瞳孔测量在孤独症儿童筛查与诊断中的应用潜力这一核心主题，重新梳理研究结论、凝练关键发现，并围绕主题提出更具针对性的未来研究方向。（详见手稿 5 总结与展望）

意见 6：目前论文参考文献截止到 2024，这可能显得文献参考不全；请进一步检索 2025-今的相关研究并补充进论文中（经查阅有相关研究），以突出前沿性。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已将 2025 至今符合本主题相关的文献资料补充进文章当中，例如：

Bufo, M. R., Guidotti, M., Lemaire, M., Joëlle Malvy, Emmanuelle Houy-Durand, Frédérique Bonnet-Brilhault, Frédéric Briend, Aguillon-Hernandez, N., & Wardak, C. (2025). Autonomic Disequilibrium at Rest in Autistic Children and Adults. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, *50*(3), 465–480.

Hanson, K. L., Avino, T., Taylor, S. L., Murray, K. D., & Schumann, C. M. (2025). Age-related differences in axon pruning and myelination may alter neural signaling in autism spectrum disorder. *Molecular Autism*, *16*(1), 1–13.

Jiang, W., & Liu, F. (2025). Bright Lights, Silent Signals: Colour-Specific Attention–Arousal Decoupling in Autistic Children Revealed by Eye-Tracking and Pupillometry. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 1-19.

Matyjek, M., Bast, N., & Faraco, S. S. (2025). Preference for Social Motion in Autistic Adults. *Psychophysiology*, *62*(4), 1–12.

Vidal-Zaborski, O., Merino, D., Fernandez, A., Mercery, M., Herbreteau, L., Askenazy, F., Zuluaga, M. A., Ismailova, E., Douet-Vannucci, V., & Thümmler, S. (2026). Autonomic and hormonal biomarkers in individuals with autism spectrum disorders and developmental or intellectual delay: A systematic PRISMA review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *180*, 106496.

Wende, K. C., Kessler, R., Rusch, K. M., Sommer, J., & Jansen, A. (2026). Differential arousal and neural

engagement for angry and fearful faces: a combined pupillometric and fMRI study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *19*, 1739802.

Zhang, T., Zhang, S., & Jiang, Y. (2025). Automatic pupillary responses to pain perception in adults and children: The influence of race and autistic traits. *Cognition*, *268*, 106384.

意见 7：其他建议：

1）根据当前国内学术界比较接受的称呼，建议使用“孤独症”代替“自闭症”。

2）题目去掉“解析”。

3）在一些位置，建议将“注意力”换成“注意”，因为前者强调的是一种能力，“能力”不能用于“转移”等过程，后者则是心理过程或成分。

4）参考文献有的缺少页码，请核对并补全。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已逐条修改您提出的建议：

1. 全文统一将“自闭症”修改为“孤独症”；

2. 已删除题目中“解析”一词；

3. 严格区分“注意力”与“注意”的概念差异，将表示心理过程的表述统一调整为“注意”；

4. 已全面核对所有参考文献，补充完善了缺失的页码信息。

审稿人 2 意见：

本文围绕瞳孔测量在孤独症儿童早期筛查中的应用潜力展开综述，内容涵盖神经生理基础、研究方法、应用场景及未来方向，具有一定系统性与前瞻性。主要问题在于部分内容停留在现象描述，缺乏对机制之间关联、矛盾结果的深入分析。具体意见如下：

意见 1：有研究发现孤独症社区更喜欢“孤独症”这个称呼而不是“自闭症”，建议作者改为“孤独症”。https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/aut.2024.0001

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已将文中所有“自闭症”称呼均修改为了“孤独症”。

意见 2：作者提到“本文最主要的创新性贡献在于提出瞳孔测量可作为自闭症儿童筛查诊断的工具”，但这并不准确，很多研究者都提到过类似观点，建议调整。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已修改类似的表达，并在引言末尾重新梳理并明确本综述的核心创新点、研究问题及与既往类似综述的区别。（详见 1 引言 最后一段）

意见 3：除了瞳孔光反射和复杂视觉刺激诱发瞳孔反应，很多研究者还探究了非视觉刺激（比如声音、刺激皮肤等）引起的瞳孔变化。作者可以强调下本综述主要关注视觉刺激引起的瞳孔变化。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们完全认同，相关研究也常探讨声音、触觉等非视觉刺激诱发的瞳孔反应。为明确研究边界、避免歧义，我们已在瞳孔测量的原理与方法部分专门补充

说明：本综述主要关注视觉刺激引起的瞳孔反应。（详见 2.2 瞳孔测量的指标与参数第一段倒数 1-5 行）

意见 4：建议绘制瞳孔光反射典型波形示意图，标注关键指标（如基线、潜伏期、最小直径、最大收缩速率等），帮助读者直观理解。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已根据建议绘制了瞳孔光反射典型波形示意图，以帮助读者更直观地了解瞳孔光反射过程及各参数含义。（详见手稿 2.2 中图 2）

意见 5：在介绍“瞳孔反应都被认为与注意力和信息处理有关”时，作者可以引用操作瞳孔/唤醒变化影响注意的因果研究。https://doi.org/10.1002/aur.1675；https://doi.org/10.1002/aur.1668

回应：感谢专家的宝贵意见！我们阅读了您分享的两篇文章。

其中 Kleberg 等人（2017a）的文章 *Reduced Visual Disengagement but Intact Phasic Alerting in Young Children with Autism* 采用间隙-重叠范式（gap-overlap paradigm），探讨孤独症儿童的视觉注意脱离能力与相位性警觉系统的关系。结果显示，在无声线索的重叠条件下，孤独症儿童的眼跳潜伏期显著长于典型发育儿童，表现出视觉注意脱离困难；但当设置短暂的声音提示作为相位警觉线索后，两组儿童的眼跳潜伏期出现同等程度的加快，这一结果提示孤独症儿童的相位性警觉功能完好且能够正常调节注意定向过程。

Kleberg 等人（2017b）的文章 *Visual Orienting in Children With Autism: Hyper-Responsiveness to Human Eyes Presented After a Brief Alerting Audio-Signal, but Hyporesponsiveness to Eyes Presented Without Sound* 考察了相位警觉对孤独症儿童社会刺激定向的影响，以人眼作为目标刺激。结果同样发现，在短暂的声音提示后，孤独症儿童对人眼的定向速度显著加快，甚至快于典型发育儿童，呈现出对人眼的过度反应，且社会声音和非社会声音刺激的效应无显著差异。提示，相位性警觉可显著改变孤独症儿童的社会注意模式，无声条件下的社会定向缺陷可被警觉线索逆转。

两篇文章通过操纵唤醒水平、观察注意行为变化，为瞳孔/唤醒与注意之间的因果关系提供了直接的实验证据。基于此，我们在文中补充引用了这两项研究，作为瞳孔与注意、信息加工相关的因果支撑（详见 4.2 第一段 1-4 行）；同时，将其结论用于佐证孤独症儿童相位警觉功能基本完好、仅存在注意脱离困难的推论。（详见 4.2.2 第一段倒数 1-8 行）

意见 6：复杂视觉刺激诱发瞳孔反应以及基线瞳孔的结果以往研究非常不一致，作者需要指出这一点，并讨论以往研究不一致的潜在原因。

回应：感谢专家的宝贵意见！诚如您所说，关于复杂视觉刺激诱发瞳孔反应和基线瞳孔的结果存在高度不一致，尤其是基线瞳孔直径，因此，我们已在综述中系统梳理、深入讨论相关分歧及潜在原因，具体修改如下：

1. 针对基线瞳孔直径结果不一致的问题，我们专门增设独立小结，集中梳理相关争议，并从样本特征、测量条件等方面，系统分析不一致的潜在影响因素；（详见 3.1 基线瞳孔直径）

2. 针对复杂视觉刺激的瞳孔反应分歧：

①在社会/非社会刺激方面，大多不一致的情况集中于非社会刺激，结合最新研究推测，非社会刺激的类型可能是导致其结果不一致的原因之一，例如，与狭隘兴趣（CI）相关的刺激（几何图形、机械、重复结构）可能更能够诱发孤独症儿童产生强烈的瞳孔反应（Hinz et al., 2024），并提出未来研究需要控制非社会刺激的类型进一步验证这一推断；（详见 3.3.1 对社会和非社会刺激的瞳孔反应异常）。

②在情绪刺激方面，明确孤独症儿童情绪瞳孔反应存在高/低唤醒两种模式，并在对应章节中调整论述，阐明异质性背后的神经调控差异；（详见 3.3.2 对情绪面孔的瞳孔反应异常以及 4.3 杏仁核-前额叶调控异常：情绪唤醒调节失衡）

参考文献：

Hinz, J. R., Eikeseth, F. F., Chawarska, K., & Eikeseth, S. (2024). A systematic review and meta-analysis of atypical visual attention towards non-social stimuli in preschoolers with autism spectrum disorder. *Autism Research*, *17*(12), 2628-2644.

意见 7：作者提到“研究发现自闭症个体在面对社交刺激时表现出梭状回和杏仁核激活减弱”，但这个结论在学术界还存在争论。毫无疑问，瞳孔大小反映了唤醒，但关于过高还是过低，目前结论并不一致。https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cdep.12466。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们阅读了您分享的文献资料。

该文献总结了以往研究关于孤独症群体处理社会信息时的高低唤醒的证据。低唤醒以社会动机理论、社会脑理论作为核心，认为孤独症对社会刺激动机不足、奖赏敏感性低，表现为社交注意减少、杏仁核与梭状回激活减弱；高唤醒以眼神回避假说、共情失衡假说、强烈世界理论为核心，认为孤独症因社会刺激引发过度焦虑与生理唤醒，主动回避社交以缓解不适，表现为杏仁核过度激活与情绪反应增强。该研究指出，两类理论并非完全对立，而是反映了孤独症内部唤醒模式的异质性。

根据您的建议，我们已对原文表述进行严谨修订，不再单一强调“激活减弱”的结论，而是系统梳理学术界两类核心理论：低唤醒与高唤醒理论，并阐明二者并非对立，而是反映孤独症群体的唤醒异质性。同时，我们重新组织了瞳孔反应的相关论述：将情绪面孔诱发弱瞳孔反应、低唤醒与高瞳孔反应、高唤醒两类证据分别归纳，并逐条解析其潜在原因与神经机制。（详见 4.3 杏仁核-前额叶调控异常：情绪唤醒调节异常）

意见 8：作者提到“两项研究报告了基线差异”，建议作者避免使用绝对化的描述，据审稿人所知，探究瞳孔基线差异的研究不止两项。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已删除原文中“两项研究”这类绝对化表述。考虑到基线

瞳孔直径的研究证据较为混杂，我们已单独增设一节，系统梳理基线瞳孔直径的研究现状，并深入探讨导致其结果不一致的潜在原因。（详见 3.1 基线瞳孔直径）

意见 9：在“发现感知加工异常”这一节，光反应可以理解为感知加工，但如何理解基线瞳孔跟感知加工的关系？感知加工存在过敏和低敏，这在孤独症人士上都有发现，瞳孔测量为解决这一矛盾提供了哪些启示？作者在末尾提到了声音刺激（虽然跟全文关注视觉刺激，这里突然出现声音刺激显得突兀），是不是不同感觉通道影响不同？作者可以多总结归纳，提出自己的见解。

回应：感谢专家的宝贵意见！

首先，我们之前对于感知加工异常这一节的内容中，将基线瞳孔直径的内容加入了其中，基线瞳孔直径并非单纯的静息指标，而是反映感知加工的基础唤醒水平，可影响个体对后续刺激的敏感性。考虑到当前研究对基线的争议较大，且多数学者认为其与高级认知加工关联更为密切，依据自适应增益理论（the adaptive-gain theory），我们将基线瞳孔相关内容从“感知加工异常”一节移除，避免概念混淆。

其次，针对孤独症感知加工的过敏与低敏并存的矛盾现象，我们进行了系统归纳：孤独症的感知异常并非固定的过敏或低敏，而是依赖于情境、刺激类型与加工层级的唤醒调节失衡。瞳孔测量为此提供了关键生理启示：

1. 基础感觉加工层面（如瞳孔光反射）：整体呈现出低敏特征，表现为收缩潜伏期延长、相对收缩幅度减小，反映神经传导速度慢、副交感调控效能不足，对基础视觉刺激的响应偏弱、偏慢，对应典型的低敏模式；

2. 高级社会情绪加工层面：呈现出异质性唤醒模式，对高显著性非社会刺激（例如几何图形）因蓝斑-去甲肾上腺素系统过度激活而表现为过敏，对低奖赏价值的社会刺激则因动机不足而表现出低敏。瞳孔测量揭示：孤独症感知加工异常的本质是唤醒调控失衡，而非单一的过敏或低敏，基础感觉通路以低敏为主，高级认知加工则随刺激属性呈现出唤醒异质性。

最后，关于声音刺激与感觉通道异质性问题，为紧扣全文聚焦视觉刺激的核心主题，我们已删除文中声音刺激相关表述。但我们认为孤独症群体的感知加工异常具有通道特异性。视觉基础通路表现为稳定的低敏模式，这种通道间的差异可能是孤独症群体感觉加工异质性的重要来源，也提示基础感知与复杂多通道加工存在不同机制。

再次感谢您的细致审阅！帮助我们提升归纳深度与逻辑严谨性。

意见 10：如何理解“当将这种表现应用到视觉搜索任务当中, 即要求儿童在一堆干扰物当中识别是否存在目标物体时, 自闭症儿童的瞳孔扩张比典型发育儿童更大”这句话与注意转移困难的关系？孤独症儿童的视觉搜索更强是因为注意转移困难吗？

回应：感谢专家的宝贵意见！针对您提出的“孤独症个体视觉搜索能力增强是否是因为注意转移困难”这一关键问题，我们已对原文表述进行严谨修正和逻辑重构，并在此详细说明我

们的思路：

首先，孤独症个体在注意定向任务中的核心特征并非注意转移能力受损，而是注意脱离困难，即难以从当前注视刺激中释放注意，从而转向新的外周目标。之前的表述中将注意脱离写成了注意转移，我们已修改该词，避免概念混淆；

其次，我们根据前人研究以及相关理论推测：孤独症儿童的视觉搜索优势可能与其注意脱离困难存在关联。具体而言，Blaser 等人（2014）的研究发现孤独症儿童比典型发育儿童的视觉搜索效率更高，相位瞳孔扩张更大。反映其过度聚焦目标、投入更多认知努力，且不易受干扰物分心（Blaser et al., 2014; Kaldy et al., 2016）。这种过度聚焦的注意模式，是注意脱离困难的表现，二者可能存在发展层面的内在联系（陈晓雯 等, 2020）；

最后，我们补充了另一关键成因：该优势可能还与左侧视野偏好减弱有关。孤独症儿童左侧视野偏向弱化，使其注意力分配更均匀，能够更高效地从干扰物中锁定目标，进一步提升视觉搜索效率（Keehn et al., 2023）。（详见 4.2.2 注意脱离困难 第二段）

参考文献：

Blaser, E., Eglington, L., Carter, A. S., & Kaldy, Z. (2014). Pupillometry reveals a mechanism for the autism spectrum disorder (ASD) advantage in visual tasks. *Scientific Reports*, *4*, 4301.

陈晓雯, 蔡文淑, 谢桐, 傅世敏. (2020). 孤独症谱系障碍者视觉定向与视觉搜索的特点及神经机制. *心理科学进展*, 28(1), 98-110.

Kaldy, Z., Giserman, I., Carter, A. S., & Blaser, E. (2016). The mechanisms underlying the ASD advantage in visual search. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *46*(5), 1513–1527.

Keehn, B., Kadlaskar, G., & Keehn, R. M. (2023). Elevated and accelerated: Locus coeruleus activity and visual search abilities in autistic children. *Cortex*, *169*, 118–129.

意见 11：在“瞳孔测量在孤独症儿童筛查诊断中的应用价值”各小节（如感知加工异常、注意转移困难、社会信息处理障碍等）最好解释下该现象可能对应的神经生理机制，以呼应题目中的“机制解析”。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们整合两位专家的意见并重新调整了文章的结构，直接将孤独症异常的神经机制与对应的问题（例如感觉加工异常等）相结合。具体修改如下：

1. 自主神经调节失衡。对应瞳孔光反射异常指标，表现为收缩潜伏期延长、相对收缩幅度减小，从神经层面解释孤独症儿童光刺激敏感性下降与感觉加工异常的生理基础；（详见 4.1 自主神经调节失衡：感觉加工异常）

2. 蓝斑-去甲肾上腺素系统功能失调。对应社会/非社会视觉刺激、注意定向任务中的瞳孔异常反应：孤独症儿童对社会刺激的瞳孔反应减弱、对非社会刺激的瞳孔反应增强，反映其自下而上的感觉显著性加工存在偏差；同时外源性注意定向能力受损、内源性注意调控相对保留，提示腹侧额顶注意网络激活异常，从神经机制上解释了其典型的注意脱离特征；（详见 4.2 蓝斑-去甲肾上腺素系统功能失调）

3. 杏仁核-前额叶调控异常。对应情绪面孔诱发的瞳孔异质性唤醒模式：孤独症个体的瞳孔反应会随情绪效价、面孔熟悉度、加工意识水平及群体异质性等呈现出高唤醒或低唤醒

两种模式。我们系统梳理了不同唤醒模式的成因。同时，不论是高唤醒，亦或是低唤醒都是帮助理解孤独症社交情绪沟通障碍的重要证据与神经生理基础。（详见 4.3 杏仁核-前额叶调控异常：情绪唤醒调节失衡）

意见 12：任何测量都有局限性，请讨论瞳孔测量的局限性以及应用其作为辅助诊断或早期筛查孤独症的潜在困难。现在未来研究方向存在空泛表述，比如把“瞳孔”换成孤独症领域常探究的“社会注意”依然成立。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们整合两位专家的意见，已在总结与展望部分补充了瞳孔测量自身的方法学局限性，并对未来方向进行了重构与凝练，均围绕瞳孔测量技术应用于孤独症儿童早期筛查和辅助诊断这一视角展开。（详见 5 总结与展望）

第二轮

审稿人 1 意见：

该稿件经过一轮修改，很好地解决了本人在第一轮提出的关键问题。修改后的稿件，整体逻辑思路顺畅，表述严谨。还有个别问题建议完善：

意见 1：建议根据修改后的稿件内容，适当更新摘要，使摘要内容更明确、更有针对性地概括文章内容。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已根据修改后的内容重新撰写摘要，使其更明确、更具针对性地概括文章内容。（详见摘要部分）

意见 2：“总结”部分当前只是概括了以往研究的发现。建议强化总结，形成针对本研究问题的明确结论，即可以清楚地让读者明白瞳孔策略怎么用于筛查诊断孤独症。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们完全认同应在总结部分补充瞳孔测量用于辅助筛查与诊断的策略，便于读者更直观地理解该生理指标的临床价值。对此，我们根据现有研究，从早期风险预警、临床辅助诊断两个阶段梳理瞳孔测量指标的落地应用策略（详见 5 总结与展望第二段）：

1. 症状出现前的早期预警：针对 6-24 个月高风险婴幼儿群体，利用瞳孔光反射参数（潜伏期、收缩幅度、静息瞳孔直径）作为识别神经发育偏离风险的初筛线索。之所以以这一群体为起点，正是因为瞳孔测量无创、无需语言配合的特点使其尤其适用于低龄婴幼儿群体，而这一阶段正是行为症状尚不明确但神经发育偏离可能已经出现的窗口期；

2. 症状初现时的辅助诊断：针对因社会沟通问题就诊，但行为表现尚不典型的疑似孤独症的儿童，瞳孔测量可以作为现有行为评估的客观补充条件，辅助并缩短其明确诊断的时间。

意见 3：其他小问题：

1）展望部分，涉及以往研究内容或参考了相关研究时，需引用相关文献。

2）请进一步检查、完善语言，统一关键术语表达，例如，“荟萃分析”与“元分析”。多处出现“。提示孤独症儿童……”缺少主语。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已逐条修改您提出的建议：

1. 在展望部分补充了涉及以往内容的相关文献；

2. 我们已统一关键术语，并检查全文，已调整表述不完整的句子。

审稿人 2 意见：

该论文经过第一轮修改后，整体质量有了显著提升。作者对审稿人的意见进行了认真、系统且有针对性的回应，文章整体逻辑更清晰，前后衔接也更紧密。我还有一些建议供作者参考，主要涉及部分内容需要更清楚地表达。

意见 1：在讨论 Kercher 等人（2020）与 Nyström 等人（2018）关于相对收缩幅度的相反发现时，作者指出“该差异可能源于研究方法和测试的不同”。建议在此处简要说明具体差异。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已在相应部分补充说明具体差异。（详见 3.2.2 相对收缩幅度减小 第一段 6-14 行）

意见 2：文中提到“孤独症儿童的瞳孔反应主要表现为对社会刺激的反应减弱。例如, 研究发现孤独症儿童在看人类面孔（尤其是内部特征：眼鼻嘴）时, 瞳孔呈收缩状态, 而对照组则呈扩张状态”。此处需要澄清：“收缩”与“扩张”是相对于哪个基准点？通常而言，视觉刺激呈现后瞳孔会先短暂收缩再扩张。或者，作者仅仅想表达两组被试瞳孔大小有差异？

回应：感谢专家的宝贵意见！文中描述的收缩与扩张变化均以刺激呈现前的基线直径作为统一参照基准。首先，采用标准的基线校正方式，消除被试先天瞳孔大小、环境光照等个体与外部干扰因素，保证指标仅反映视觉刺激诱发的生理变化。在此标准下横向对比孤独症个体与典型发育个体的响应特征。基于该标准化指标可以发现，面对人脸等社会刺激时，孤独症个体的瞳孔多呈现收缩的特征，而典型发育个体则表现为正常的扩张，直观反映出孤独症群体对社会刺激的生理唤醒水平显著偏低。为了消除表述歧义，我们已在该部分明确这一瞳孔指标的参照标准。（详见 3.3.1 对社会和非社会刺激的瞳孔反应异常 第一段）

意见 3：作者将某些任务归为外源性或内源性注意定向，但举例与归类的逻辑不够清晰，引起本人困惑。比如：Hou 等人（2024）研究中出现了“指示”（cue），这通常与内源性注意相关，但本文将其归为对外源性刺激的定向研究。再如关于视觉搜索任务，如果没有指导语明确指导去搜索某个目标物、仅是被动观察刺激（孤独症研究很多都是被动观察），是否能算作“内源性注意”？

回应：感谢专家的宝贵意见！您指出文中在外源性/内源性注意定向分类上表述不够清晰的问题，让我们重新审视了相关内容。现就您提出的两个具体疑惑，逐一作出说明：

首先统一内源性注意和外源性注意的核心判定标准，为后续解释奠定基础：①内源性注意为自上而下的目标驱动加工，由被试主观任务意图、预设目标模板主动调控注意分配；②外源性注意属于自下而上的刺激捕获，依赖无预测价值的外周线索引发的反射性注意转移，被试无法依靠线索预判目标位置、主动调整注意策略。

1. 您提到“Hou 等人（2024）的研究中出现了‘指示’（cue），这通常与内源性注意相关，但本文将其归为对外源性刺激的定向研究。”实际上，我们的归类依据并非按照线索的呈现位置，而是线索的预测性。在 Hou 等人（2024）的研究中，作者明确说明，指示线索的方向是非预测性的，以确保参与者对目标的注视转移是自动的，而非依赖自愿注意。也就是说，被试无法主动利用该线索来调整注意策略，其注意转移只能被动地、反射性地被手势方向所吸引。结合王爱君等人（2016）的观点，非预测性、均等概率线索诱发的定向属于纯粹外源性注意捕获。因此，我们将 Hou 等人（2024）的研究归类为了外源性注意定向。由于先前未表述清晰，易引起困惑，我们已调整相关内容的表述。（详见 3.3.3 在注意定向任务中的瞳孔反应异常 第一段 2-5 行、8-10 行）

2. 您指出，如果缺乏明确的指导语、仅是被动观察，难以认定其为内源性注意，这一质疑非常中肯，精准抓住两类注意最核心的区分点（主动目标驱动 vs 被动刺激捕获）。在修改稿中，我们对视觉搜索任务的描述进行了强化，着重突显出其目标驱动的属性。需要说明的是，被试并非“被动观看”，而是主动依赖目标物（如寻找红苹果）在干扰物中持续搜索。例如，Keehn（2023）等人的研究中，研究者在正式实验前告知被试需要寻找垂直竖线，属于自上而下、目标驱动的内源性视觉搜索任务，被试全程依靠预先记住的目标特征主动扫描画面。即使在无法使用复杂口头指导语的低龄幼儿的研究中，研究者也会通过奖励强化和反复呈现来帮助被试建立内部目标特征，从而引导其主动搜索（Blaser et al., 2014）。此外，Bast 等人（2018）的研究同样将这类目标导向搜索统一归为内源性注意定向。因此，我们结合内源性注意和外源性注意的概念以及前人研究，将视觉搜索任务归类至内源性注意定向当中。

再次感谢您的细致审阅，帮助我们提升归类逻辑性与表述严谨性！

参考文献：

Hou, W., Zhao, W., & Li, J. (2024). Intact gesture cueing of attention but attenuated sensitivity to peripheral social targets in autistic children: An eye-tracking and pupillometric study. *Biological Psychology*, *191*, 108822.

王爱君, 刘晓乐, 李毕琴, 迟莹莹, 张明. (2016). 视觉空间注意的定向/重定向. *心理学探新, 36*(2), 117-122.

Keehn, B., Kadlaskar, G., & Keehn, R. M. (2023). Elevated and accelerated: Locus coeruleus activity and visual search abilities in autistic children. *Cortex, 169*, 118–129.

Blaser, E., Eglington, L., Carter, A. S., & Kaldy, Z. (2014). Pupillometry reveals a mechanism for the autism spectrum disorder (ASD) advantage in visual tasks. *Scientific Reports*, *4*, 4301.

Bast, N., Poustka, L., & Freitag, C. M. (2018). The locus coeruleus-norepinephrine system as pacemaker of attention-a developmental mechanism of derailed attentional function in autism spectrum disorder. *European Journal of Neuroscience*, *47*(2), 115–125.

意见 4：作者引用多发性硬化症群体的研究来说明潜伏期与白质异常的关系。此处“潜伏期”是指瞳孔光反射的收缩潜伏期吗，还是其他潜伏期指标，请明确。

回应：感谢专家的宝贵意见！此处为 PLR 收缩潜伏期，已在文中补充。（详见 4.1 自主神经调节失衡：感觉加工异常 第一段 8-12 行）

意见 5：Kleberg 等人研究应该发现声音促进 ASD 儿童对眼睛的定向而不是脱离。

回应：感谢专家的宝贵意见！已在相应位置修改。（详见 4.2 蓝斑-去甲肾上腺素（LC-NE）系统功能失调 第一段 2-4 行；4.2.2 在外源性注意定向任务中注意脱离困难 第一段倒数 1-8 行）

意见 6：作者提出“孤独症儿童的视觉搜索优势可能与其注意脱离困难存在关联”。本人很难理解这个逻辑，希望作者澄清下。直觉上，注意脱离困难（难以从当前目标转移）更可能损害而非促进视觉搜索效率，因为搜索需要在多个物体间快速转移注意。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们重新审视这部分内容发现，将“注意脱离困难”与“视觉搜索优势”直接关联，确实违背了认知加工的直觉，因为搜索效率的提高通常需要更灵活的注意转移，而非注意的黏滞。我们认同您的判断，在修改稿中，我们删除了“这种过度聚焦的注意可能与注意脱离存在发展上的联系”这一推测性表述，转而将孤独症儿童视觉搜索优势的机制归纳为两种更直接、更具实证支持的解释路径：（详见 4.2.2 在外源性注意定向任务中注意脱离困难 第二段）

1. 基于蓝斑-去甲肾上腺素系统的相位活动增强假说。孤独症儿童在视觉搜索任务中表现出更大的相位性瞳孔扩张，反映其蓝斑相位活动增强，这种增强会引发过度聚焦的注意状态，使他们对无关干扰刺激的抑制能力更强、更不易分心（Blaser et al., 2014; Kaldy et al., 2016）。因此，在复杂视觉搜索任务中表现更加。

2. 基于注意网络与左侧视野之间的关联。在 Keehn 等人（2023）的研究中发现，孤独症儿童在静息状态下的瞳孔直径显著大于典型发育儿童，这与其左侧视野偏向显著减弱存在关联。典型发育个体普遍存在左侧视觉优先扫视的习惯，由于孤独症个体不受该偏向的束缚，能够在全视野范围内更均匀地分配视觉注意（Keenh & Joseph, 2016），这同样可能有助于提升搜索效率。

参考文献：

Blaser, E., Eglington, L., Carter, A. S., & Kaldy, Z. (2014). Pupillometry reveals a mechanism for the autism spectrum disorder (ASD) advantage in visual tasks. *Scientific Reports*, *4*, 4301.

Kaldy, Z., Giserman, I., Carter, A. S., & Blaser, E. (2016). The mechanisms underlying the ASD advantage in visual search. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *46*(5), 1513–1527.

Keehn, B., Kadlaskar, G., & Keehn, R. M. (2023). Elevated and accelerated: Locus coeruleus activity and visual search abilities in autistic children. *Cortex*, *169*, 118–129.

Keehn, B., & Joseph, R. M. (2016). Exploring what's missing: What do target absent trials reveal about autism search superiority? *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *46*(5), 1686–1698.

意见 7：作者指出“孤独症儿童非典型的瞳孔反应，本质上反映了蓝斑-去甲肾上腺素系统调控功能异常：表现为紧张性活动水平偏高、相位性反应模式异常。”然而，在之前段落中，作者明确指出基线瞳孔直径（反映紧张性活动）的研究结果高度矛盾。作者需要说明这一矛盾。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们调整了 4.2 结论部分的核心表述，不再将问题一致归因为“紧张性活动水平偏好”，而是将其重新修改为“蓝斑-去甲肾上腺素系统紧张性-相位性动态耦合的失调”。这一修改基于以下考虑：其一，它能够包容现有文献中关于基线瞳孔直径方向不一致的矛盾证据；其二，它符合自适应增益理论（the adaptive-gain theory）的核心观点，即紧张性活动水平存在一个最佳区间，过高或过低都会削弱相位性反应的效能。（详见 4.2.2 在外源性注意定向任务中注意脱离困难 第三段）

意见 8：第 4.3 节讨论了孤独症个体对情绪面孔的瞳孔反应存在高低唤醒两种模式，并提到异质性受多种因素影响。目前的描述较为笼统。建议作者补充一两个具体例子说明这些因素如何影响唤醒模式，例如：在注视位置方面，有研究提示，当孤独症儿童注视眼睛区域时可能诱发过高唤醒，而注视非眼睛区域时则可能表现为唤醒不足（https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35119604/； https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39576114/； https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22787032/）。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们完全认同您的判断，并在修改稿中对该部分进行了实质性补充。（详见 4.3 杏仁核-前额叶调控异常：情绪唤醒调节失衡 第四段）

1. 补充了“视觉注视区域”作为关键调控因素的具体证据。我们采纳了您推荐的文献资料（Stuart et al., 2022），在修改稿中明确指出：孤独症个体注视人脸眼部区域时会诱发异常高唤醒，而注视非眼部区域时则表现出唤醒不足。这一证据直接揭示了注意模式与生理唤醒之间的内在关联，为理解孤独症个体情绪面孔加工异质性提供了具体机制解释。

2. 补充了“情绪效价”差异化影响的具体例证。我们结合 Nuske 等人（2014）和 Reisinger 等人（2020）的研究，明确指出：孤独症个体在加工恐惧面孔时多表现为瞳孔低唤醒状态，而面对快乐面孔时多呈现出过度扩张的高唤醒特征。这一对比使抽象“异质性”概念具体化为，可观察的效应方向性差异。

3. 除注视区域和情绪效价的具体例证外，我们还补充说明了面孔熟悉度（熟悉 vs 陌生）、

注视方向（直视 vs 回避）、注意动态分配（早期减少 vs 后期补偿）以及加工意识水平（无意识 vs 有意识）等调节因素，并指出这些因素共同反映了孤独症群体在情绪敏感性、神经调控及发展轨迹上的内部异质性。

参考文献：

Stuart, N., Whitehouse, A., Palermo, R., Bothe, E., & Badcock, N. (2022). Eye gaze in autism spectrum disorder: A review of neural evidence for the eye avoidance hypothesis. *Journal of Autism and Developmental Disorders, 53*.

Nuske, H. J., Vivanti, G., & Dissanayake, C. (2014). Reactivity to fearful expressions of familiar and unfamiliar people in children with autism: an eye-tracking pupillometry study. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, *6*(1), 14.

Reisinger, D. L., Shaffer, R. C., Horn, P. S., Hong, M. P., Pedapati, E. V., Dominick, K. C., & Erickson, C. A. (2020). Atypical social attention and emotional face processing in autism spectrum disorder: Insights from face scanning and pupillometry. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *13*(76), 1-14.

意见 9：作者提到“目前, 国内将瞳孔测量技术应用于孤独症领域的实证研究与理论探讨仍相对有限。现有研究多聚焦于瞳孔测量在心理学研究中的普遍应用（杨晓梦 等, 2020）, 或对孤独症群体瞳孔反应特征进行荟萃分析（de Vries et al., 2020）”。此处引用 de Vries 等人（2020）作为“国内研究”的例子是不恰当的，因为该研究并非国内学者的工作。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已在该部分删除了 de Vries 等人（2020）国外研究的例子。（详见 1 前言 第三段）

意见 10：全文中有少数句子偏长，建议作者适当拆分，以提升可读性。

回应：感谢专家的宝贵意见！我们已阅读全文，并将偏长的句子拆分，以提升可读性。

第三轮

审稿人 1 意见：作者很好地回应了审稿人的意见，我没有其他意见了。

编委意见：该稿件经过几轮修改，质量有所提高。建议在“5 总结与展望”中加上几个小标题，以帮助读者理解。同意修改后发表。

回应：感谢编委老师的宝贵意见，现已在“5 总结与展望”部分加上与段落相关的小标题。（详见 5 总结与展望）

主编意见：作者针对审稿人意见进行了认真回应和修改，同意发表。