

• 研究构想(Conceptual Framework) •

奖赏对短时程单眼剥夺效应的影响及机制*

宋方兴¹ 冯 广¹ 鲍 敏^{2,3}

(¹安徽医科大学精神卫生与心理科学学院, 合肥 231200) (²中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101) (³中国科学院大学心理学系, 北京 100049)

摘要 眼优势可塑性是大脑可塑性领域研究的热门问题。短时程单眼剥夺研究发现成人仍具有眼优势可塑性。目前, 如何有效地重塑成人眼优势仍是亟待解决的问题, 这与成年弱视的治疗密切相关。奖赏能够调节大脑可塑性, 奖赏与训练的结合能够提升学习效率、促进神经康复。然而, 奖赏是否能与短时程单眼剥夺相结合以促进成人眼优势的重塑目前尚不清楚, 其作用机制尚不明确。本研究拟采用行为与脑电从知觉和神经眼优势两个层面揭示奖赏增强单眼剥夺效应的现象; 结合行为、fMRI 和 TMS 技术阐明奖赏增强单眼剥夺效应的机制; 对比有无奖赏的短时程单眼剥夺范式, 验证引入奖赏的单眼剥夺对成年弱视的矫正效果。研究结果有助于丰富我们对大脑可塑性的认识, 推动成人眼优势重塑和弱视矫正的方法学创新。

关键词 奖赏, 眼优势, 可塑性, 单眼剥夺, 注意

分类号 B845

1 研究意义

大脑可塑性对个体的生存与发展至关重要, 它不仅是学习与记忆的基础, 还能够帮助大脑在遭遇损伤时通过重组神经通路来恢复功能, 同时也能帮助维持神经系统的稳定与平衡(Axelrod et al., 2023)。眼优势可塑性是研究大脑可塑性的重要窗口, 在弱视治疗中也发挥着重要作用。经典的神经科学研究认为眼优势可塑性只存在于生长发育的关键期中(Wiesel & Hubel, 1963)。近年来, 短时程单眼剥夺的研究则发现成年人中仍具有一定的眼优势可塑性(Castaldi et al., 2020)。并且, 这种短时程单眼剥夺效应在成年弱视患者中同样存在(Lunghi, Sframeli, et al., 2019; Zhou et al., 2019), 这为成年弱视的矫正提供了新的思路。然而, 目前关于这种短时程眼优势可塑性的发生机制尚不

完全清楚, 如何增强短时程单眼剥夺效应仍是限制其在临床应用的关键问题。

传统的短时程单眼剥夺研究主要通过操纵单眼视觉输入来影响眼优势可塑性(Lunghi et al., 2011; Zhou et al., 2014)。然而, 近期研究发现, 除视觉输入之外, 注意也能够对短时程眼优势可塑性进行调节(Song et al., 2023; Song, Dong, et al., 2024; Song, Lyu, & Bao, 2024), 这一发现开启了高级认知功能影响眼优势可塑性研究的新篇章。高级认知的反馈调节或许是增强短时程单眼剥夺效应的有效手段。奖赏能够调控注意, 大量研究表明奖赏可以作为一种 teaching 信号来引导注意选择(Anderson et al., 2021; Song et al., 2020; Song et al., 2021)。因此, 一个关键的科学问题是: 奖赏能否增强短时程单眼剥夺效应? 基于奖赏对注意的引导以及注意对眼优势可塑性的调节, 我们认为奖赏可能通过调控注意来影响短时程单眼剥夺效应。此外, 有研究表明奖赏能够不依赖于意识上的注意单独对奖赏眼的视觉加工产生影响(Dong et al., 2022)。所以, 奖赏也可能不依赖于注意直接对短时程单眼剥夺效应进行调节。

收稿日期: 2025-12-22

* 国家自然科学基金项目(32500940, 32471106)和安徽省教育厅科学研究项目(2025AHGXZK30021)资助。

通信作者: 宋方兴, E-mail: songfangxing@ahmu.edu.cn
鲍敏, E-mail: baom@psych.ac.cn

综上所述,为了阐明奖赏能否调节短时程单眼剥夺效应及其潜在的认知神经机制,本研究设计一种引入奖赏的短时程单眼剥夺范式,同时结合 EEG、fMRI 以及 TMS 技术展开研究。本研究具有重要的理论意义和实践价值。在理论意义上,本研究通过揭示自下而上的视觉输入(单眼剥夺)与自上而下的认知调节(奖赏)如何共同调控眼优势,完善对短时程眼优势可塑性的发生机制的了解。同时,了解这种交互作用有助于我们更好地理解大脑如何根据外部环境和内部认知状态调整其功能,丰富我们对人类视觉及大脑可塑性的认识。从实践意义上来说,成年弱视的治疗始终面临着重大挑战,现有临床治疗手段只对低龄儿童患者有效,而对成年弱视收效甚微。本研究结合奖赏和短时程单眼剥夺的方式有望更加有效地重塑成人眼优势,进而推动成年弱视治疗的方法学创新。

2 国内外研究现状评述

2.1 短时程单眼剥夺重塑成人眼优势

在视觉信息处理过程中,人类双眼系统表现出功能不对称性。一般情况下,大脑对一只眼输入的视觉刺激产生的反应会强于另一只眼,这种现象被称为眼优势,反应更强的眼睛则被称为优势眼(Porac & Coren, 1976)。眼优势的一种极端病态的表现就是弱视,这是一种由屈光参差、斜视或形觉剥夺等异常视觉经验引起的视觉皮层神经发育受损,且眼部无器质性病变的视觉障碍(Holmes & Clarke, 2006)。弱视通常表现为一只眼的视觉通路发生生理性改变并伴随视力下降,反映了正常视觉发育在生命早期受到干扰后所引发的一系列神经、知觉、眼动及临床功能异常(Levi, 2020; McConaghy & McGuirk, 2019)。目前,弱视治疗具有明显的时间敏感性,对处于关键期内的儿童疗效最佳,而随着年龄增长治疗效果显著下降,成年弱视患者的治疗效果有限且依从性低,因此临床上亟需探索更加有效、可推广的干预策略。

眼优势并非一成不变,会受外界视觉经验的影响而发生转移,表现出可塑性。例如,在 Wiesel 和 Hubel 的经典研究中,通过对出生几周小猫的一只眼的眼皮进行缝合(剥夺眼),使其不能接受视觉输入。几个月之后发现代表剥夺眼的 LGN 萎

缩, V1 的眼优势柱重组,眼优势转向支持未剥夺眼,只有少数的神经元还对剥夺眼进行反应(Wiesel & Hubel, 1963)。利用这种单眼遮盖所诱发的长时程眼优势可塑性,对处于关键期内的弱视儿童进行长时间遮盖健眼的治疗,可以显著提升弱视眼的视力,有效治疗弱视(Levi, 2020; McConaghy & McGuirk, 2019)。此外, Wiesel 和 Hubel 也对成年猫进行三个月的单眼缝合,发现双眼神经眼优势并没有发生改变(Wiesel & Hubel, 1963),表明眼优势可塑性在生长发育的关键期内具有最大的潜能,成年后的眼优势则保持相对稳定。然而, Lunghi 等(2011)发现对成人的一只眼睛进行短时程(2.5 小时)的单眼遮盖剥夺后(图 1),双眼竞争任务中剥夺眼占据主导的时间会增长,非剥夺眼的主导时间则相应缩短,表明眼优势会向剥夺眼转移。这种短时程的单眼剥夺效应表明成人的视觉皮层仍然具有一定的可塑性。



图 1 短时程单眼剥夺实验流程图

短时程单眼剥夺效应受到多种因素的调节。首先,视觉输入的图像属性被证明是影响该效应的重要因素。研究发现,即使不对剥夺眼的视觉输入进行完全阻断,仅对其部分信息进行剥离,同样可以诱发单眼剥夺效应,且该效应会受视觉信息被剥离的程度和类型所影响(Bai et al., 2017; Lyu et al., 2020; Wang et al., 2017; Yao et al., 2017)。比如,将剥夺眼内视觉输入的对比度降低到 20%,能够引起眼优势转移,但降低到 40%则无法产生该效应(Zhou et al., 2014);剥夺高空间频率成分能够引起眼优势转移,而剥夺低空间频率成分则不能(Zhou et al., 2014)。此外,除了图像能量信息之外,剥夺图像的相位信息同样能够产生单眼剥夺效应,并且该效应在双眼相位整合任务和双眼竞争任务中的表现存在差异(Bai et al., 2017; Lyu et al., 2020; Zhou et al., 2014)。关于图像属性对短时程单眼剥夺效应的影响,我们已在之前的综述文章中进行了详细论述(宋方兴等, 2023),本文不再赘述。其次,运动被认为是另一

种潜在的调节因素。受到发现体育锻炼能够调节视觉皮层可塑性的动物研究的启发(Baroncelli et al., 2012; Baroncelli et al., 2010; Sale et al., 2007), Lunghi 和 Sale (2015)在成人中考察了单眼剥夺期间运动的作用。结果显示, 与静坐条件相比, 在剥夺过程中进行间歇性骑行可增强单眼剥夺效应。然而, 随后多项研究采用不同的眼优势测量范式(如双眼竞争、双眼整合和离眼周边抑制)均未能重复该结果(Baldwin et al., 2022; Finn et al., 2019; Zhou et al., 2017), 表明运动对成人短时程眼优势可塑性的促进作用仍有待进一步验证。此外, 研究还发现个体生理状态同样会影响短时程单眼剥夺效应。例如, 研究发现随着体重指数(BMI)的增加, 单眼剥夺效应逐渐减弱(Lunghi, Daniele, et al., 2019)。而在进行减肥手术之后, 肥胖者的眼优势可塑性则能够恢复(Daniele et al., 2021)。近期研究进一步指出, 睡眠也会显著调节短时程单眼剥夺效应(Menicucci et al., 2022)。具体而言, 在单眼剥夺结束后立即进入睡眠状态, 可以使剥夺效应持续6小时以上, 远超通常观察到的30分钟至1小时的效应持续时间。此外, 动物研究发现短暂的黑暗暴露能够增强大脑皮层可塑性(Mitchell et al., 2016; Mitchell & Maurer, 2022)。受这些研究的启发, 有研究者考察了短暂的黑暗暴露能否增强成人的眼优势可塑性(Min et al., 2023)。研究发现, 单独的黑暗暴露不会引起眼优势变化, 而在单眼剥夺前进行短暂的黑暗暴露则可显著增强随后的剥夺效应, 表明黑暗暴露能够提高成人眼优势可塑性。除了上述外源因素之外, 个体内在神经状态也可能对短时程单眼剥夺效应产生影响。已有研究表明, 在黑暗环境中睁眼与闭眼会引起显著不同的大脑活动模式(Boytsova & Danko, 2010)。基于此, 研究者通过操纵单眼剥夺过程中剥夺眼的睁与闭来探究内在神经状态对单眼剥夺效应的影响(Chen, Gao, et al., 2023)。结果表明, 单眼剥夺效应受到内部状态的影响, 当剥夺眼保持睁眼时剥夺效应更大。综上所述, 短时程眼优势可塑性并非仅由视觉输入本身驱动, 而是受到多种外源因素与内在神经状态共同调节, 反映出其复杂的调控机制。

除了知觉层面引起的眼优势转移外, 短时程单眼剥夺还能够在神经水平上诱导初级视觉皮层(V1)的眼优势发生变化, 使其向剥夺眼转移。具体

而言, EEG 研究发现, 在短时程单眼剥夺之后, 剥夺眼的视觉诱发电位最早成分(C1)的振幅增加, 而非剥夺眼 C1 成分的振幅降低(Federici et al., 2023; Lunghi, Berchicci, et al., 2015)。在时频域中, 剥夺眼的 alpha 频段去同步化(> 200 ms)振幅显著增强, 而非剥夺眼则呈现下降趋势(Federici et al., 2023)。稳态视觉诱发电位(SSVEP)研究同样发现在剥夺结束之后, 剥夺眼在枕叶区域的 SSVEP 振幅增加(Lyu et al., 2020; Zhou et al., 2015)。此外, fMRI 研究进一步证实, 短时程单眼剥夺能够增强 V1 内剥夺眼的血氧水平依赖(BOLD)信号反应, 同时抑制非剥夺眼的 BOLD 反应(Binda et al., 2018)。值得注意的是, 短时程单眼剥夺诱发的眼优势转移还伴随着皮质内兴奋/抑制平衡的变化: 在单眼剥夺后 γ -氨基丁酸(Gamma-aminobutyric acid, GABA)浓度(通过 V1 的磁共振波谱测量)下降(Lunghi, Emir, et al., 2015), 缓慢瞳孔震荡的振幅增加(Binda & Lunghi, 2017), 表明胆碱能和去甲肾上腺素能系统也参与其中。最近, 研究者发现除 V1 之外, 人类视觉丘脑也具备这种短时程的可塑性(Kurzawski et al., 2022)。他们采用 7T fMRI 探究外侧膝状体和丘脑枕核在单眼剥夺前后的激活变化, 发现短时程单眼剥夺增强了腹侧丘脑枕核内剥夺眼的 BOLD 反应, 同时抑制非剥夺眼的 BOLD 反应, 并且这种变化与知觉眼优势的变化之间呈显著正相关。之后, 研究者又进一步探究了丘脑枕核与 V1 之间的功能连接与单眼剥夺效应之间的关系(Acquafredda et al., 2025), 发现单眼剥夺前丘脑枕核到 V1 的连接与知觉眼优势的变化之间呈显著负相关, 表明丘脑枕核对 V1 影响越大的被试可塑性越低。这些结果突出了丘脑-皮层环路在短时程眼优势可塑性中的作用。

更重要的是, 有研究发现对成年弱视患者进行 2.5 小时的单眼剥夺之后, 其剥夺眼(弱视眼)的眼优势得到增强(Zhou et al., 2013), 表明弱视视觉系统中也存在短时程眼优势可塑性。由于在治疗过程中是对弱视眼进行遮盖剥夺, 与弱视的常规遮盖治疗方法相反, 因此有研究者称这种短时程单眼遮盖剥夺方法为“反向遮盖”(Zhou et al., 2019)。值得注意的是, 早在 1950s, 就有研究者采用对弱视眼进行遮盖的反向遮盖方法对弱视进行治疗(Bangerter, 1953), 但由于治疗效果弱于遮盖健眼的常规遮盖疗法而被逐渐弃用。与长时程的

反向遮盖相比,短时程单眼剥夺能够对成年弱视患者起作用,这为成年弱视矫正开辟了新的途径。后续有研究进一步证明短时程单眼剥夺对弱视的治疗效果具有显著的时间累积效应(Lunghi, Sframeli, et al., 2019; Zhou et al., 2019)。Lunghi 等人对弱视患者在四周内进行了6次的短时程单眼剥夺训练,发现训练之后弱视眼的视力出现了显著的提升。而Zhou等人则对弱视患者进行了为其两个月的日常训练,发现训练结束之后不仅弱视眼的视力出现显著提升,双眼平衡和立体视觉也出现了明显改善。这一发现提示,如果能够增强每次的短时程单眼剥夺效应,将有望显著提升短时程单眼剥夺对弱视的治疗效果。因此,如何增强和延长短时程单眼剥夺效应,是采用短时程单眼剥夺进行弱视治疗所需要解决的一个关键问题。

最近有研究发现注意能够对眼优势以及眼优势可塑性产生影响,这些发现为改善传统基于视觉输入的单眼剥夺范式提供了新的理论依据。下面将展开介绍这部分研究。但在此之前,我们首先对注意在眼优势和眼优势可塑性中的调节作用进行区分。眼优势是一种实时状态,比如在双眼竞争任务中一只眼主导意识的时长比另一只眼更多,则表明该眼是优势眼。注意对眼优势的影响是指通过特定范式操纵注意,以此来引起眼优势的变化。而注意对眼优势可塑性的影响则是指注意对眼优势变化的影响。比如,本研究关注短时程单眼剥夺所引起的眼优势变化(即短时程单眼剥夺效应)。那么,在此框架下,注意对眼优势可塑性的影响表现为注意影响了短时程单眼剥夺所产生的单眼剥夺效应。接下来,我们将分别对这两部分内容的研究进展展开论述。

2.2 注意对眼优势的影响

在经典的短时程单眼剥夺范式中,研究者通过完全阻断单侧眼的视觉输入来实现形觉剥夺。然而,这种范式在视觉输入层面难以进一步强化短时程单眼剥夺效应。值得注意的是,在单眼剥夺过程中,除了视觉输入的不对称之外,注意资源在两条单眼通路间的分配也不平衡。因此,一个重要的问题随之产生:注意本身是否能够对眼优势进行调节?针对这一问题,研究者近期开展了一系列研究并取得了重要进展。

首先,有研究通过操纵视觉输入的空间结构关系来探究注意对眼优势的影响(Wang et al.,

2021)。在该研究中,相同的图像离眼呈现在两眼内,但一只眼上放置了普罗棱镜(Porro prism)进而使该眼看到的图像是上下颠倒的。由于正立图像更加具有生物学意义,所以研究者推测被试会选择性的注意正立图像,进而使得注意分配在两眼间存在差异。结果显示,在2.5小时的注意训练之后,接收倒置图像眼睛的眼优势得到增强,表明基于眼的注意可能诱发了眼优势转移。然而,该研究没有直接去测量注意是否更多的分配在正立图像中,且倒置图像会导致两眼内图像轮廓信息的不匹配,因此关于注意在眼优势转移中的作用还需要进一步研究。

最近,我们设计了一种新颖的离眼倒放视频适应范式,用以探究基于眼的注意对眼优势的调节作用(Song et al., 2023)。在该范式下,被试一只眼观看正常播放的视频图像(即注意眼),另一只眼则观看相同但时间上倒放的视频图像(即非注意眼)。由于倒放视频无意义且缺乏逻辑性,所以被试为了更好地理解剧情,在观看视频时会主观地将注意更多地投入到注意眼内,从而导致注意分配在两眼间存在差异。因此,该范式能在保持两眼所接收图像内容基本一致的前提下,引导被试将更多的注意资源主动分配至其中一只眼(即观看正放视频的眼)。研究发现,经过对一只眼的持续注意之后,眼优势向非注意眼进行转移,表明基于眼的注意能够诱发眼优势可塑性。此外,我们结合fMRI和TMS技术进一步探究基于眼的注意调节眼优势的神经机制并为其提供了直接的因果证据(Song, Dong, et al., 2024)。在fMRI实验中,我们对比了被试在离眼条件(一只眼呈现正放画面而另一只眼呈现倒放画面)和双眼条件(两眼皆呈现正放画面)中的大脑激活情况,发现与双眼条件相比,离眼条件下负责调控自上而下注意分配的背侧注意网络中的额叶眼动区(frontal eye field, FEF)、顶内沟(intraparietal sulcus, IPS)以及顶上小叶(superior parietal lobule, SPL)存在更强激活,表明离眼条件下有更强的注意投入。在随后的TMS实验中,我们采用cTBS分别对FEF、IPS以及作为控制靶点的顶点(vertex)进行抑制,发现只有对FEF功能进行抑制后离眼倒放视频不再引起眼优势的变化,为FEF在控制基于眼的注意调控眼优势中的关键性作用提供了因果证据。此外,为了解释注意诱发的眼优势转移效应,我们根

据双眼竞争的眼拮抗神经元(ocular opponency-neuron)模型(Said & Heeger, 2013)提出了拮抗神经元的适应机制(Song et al., 2023)。该机制认为在观看离眼倒放视频的过程中,接收注意眼兴奋和非注意眼抑制的拮抗神经元会被激活更长时间,进而比接收非注意眼兴奋和注意眼抑制的拮抗神经元产生更强的适应,从而使它们的活动产生更大幅度的降低。在随后的双眼竞争任务中,这种拮抗神经元适应的不平衡会导致非注意眼接受的反馈抑制弱于注意眼,使得非注意眼的眼优势增强。随后,我们采用 SSVEP 技术,以交互调制频率的 SSVEP 反应作为反映拮抗神经元活动的指标,为拮抗神经元的适应机制提供了直接的神经证据(Song, Lyu, & Bao, 2024)。综上所述,这些研究为注意能够诱发眼优势可塑性提供了证据,拉开了高级认知功能影响眼优势可塑性的研究帷幕。视觉输入的前馈影响与高级认知的反馈调节之间的结合或许是增强短时程眼优势可塑性的有效途径,但这需要进一步的研究。

2.3 注意对短时程单眼剥夺效应的调节

除了注意本身能否调节眼优势之外,近年来,研究者逐渐开始关注短时程单眼剥夺和注意之间能否发生交互作用的问题,但相关研究结论尚未达成一致。比如,Chen 等(2020)通过动作电子游戏来探究注意能否调节短时程单眼剥夺效应。该研究设计了三种实验条件,要求被试在单眼剥夺期间分别进行动作电子游戏(如王者荣耀),观看动作电子游戏视频或进行非动作电子游戏(如扫雷)。结果显示,这三种条件均产生了剥夺效应,但彼此之间并没有显著差异,表明注意可能对短时程单眼剥夺效应进行调节。然而,最近有研究进一步探究了注意对短时程单眼剥夺效应的影响。例如,Wang 等(2025)要求被试在单眼剥夺期间完成一项注意追踪任务,发现当注意追踪目标与眼优势测量阶段的测试光栅相一致时(比如都是红绿光栅)会产生更大的短时程单眼剥夺效应。此外,研究者发现在单眼剥夺阶段减少对非剥夺眼内刺激的注意之后会减弱短时程单眼剥夺效应(Chen & Cai, 2025)。他们设置了三种条件:在注意条件中被试需要关注呈现在非剥夺眼内图片的类型并做出反应;在非注意条件中被试需要关注注视点的变化并做出反应;而在被动观看条件中被试只需要被动观看图片,没有额外任务。结果显示,与

被动观看条件相比,非注意条件下的短时程单眼剥夺效应出现显著减弱,而注意条件与被动观看条件的剥夺效应之间没有差异。这些研究表明,注意能够调节短时程单眼剥夺效应。

对比上述得出不同结论的研究,可发现它们各自存在一定的局限性。首先,Chen 等(2020)在视频观看条件中仅向被试展示了视频图像而未播放声音。这可能导致被试需要投入更多的注意到视频中,以便更好地观看和理解内容。而在扫雷游戏中,被试同样需要集中注意并进行思考。因此,不同实验条件之间可能并未在注意投入水平上形成显著差异,这或许是导致剥夺效应无组间差异的原因之一。另一方面,Wang 等(2025)采用实验室刺激,要求被试仅对特定视觉特征进行注意。这种设计虽然能够精确操控注意资源的分配,但只有极少数的视觉神经元被调节,缺乏生态效度;而 Chen 和 Cai (2025)采用减少注意的方式削弱单眼剥夺效应,无法考察注意对单眼剥夺效应的正向调节。因此,这些实验范式在转化为实际应用(如弱视矫正)时面临挑战。综上所述,目前有关注意调节短时程单眼剥夺效应的研究存在一定局限,视觉输入与高级认知之间能否发生交互作用进而促进成人眼优势的重塑仍需进一步的研究。

2.4 奖赏对注意及视知觉的调节

奖赏能够调节大脑可塑性,奖赏与训练的结合能够提升运动学习效果、促进神经康复(Johnson & Cohen, 2022)。基于此,奖赏与短时程单眼剥夺相结合,可能为促进成人眼优势重塑提供一种新的有效途径。从机制上看,奖赏调节短时程单眼剥夺效应至少可能通过两条相对独立但并不互斥的路径发挥作用。一方面,奖赏可能通过调控注意来影响短时程单眼剥夺效应。大量研究表明,奖赏能够显著影响注意选择与资源分配(Anderson et al., 2021)。当目标刺激与预期奖赏建立关联时,个体对目标的加工速度显著提升(Grignolio et al., 2024; Wang et al., 2019; Wei & Ji, 2021; 王宴庆 等, 2019),同时背侧注意网络(如顶内沟和额上回)的神经活动也显著增强(Etzel et al., 2016)。更为重要的是,一旦刺激与奖赏形成联结后,即使奖赏不再出现,该刺激仍然能够自动地捕获注意,这一现象被称为价值驱动的注意捕获(Anderson et al., 2011; Chen, Chen, et al., 2023; Vakhrushev & Pooresmaeili, 2024; 周星 等,

2023)。这些结果表明, 奖赏可以作为一种 teaching 信号, 通过调节注意选择来优化行为表现 (Anderson, 2017; Chelazzi et al., 2013)。我们的前期研究也支持这一观点, 发现奖赏能够影响注意资源的分配 (Song et al., 2020; Song et al., 2021; Zhao et al., 2020)。因此, 在短时程单眼剥夺范式中, 如果非剥夺眼与奖赏建立关联, 奖赏可能通过引导注意偏向非剥夺眼内输入, 从而间接放大或调节眼优势可塑性的表现。

另一方面, 奖赏也可能不依赖于注意直接调节早期视觉加工和视知觉可塑性。早在 2006 年, 一项发表于 Science 的动物研究发现, 成年大鼠初级视觉皮层中的部分神经元能够准确预测奖赏时间, 表明奖赏预测这种“高级”认知信号可以在感觉加工的早期阶段被编码 (Shuler & Bear, 2006)。近年来, 人类研究也提供了奖赏调节视知觉的直接证据。例如, Zhang 等 (2018) 发现奖赏能够增强视知觉学习, 提示奖赏可能通过强化感觉表征本身来促进可塑性。更进一步的研究表明, 即使在无意识状态下, 奖赏仍然能够影响视知觉加工 (Cheng et al., 2021; Dong et al., 2022; Lunghi & Pooremaeili, 2023)。比如, 无意识刺激与高奖赏相联结时能够提高刺激识别准确率 (Cheng et al., 2021), 增强刺激突破眼间抑制的速度 (Lunghi & Pooremaeili, 2023)。此外, Dong 等 (2022) 的研究发现在 b-CFS 任务中对一只眼进行奖赏能够使出现在该眼内的刺激更快地突破 CFS 抑制, 表明奖赏能够不依赖于意识上的注意单独对奖赏眼的视觉加工产生影响。因此, 在短时程单眼剥夺过程, 奖赏有可能不依赖于注意调节, 而是直接增强被奖赏眼或相关视觉输入的神经表征, 从而改变剥夺后眼优势转移的幅度或持续时间。综上所述, 奖赏对短时程眼优势可塑性的调节可能既包括通过注意选择实现的间接调节路径, 也包括直接作用于视觉加工与眼优势可塑性的路径。区分厘清这两种机制, 不仅有助于深化我们对短时程眼优势可塑性内在机制的理解, 也为探索更有效的重塑成人眼优势的干预手段提供了重要的理论依据。

3 问题提出

综上所述, 虽然近年来成年人的短时程单眼剥夺效应已经得到较多关注, 但其内在机制尚不完全清楚。如何增强和延长短时程单眼剥夺效应

仍是限制其在临床应用的关键问题。尽管已有研究尝试通过注意来增强短时程单眼剥夺效应, 但存在一定局限。考虑到奖赏对注意和视知觉的调节作用, 奖赏或许可以成为增强短时程单眼剥夺效应的关键因素。因此, 本研究采用引入奖赏的短时程单眼剥夺范式, 同时结合 EEG、fMRI 以及 TMS 技术考察奖赏对短时程单眼剥夺效应的调节及其认知神经机制。本研究将从以下三个角度展开研究:

第一, 奖赏能否调节短时程单眼剥夺效应?

本研究将采用行为和 EEG 技术, 在短时程单眼剥夺过程中对非剥夺眼进行奖赏, 通过比较奖赏条件与非奖赏条件间短时程单眼剥夺效应的差异, 从知觉和神经眼优势两个层面系统地回答奖赏能否调节短时程单眼剥夺效应的问题。我们假设, 奖赏能够增强短时程单眼剥夺效应。

第二, 奖赏如何调节短时程单眼剥夺效应?

考虑到奖赏对注意和视知觉的影响以及注意对眼优势可塑性的调节作用, 我们提出奖赏调节短时程单眼剥夺效应的双通路模型 (图 2): 一方面, 奖

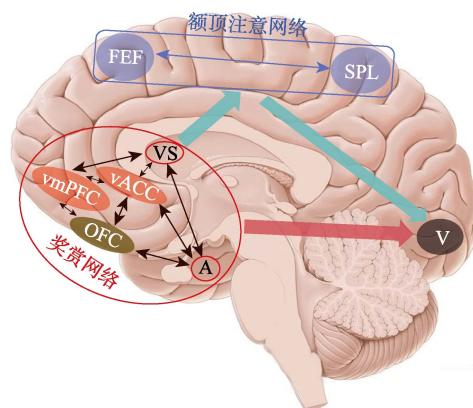


图 2 奖赏调节短时程单眼剥夺效应的双通路模型图。我们假设, 奖赏能够通过两条路径来调节短时程单眼剥夺效应: 一方面, 奖赏可以通过调控注意来调节单眼剥夺效应 (绿色箭头所示); 另一方面, 奖赏或许可以不依赖于注意直接对单眼剥夺效应进行调节 (红色箭头所示)。图中显示了奖赏与注意的神经基础: 其中, 奖赏加工网络包含腹内侧前额叶皮层 (ventromedial prefrontal cortex, vmPFC)、眶额叶皮层 (orbitofrontal cortex, OFC) 和腹侧前扣带回皮层 (ventral anterior cingulate cortex, vACC) 为主的皮层区域以及腹侧纹状体 (ventral striatum, VS) 和杏仁核 (amygdala, A) 等皮下区域; 而负责加工自上而下注意的额顶注意网络主要由额叶眼动区 (FEF) 和顶上小叶 (SPL) 等脑区组成。V 代表视觉皮层。彩图见电子版。

赏可以通过调控注意来调节短时程单眼剥夺效应; 另一方面, 奖赏也可能不依赖于注意直接对短时程单眼剥夺效应进行调节。为了验证这一模型, 阐明奖赏调节短时程单眼剥夺效应的潜在机制, 本研究将结合行为、fMRI 和 TMS 技术展开研究。首先, 通过行为实验初步探究奖赏能否不依赖于注意直接调节短时程单眼剥夺效应。然后, 结合 fMRI 和 TMS 技术对奖赏和注意的因果作用进行验证。如果抑制奖赏脑区和抑制注意脑区会对奖赏效应产生相同程度的影响, 则表明奖赏只通过注意调节单眼剥夺效应; 如果只有抑制奖赏脑区才会对奖赏效应产生影响, 则表明奖赏只能单独调节单眼剥夺效应; 如果抑制奖赏脑区和抑制注意脑区都会导致奖赏效应的减弱, 且前者效果更大, 则表明两条机制都发挥作用。

第三, 引入奖赏的短时程单眼剥夺能否更加有效地矫正成年弱视? 本研究的主要目的是考察

引入奖赏的短时程单眼剥夺对成人眼优势的重塑, 以便推动成年弱视治疗的方法学创新。因此, 我们在健康群体中探明奖赏调节短时程单眼剥夺效应的机制之后将引入奖赏的短时程单眼剥夺范式应用于成年弱视群体, 并将其与传统的短时程单眼剥夺方法进行比较, 以验证其对成年弱视的矫正效果。我们假设, 引入奖赏的短时程单眼剥夺能够更加有效地矫正成年弱视。

4 研究构想

本研究围绕“如何促进成人眼优势重塑”的问题, 采用创新的引入奖赏的短时程单眼剥夺范式, 结合行为、EEG、fMRI 和 TMS 技术, 系统地考察奖赏对短时程单眼剥夺效应的影响及其认知神经机制。总体框架如图 3 所示。

4.1 奖赏对短时程单眼剥夺效应的影响

研究 1 采用引入奖赏的短时程单眼剥夺范式

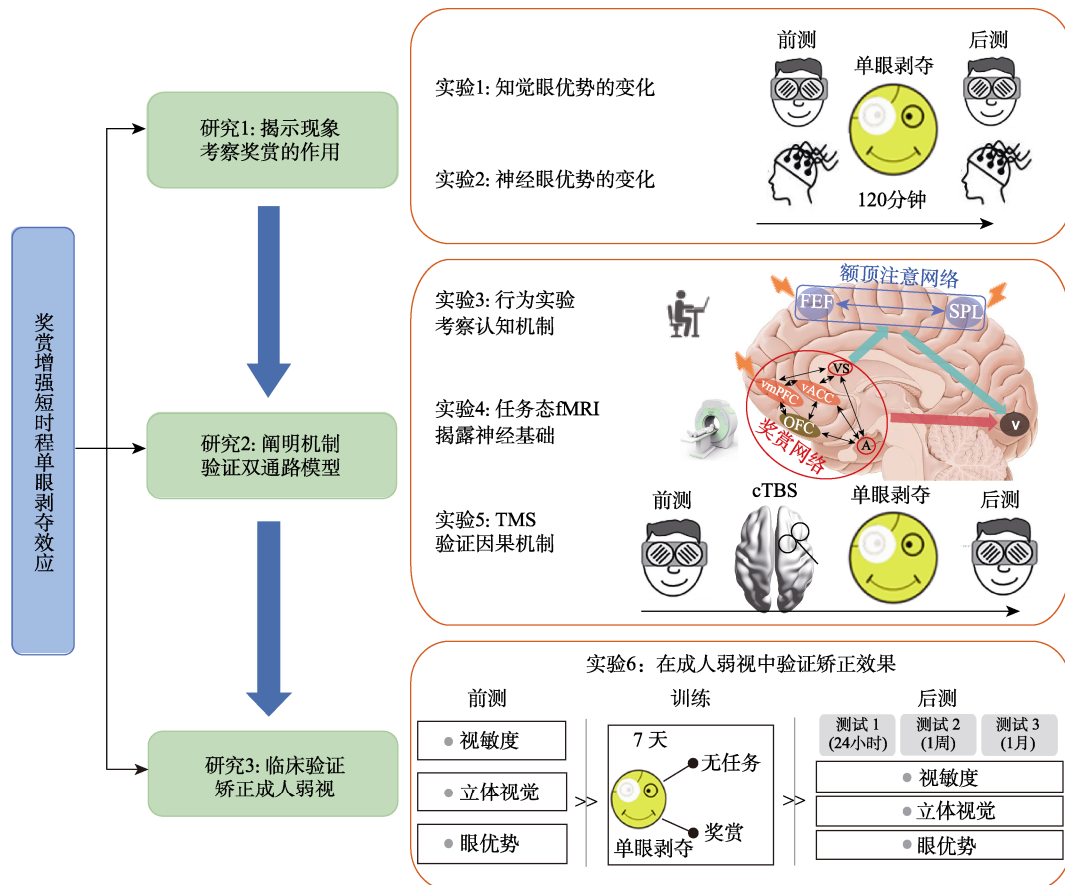


图 3 研究总体框架图

(在单眼剥夺过程中对非剥夺眼进行奖赏), 通过比较奖赏与非奖赏条件间单眼剥夺效应的差异来考察奖赏能否增强短时程单眼剥夺效应。研究 1 包含 2 个实验。实验 1 在单眼剥夺前后采用双眼竞争任务测量知觉眼优势, 从知觉层面考察奖赏对短时程单眼剥夺效应的影响。双眼竞争刺激由两个正交的正弦光栅组成, 方向为 $\pm 45^\circ$, 离眼呈现在视野中央。被试的任务是通过按住相应的键盘按键(左键, 右键, 下键)去报告所知觉到的光栅朝向(-45° , $+45^\circ$, 两个方向的混合)。为了量化知觉眼优势, 我们计算了眼优势指标(ODI)。该指标根据前后测中双眼竞争任务的动态知觉数据计算得出。使用公式 $T_{DE} / (T_{DE} + T_{NDE})$ 计算眼优势指标, T_{DE} 和 T_{NDE} 分别代表知觉到剥夺眼刺激和非剥夺眼刺激的总时长, 分数范围从 0 (非剥夺眼完全优势)到 1 (剥夺眼完全优势)。在单眼剥夺阶段, 被试需要完成一项目标探测任务。目标是一个圆形 blob, 当目标出现时被试需要对目标的缺口朝向(左或右)做出判断。被试需要完成两组任务: 奖赏组和非奖赏组。在奖赏组中, 被试对目标做出正确反应后会获得奖赏反馈; 而在非奖赏组中, 被试做出正确反应后只会获得反应正确的反馈, 没有奖赏。我们假设, 在奖赏条件和非奖赏条件下都存在显著的短时程单眼剥夺效应(即后测的眼优势指标大于前测), 并且奖赏条件下的短时程单眼剥夺效应会大于非奖赏条件。

实验 2 在前后测中, 采用交替单眼视觉刺激呈现任务并同步记录 EEG 信号。在该任务中, 通过交替遮盖单眼, 将视觉刺激单独呈现于另一只眼, 从而分别获得每只眼的视觉诱发电位。实验 2 在单眼剥夺阶段的任务与实验 1 相同。通过进行 ERP 和时频分析测量神经眼优势, 考察奖赏在神经层面对短时程单眼剥夺效应的影响。我们假设, 奖赏会增强短时程单眼剥夺对神经眼优势的调节。

4.2 奖赏调节短时程单眼剥夺效应的潜在机制

根据奖赏对注意和视知觉的影响以及注意对眼优势可塑性的调节作用, 本研究提出奖赏调节短时程单眼剥夺效应的双通路模型(图 2): 一方面, 奖赏可以通过调控注意来调节短时程单眼剥夺效应; 另一方面, 奖赏也可能不依赖于注意直接对短时程单眼剥夺效应进行调节。研究 2 旨在验证这一模型, 以阐明奖赏调节短时程单眼剥夺效应

的潜在机制。

研究 2 包含 3 个实验。实验 3 探究任务无关的奖赏(即不依赖注意的奖赏)能否调节短时程单眼剥夺效应, 以此揭示其认知机制。实验 3 的任务与流程和实验 1 类似, 只在目标探测任务中奖赏刺激的呈现方式上有所不同。在实验 3 中, 奖赏刺激不再作为按键反应后的实时反馈出现, 而是在每个试次中随机呈现, 其出现与目标刺激及被试的反应均无关。此操作的目的是将奖赏刺激与任务目标解绑, 从而使奖赏条件中呈现的奖赏成为任务无关的奖赏。当奖赏与任务无关时, 被试为获得奖赏而向任务投入更多注意资源的动机便不存在。因此我们推断, 在呈现任务无关奖赏时, 被试在奖赏与非奖赏条件中的注意状态相近, 但奖赏条件下单眼通路仍会接收到奖赏信号。根据双通路模型, 如果奖赏只通过调节注意来影响单眼剥夺效应, 那么实验 3 不会观察到显著的奖赏效应; 如果奖赏能够不依赖于注意直接调节单眼剥夺效应, 那么实验 3 会观察到奖赏效应。倘若存在奖赏效应, 还可将实验 3 的奖赏效应与实验 1 进行比较, 如果实验 1 的奖赏效应显著大于实验 3, 则两条机制可能都发挥作用。

实验 4 和实验 5 则是结合 fMRI 和 TMS 技术对奖赏和注意所起到的因果作用进行验证。首先, 实验 4 采用任务态 fMRI, 考察了与非奖赏条件相比, 奖赏条件会引起哪些脑区更强的激活, 以寻找奖赏发挥作用的神经基础。实验 4 采用的任务与实验 1 中目标探测任务一致, 采用 block 设计, 包含两种条件: 奖赏条件和非奖赏条件。数据分析使用 AFNI 进行。首先进行预处理, 包括时间矫正、空间配准、空间平滑以及标准化。然后对预处理后的数据进行一般线性模型分析, 通过将表征任务 Block 时间的 boxcar 函数与典型血流动力学响应函数进行卷积, 为每种条件(奖赏、非奖赏)创建任务回归因子。之后, 提取所有被试的回归系数或 β 权重进行组分析。在组分析中, 使用 AFNI 程序 '3dttest ++' 对奖赏条件和非奖赏条件之间的差异进行配对样本 t 检验。同时, 使用 '-Clustsim' 选项对 t 检验的结果进行多重比较矫正 (3dClustSim)。我们假设与非奖赏条件相比, 奖赏条件下的奖赏加工网络(如 vmPFC、OFC 等)和额顶注意网络(FEF、SPL 等)会有更强的激活

实验 5 通过分别对奖赏相关脑区和注意相关

脑区施加 cTBS 以抑制其功能, 并观察奖赏效应的变化, 从而揭示奖赏调节短时程单眼剥夺效应的因果机制。我们计划使用带有 70 mm 标准 8 字线圈的 Magstim Rapid² 刺激器来施加 cTBS。cTBS 刺激采用离线模式进行三脉冲刺激。刺激包含 267 个脉冲矩阵(burst), 每个脉冲矩阵包含 3 个 30 Hz 的脉冲, 以 6 Hz 的频率进行重复, 共有 801 个脉冲, 持续刺激 44 s (Cazzoli et al., 2009; Song, Dong, et al., 2024)。为了延长 cTBS 的抑制作用时长, 我们对同一靶点连续施加两次 cTBS, 两次刺激之间间隔 15 分钟。这种刺激模式已被证明可以延长 cTBS 的作用时间至 2 小时以上(Goldsworthy et al., 2012; Nyffeler et al., 2006), 可以保证在单眼剥夺过程中被刺激脑区一直处于抑制状态。刺激强度为个体静息运动阈限(resting motor threshold, RMT)的 80%。我们计划基于实验 4 的结果, 从奖赏条件下表现出更强激活的奖赏和注意网络中选择适合的皮层区域作为 cTBS 刺激的脑区, 例如 mPFC 和 FEF。此外, 我们还将对顶点(vertex)施加 cTBS 刺激以进行对照。为了精确考虑个体间的大脑结构差异, 我们使用 Brainsight 2 神经导航系统, 将目标靶点的 MNI 坐标映射到每位被试的 T1 加权像上。同时, 通过 Brainsight 2 的实时追踪功能, 我们能够持续监测 TMS 线圈的位置, 确保其在实验过程中始终对准目标脑区。实验 5 的任务与实验 1 相同, 只是在单眼剥夺阶段开始前增加了 cTBS 刺激。根据双通路模型, 如果抑制奖赏脑区和抑制注意脑区会对奖赏效应产生相同程度的影响, 则表明奖赏只通过注意调节单眼剥夺效应; 如果只有抑制奖赏脑区才会对奖赏效应产生影响, 则表明奖赏只能单独调节单眼剥夺效应; 如果抑制奖赏脑区和抑制注意脑区都会导致奖赏效应的减弱, 且前者效果更大, 则表明两条机制都发挥作用。

4.3 引入奖赏的短时程单眼剥夺治疗成年弱视

成年弱视的治疗一直以来都是临床上的难题, 至今未有成熟的治疗方案。本研究设计的引入奖赏的短时程单眼剥夺范式有望更加有效地重塑成人眼优势, 进而推动成年弱视矫正的方法学创新。因此, 研究 3 直接验证引入奖赏的短时程单眼剥夺能否对成年弱视表现出更好的矫正效果。

研究 3 (实验 6)计划招募两组弱视患者, 一组接受传统的短时程单眼剥夺训练, 另一组接受引

入奖赏的短时程单眼剥夺训练。在训练开始前, 首先测量一次所有被试的视力、立体视觉和知觉眼优势作为视觉功能的前测, 随后展开训练。训练为期一周, 每天训练 2 小时。传统训练组的被试每天对弱视眼进行 2 小时的单眼遮盖剥夺, 剥夺期间被试可以自由活动; 而奖赏训练组的被试, 在弱视眼被剥夺的 2 小时内需要完成目标探测任务, 任务与实验 1 的奖赏条件一致。在整个训练周期结束后的 24 小时内进行一次后测, 同样对被试的视力、立体视觉和知觉眼优势进行测量。之后, 在训练结束后的一周和一月后再分别进行一次后测, 用于监测训练效应的持续时长。通过对比传统训练组和奖赏训练组之间的训练效果来检验奖赏训练的有效性。我们假设, 相较于传统的短时程单眼剥夺训练, 奖赏训练会表现出更强、更持久的训练效应。

5 理论构建与创新

成人眼优势的重塑一直是视觉可塑性领域研究的前沿热点。本研究将奖赏与短时程单眼剥夺相结合, 并综合运用行为、EEG、fMRI 和 TMS 等多模态技术, 系统探讨奖赏对短时程单眼剥夺效应的影响及其机制, 并进一步检验其在成年弱视矫正中的应用价值。

5.1 构建自下而上的视觉输入与自上而下的认知调节共同调控成人眼优势的新理论框架

眼优势可塑性是理解成人视觉系统可塑性的重要切入点, 也是近年来视觉神经科学领域的研究热点。传统观点认为, 成人视觉系统已基本定型, 其可塑性水平显著低于发展关键期(Wiesel & Hubel, 1963)。然而, 近年来大量基于短时程单眼剥夺的研究表明, 即使在成年阶段, 视觉系统仍然保留着一定程度的眼优势可塑性(Castaldi et al., 2020)。以往相关研究主要通过操纵双眼间的视觉输入差异来诱发眼优势变化, 例如对一只眼进行短时间遮挡或降低其输入强度(Lunghi et al., 2011; Zhou et al., 2014), 其核心机制主要源于初级视觉皮层内兴奋—抑制平衡的动态调节(Lunghi, Emir, et al., 2015)。然而, 近年来的证据表明, 在两眼视觉输入完全一致的情况下, 仅通过改变注意在两条单眼通路间的分配, 也可以引发类似的眼优势转移效应(Song et al., 2023; Song, Dong, et al., 2024; Song, Lyu, & Bao, 2024)。这一发现强调了

自上而下认知调节在眼优势可塑性中的重要作用。基于此,本研究提出一个全新的理论观点:成人的眼优势可塑性不是单一由视觉输入驱动,而是由自下而上的前馈输入与自上而下的反馈调节共同塑造。为了验证这一观点,本研究创新地将奖赏引入短时程单眼剥夺范式,检验奖赏是否通过调控注意,或直接作用于视觉加工通路,从而增强或改变短时程单眼剥夺效应。这一理论框架不仅完善了短时程眼优势可塑性的发生机制,也为理解大脑如何根据外部环境和内部认知状态调整其功能提供了新视角,从而丰富我们对人类视觉及大脑可塑性的认识。

5.2 提出基于奖赏的短时程眼优势可塑性干预策略,为成年弱视治疗提供新路径

除基础理论意义之外,眼优势可塑性的研究还具有重要的临床应用价值,尤其与成年弱视的干预密切相关。弱视通常被认为是一种发育期疾病,长期以来,临床干预主要集中于儿童和青少年阶段(Holmes & Clarke, 2006)。进入成年后,由于视觉系统可塑性显著下降,弱视被普遍视为“难以治疗”甚至“不可逆”的状态。目前,尚缺乏针对成年弱视的成熟、有效的干预方案。短时程单眼剥夺范式的提出,为突破这一困境提供了新的可能。已有研究尝试将该范式应用于成年弱视人群,并在一定程度上观察到视功能改善的积极效果(Lunghi, Sframeli, et al., 2019; Zhou et al., 2019)。这些研究表明,即便在成年阶段,通过短暂干预仍可诱发一定程度的眼优势重塑,从而改善弱视眼的功能表现。基于此,如何增强并延长短时程单眼剥夺所诱发的眼优势可塑性,成为当前亟需解决的关键问题。本研究提出的“引入奖赏的短时程单眼剥夺”范式,正是针对这一问题的创新性尝试,该范式有望更加有效地重塑成人眼优势,进而推动成年弱视治疗的方法学创新。更重要的是,本研究不仅在健康成人中验证该范式的有效性,还将进一步将其应用于成年弱视人群,直接评估其矫正效果,并与传统短时程单眼剥夺方法进行系统比较,验证其临床应用潜力,为未来成年弱视的治疗提供借鉴和指导作用。综上所述,本研究不仅有助于推动眼优势可塑性基础理论的发展,也为成年弱视治疗提供了具有现实可行性的创新路径,对视觉神经科学和临床视觉康复领域均具有重要意义。

参考文献

- 宋方兴, 王珏, 鲍敏. (2023). 从不平衡的视觉输入到不平衡的视觉注意: 探寻短时程眼优势可塑性的神经机制. *心理科学进展*, 31(10), 1873-1882. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2023.01873>
- 王宴庆, 陈安涛, 胡学平, 尹首航. (2019). 奖赏通过增强信号监测提升认知控制. *心理学报*, 51(01), 48-57. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2019.00048>
- 周星, 郝爽, 赵立立, 何蔚祺. (2023). 奖赏学习对非目标情绪面孔注意捕获的影响. *心理科学*, 46(06), 1298-1304. <https://doi.org/10.16719/j.cnki.1671-6981.20230603>
- Acquafredda, M., Kurzwski, J. W., Biagi, L., Tosetti, M., Morrone, M. C., & Binda, P. (2025). The pulvinar regulates plasticity in human visual cortex. *Science Advances*, 11(48), eadw9988. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adw9988>
- Anderson, B. A. (2017). Reward processing in the value-driven attention network: Reward signals tracking cue identity and location. *Social Cognitive Affective Neuroscience*, 12(3), 461-467. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw141>
- Anderson, B. A., Kim, H., Kim, A. J., Liao, M. R., Mrkonja, L., Clement, A., & Grégoire, L. (2021). The past, present, and future of selection history. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 130, 326-350. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.09.004>
- Anderson, B. A., Laurent, P. A., & Yantis, S. (2011). Value-driven attentional capture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25), 10367-10371. <https://doi.org/10.1073/pnas.1104047108>
- Axelrod, C. J., Gordon, S. P., & Carlson, B. A. (2023). Integrating neuroplasticity and evolution. *Current Biology*, 33(8), R288-293. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.03.002>
- Bai, J., Dong, X., He, S., & Bao, M. (2017). Monocular deprivation of Fourier phase information boosts the deprived eye's dominance during interocular competition but not interocular phase combination. *Neuroscience*, 352, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.03.053>
- Baldwin, A. S., Finn, A. E., Green, H. M., Gant, N., & Hess, R. F. (2022). Exercise does not enhance short-term deprivation-induced ocular dominance plasticity: Evidence from dichoptic surround suppression. *Vision Research*, 201, 108123. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2022.108123>
- Bangerter, A. (1953). Aus der Praxis-Für die Praxis. *Ophthalmologica*, 125(4-5), 398-405.
- Baroncelli, L., Bonaccorsi, J., Milanese, M., Bonifacino, T., Giribaldi, F., Manno, I., ... Sale, A. (2012). Enriched experience and recovery from amblyopia in adult rats: Impact of motor, social and sensory components. *Neuropharmacology*, 62(7), 2388-2397.
- Baroncelli, L., Sale, A., Viegi, A., Vetencourt, J. F. M., De

- Pasquale, R., Baldini, S., & Maffei, L. (2010). Experience-dependent reactivation of ocular dominance plasticity in the adult visual cortex. *Experimental Neurology*, 226(1), 100–109.
- Binda, P., Kurzawski, J. W., Lunghi, C., Biagi, L., Tosetti, M., & Morrone, M. C. (2018). Response to short-term deprivation of the human adult visual cortex measured with 7T BOLD. *eLife*, 7, e40014. <https://doi.org/10.7554/eLife.40014>
- Binda, P., & Lunghi, C. (2017). Short-term monocular deprivation enhances physiological pupillary oscillations. *Neural Plasticity*, (1), 6724631. <https://doi.org/10.1155/2017/6724631>
- Boytsova, Y. A., & Danko, S. (2010). EEG differences between resting states with eyes open and closed in darkness. *Human Physiology*, 36(3), 367–369. <https://doi.org/10.1134/S0362119710030199>
- Castaldi, E., Lunghi, C., & Morrone, M. C. (2020). Neuroplasticity in adult human visual cortex. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 112, 542–552. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.02.028>
- Cazzoli, D., Wurtz, P., Müri, R. M., Hess, C. W., & Nyffeler, T. (2009). Interhemispheric balance of overt attention: A theta burst stimulation study. *European Journal of Neuroscience*, 29(6), 1271–1276. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06665.x>
- Chelazzi, L., Perlato, A., Santandrea, E., & Della Libera, C. (2013). Rewards teach visual selective attention. *Vision Research*, 85, 58–72.
- Chen, X., Chen, S., Kong, D., Wei, J., Mao, Y., Lin, W., ... Zhou, J. (2020). Action video gaming does not influence short-term ocular dominance plasticity in visually normal adults. *Eneuro*, 7(3). <https://doi.org/10.1523/eneuro.0006-20.2020>
- Chen, Y., Chen, S., Zhang, X., Zhang, S., Jia, K., Anderson, B. A., & Gong, M. (2023). Reward history modulates attention based on feature relationship. *Journal of Experimental Psychology: General*, 152(7), 1937–1950. <https://doi.org/10.1037/xge0001384>
- Chen, Y., Gao, Y., He, Z., Sun, Z., Mao, Y., Hess, R. F., Zhang, P., & Zhou, J. (2023). Internal neural states influence the short-term effect of monocular deprivation in human adults. *eLife*, 12, e83815. <https://doi.org/10.7554/eLife.83815>
- Chen, Z., & Cai, Y. (2025). An anti-Hebbian model for binocular visual plasticity and its attentional modulation. *Communications Biology*, 8(1), 418. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07833-2>
- Cheng, P. X., Rich, A. N., & Le Pelley, M. E. (2021). Reward rapidly enhances visual perception. *Psychological Science*, 32(12), 1994–2004. <https://doi.org/10.1177/09567976211021843>
- Daniele, G., Lunghi, C., Dardano, A., Binda, P., Ceccarini, G., Santini, F., ... Del Prato, S. (2021). Bariatric surgery restores visual cortical plasticity in nondiabetic subjects with obesity. *International Journal of Obesity*, 45(8), 1821–1829. <https://doi.org/10.1038/s41366-021-00851-0>
- Dong, X., Zhang, M., Dong, B., Jiang, Y., & Bao, M. (2022). Reward produces learning of a consciously inaccessible feature. *British Journal of Psychology*, 113(1), 49–67. <https://doi.org/10.1111/bjop.12518>
- Etzel, J. A., Cole, M. W., Zacks, J. M., Kay, K. N., & Braver, T. S. (2016). Reward motivation enhances task coding in frontoparietal cortex. *Cerebral Cortex*, 26(4), 1647–1659. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu327>
- Federici, A., Bernardi, G., Senna, I., Fantoni, M., Ernst, M. O., Ricciardi, E., & Bottari, D. (2023). Crossmodal plasticity following short-term monocular deprivation. *Neuroimage*, 274, 120141. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120141>
- Finn, A. E., Baldwin, A. S., Reynaud, A., & Hess, R. F. (2019). Visual plasticity and exercise revisited: No evidence for a “cycling lane”. *Journal of Vision*, 19(6), 21. <https://doi.org/10.1167/19.6.21>
- Goldsworthy, M. R., Pitcher, J. B., & Ridding, M. C. (2012). The application of spaced theta burst protocols induces long-lasting neuroplastic changes in the human motor cortex. *European Journal of Neuroscience*, 35(1), 125–134. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07924.x>
- Grignolio, D., Acunzo, D. J., & Hickey, C. (2024). Object-based attention is accentuated by object reward association. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 50(3), 280–294. <https://doi.org/10.1037/xhp0001177>
- Holmes, J. M., & Clarke, M. P. (2006). Amblyopia. *The Lancet*, 367(9519), 1343–1351. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(06\)68581-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68581-4)
- Johnson, B. P., & Cohen, L. G. (2022). Reward and plasticity: Implications for neurorehabilitation. In A. Quartarone, M. F. Ghilardi, & F. Boller (Eds.), *Handbook of clinical neurology* (Vol. 184, pp. 331–340). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819410-2.00018-7>
- Kurzawski, J. W., Lunghi, C., Biagi, L., Tosetti, M., Morrone, M. C., & Binda, P. (2022). Short-term plasticity in the human visual thalamus. *eLife*, 11, e74565. <https://doi.org/10.7554/eLife.74565>
- Levi, D. M. (2020). Rethinking amblyopia 2020. *Vision Research*, 176, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.07.014>
- Lunghi, C., Berchicci, M., Morrone, M. C., & Di Russo, F. (2015). Short-term monocular deprivation alters early components of visual evoked potentials. *The Journal of Physiology*, 593(19), 4361–4372. <https://doi.org/10.1113/JP270950>
- Lunghi, C., Burr, D. C., & Morrone, C. (2011). Brief periods of monocular deprivation disrupt ocular balance in human adult visual cortex. *Current Biology*, 21(14), R538–539. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.06.004>

- Lunghi, C., Daniele, G., Binda, P., Dardano, A., Ceccarini, G., Santini, F., Del Prato, S., & Morrone, M. C. (2019). Altered visual plasticity in morbidly obese subjects. *iScience*, *22*, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.11.027>
- Lunghi, C., Emir, U. E., Morrone, M. C., & Bridge, H. (2015). Short-term monocular deprivation alters GABA in the adult human visual cortex. *Current Biology*, *25*(11), 1496–1501. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.04.021>
- Lunghi, C., & Pooresmaeili, A. (2023). Learned value modulates the access to visual awareness during continuous flash suppression. *Scientific Reports*, *13*(1), 756. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28004-5>
- Lunghi, C., & Sale, A. (2015). A cycling lane for brain rewiring. *Current Biology*, *25*(23), R1122–1123. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.10.026>
- Lunghi, C., Sframeli, A. T., Lepri, A., Lepri, M., Lisi, D., Sale, A., & Morrone, M. C. (2019). A new counterintuitive training for adult amblyopia. *Annals of Clinical and Translational Neurology*, *6*(2), 274–284. <https://doi.org/10.1002/acn3.698>
- Lyu, L., He, S., Jiang, Y., Engel, S. A., & Bao, M. (2020). Natural-scene-based steady-state visual evoked potentials reveal effects of short-term monocular deprivation. *Neuroscience*, *435*, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.03.039>
- McConaghy, J. R., & McGuirk, R. (2019). Amblyopia: Detection and treatment. *American Family Physician*, *100*(12), 745–750.
- Menicucci, D., Lunghi, C., Zaccaro, A., Morrone, M. C., & Gemignani, A. (2022). Mutual interaction between visual homeostatic plasticity and sleep in adult humans. *elife*, *11*, e70633. <https://doi.org/10.7554/eLife.70633>
- Min, S. H., Wang, Z., Chen, M. T., Hu, R., Gong, L., He, Z., ... Zhou, J. (2023). Metaplasticity: Dark exposure boosts local excitability and visual plasticity in adult human cortex. *The Journal of Physiology*, *601*(18), 4105–4120. <https://doi.org/10.1113/jp284040>
- Mitchell, D. E., MacNeill, K., Crowder, N. A., Holman, K., & Duffy, K. R. (2016). Recovery of visual functions in amblyopic animals following brief exposure to total darkness. *The Journal of Physiology*, *594*(1), 149–167. <https://doi.org/10.1113/jp270981>
- Mitchell, D. E., & Maurer, D. (2022). Critical periods in vision revisited. *Annual Review of Vision Science*, *8*, 291–321. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-090721-110411>
- Nyffeler, T., Wurtz, P., Lüscher, H. R., Hess, C. W., Senn, W., Pflugshaupt, T., ... Müri, R. M. (2006). Extending lifetime of plastic changes in the human brain. *European Journal of Neuroscience*, *24*(10), 2961–2966. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.05154.x>
- Porac, C., & Coren, S. (1976). The dominant eye. *Psychological Bulletin*, *83*(5), 880–897. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.83.5.880>
- Said, C. P., & Heeger, D. J. (2013). A model of binocular rivalry and cross-orientation suppression. *PLoS Computational Biology*, *9*(3), e1002991. <http://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002991>
- Sale, A., Vetencourt, J. F. M., Medini, P., Cenni, M. C., Baroncelli, L., De Pasquale, R., & Maffei, L. (2007). Environmental enrichment in adulthood promotes amblyopia recovery through a reduction of intracortical inhibition. *Nature Neuroscience*, *10*(6), 679–681. <http://doi.org/10.1038/nn1899>
- Shuler, M. G., & Bear, M. F. (2006). Reward timing in the primary visual cortex. *Science*, *311*(5767), 1606–1609. <https://doi.org/10.1126/science.1123513>
- Song, F., Dong, X., Zhao, J., Wang, J., Sang, X., He, X., & Bao, M. (2024). Causal role of the frontal eye field in attention-induced ocular dominance plasticity. *elife*, *12*, RP93213. <https://doi.org/10.7554/eLife.93213>
- Song, F., Lyu, L., & Bao, M. (2024). Adaptation of ocular opponency neurons mediates attention-induced ocular dominance plasticity. *Neuroscience Bulletin*, *40*(3), 339–349. <https://doi.org/10.1007/s12264-023-01103-z>
- Song, F., Lyu, L., Zhao, J., & Bao, M. (2023). The role of eye-specific attention in ocular dominance plasticity. *Cerebral Cortex*, *33*(4), 983–996. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac116>
- Song, F., Zhou, S., Gao, Y., Hu, S., Kong, F., & Zhao, J. (2020). Different temporal dynamics of object-based attentional allocation for reward and non-reward objects. *Journal of Vision*, *20*(9), 17–17. <https://doi.org/10.1167/jov.20.9.17>
- Song, F., Zhou, S., Gao, Y., Hu, S., Zhang, T., Kong, F., & Zhao, J. (2021). Are you looking at me? Impact of eye contact on object-based attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *47*(6), 765–773. <https://doi.org/10.1037/xhp0000913>
- Vakhrushev, R., & Pooresmaeili, A. (2024). Interaction of spatial attention and the associated reward value of audiovisual objects. *Cortex*, *179*, 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2024.07.013>
- Wang, J., He, X., & Bao, M. (2025). Attention enhances short-term monocular deprivation effect. *PsyCh Journal*, *14*(1), 84–93. <https://doi.org/10.1002/pchj.806>
- Wang, L., Chang, W., Krebs, R. M., Boehler, C. N., Theeuwes, J., & Zhou, X. (2019). Neural dynamics of reward-induced response activation and inhibition. *Cerebral Cortex*, *29*(9), 3961–3976. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy275>
- Wang, M., McGraw, P., & Ledgeway, T. (2021). Attentional eye selection modulates sensory eye dominance. *Vision Research*, *188*, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2021.06.006>
- Wang, Y., Yao, Z., He, Z., Zhou, J., & Hess, R. F. (2017). The cortical mechanisms underlying ocular dominance plasticity in adults are not orientationally selective.

- Neuroscience*, 367, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.030>
- Wei, P., & Ji, L. (2021). Reward expectation modulates N2pc for target selection: Electrophysiological evidence. *Psychophysiology*, 58(8), e13837. <https://doi.org/10.1111/psyp.13837>
- Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1963). Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye. *Journal of Neurophysiology*, 26(6), 1003–1017. <https://doi.org/10.1152/jn.1963.26.6.1003>
- Yao, Z., He, Z., Wang, Y., Lu, F., Qu, J., Zhou, J., & Hess, R. F. (2017). Absolute not relative interocular luminance modulates sensory eye dominance plasticity in adults. *Neuroscience*, 367, 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.10.029>
- Zhang, P., Hou, F., Yan, F. F., Xi, J., Lin, B. R., Zhao, J., ... Huang, C. B. (2018). High reward enhances perceptual learning. *Journal of Vision*, 18(8), 11. <https://doi.org/10.1167/18.8.11>
- Zhao, J., Song, F., Zhou, S., Hu, S., Liu, D., Wang, Y., & Kong, F. (2020). The impact of monetary stimuli on object-based attention. *British Journal of Psychology*, 111(3), 460–472. <https://doi.org/10.1111/bjop.12418>
- Zhou, J., Baker, D. H., Simard, M., Saint-Amour, D., & Hess, R. F. (2015). Short-term monocular patching boosts the patched eye's response in visual cortex. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 33(3), 381–387. <https://doi.org/10.3233/RNN-140472>
- Zhou, J., He, Z., Wu, Y., Chen, Y., Chen, X., Liang, Y., ... Hess, R. F. (2019). Inverse occlusion: A binocularly motivated treatment for amblyopia. *Neural Plasticity*, 2019(1), 5157628. <https://doi.org/10.1155/2019/5157628>
- Zhou, J., Reynaud, A., & Hess, R. F. (2014). Real-time modulation of perceptual eye dominance in humans. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 281(1795), 20141717. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1717>
- Zhou, J., Reynaud, A., & Hess, R. F. (2017). Aerobic exercise effects on ocular dominance plasticity with a phase combination task in human adults. *Neural Plasticity*, 2017(1), 4780876. <https://doi.org/10.1155/2017/4780876>
- Zhou, J., Thompson, B., & Hess, R. F. (2013). A new form of rapid binocular plasticity in adult with amblyopia. *Scientific Reports*, 3(1), 2638. <https://doi.org/10.1038/srep02638>

The impact and mechanism of reward on short-term monocular deprivation effect

SONG Fangxing¹, FENG Guang¹, BAO Min^{2,3}

⁽¹⁾ School of Mental Health and Psychological Sciences, Anhui Medical University, Hefei 230032, China)

⁽²⁾ CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

⁽³⁾ Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An important goal in neuroscience is to understand and control brain plasticity, with ocular dominance plasticity being a particularly active area of research. Studies on short-term monocular deprivation have shown that adults retain some degree of ocular dominance plasticity. To date, pursuing more effective methods for reshaping adult's ocular dominance remains to be an active research topic, which is crucial for treating adult amblyopia. Brain plasticity can be regulated by reward, and combining reward with training can enhance learning and facilitate neurorehabilitation. However, it remains unknown whether reward can be combined with short-term monocular deprivation to promote the remodeling of ocular dominance in adults, and the underlying mechanisms are yet to be elucidated. To address these questions, this study will employ behavioral measures and EEG to reveal the promotion of reward on the monocular deprivation effect from both perspectives of perceptual and neural ocular dominance. Furthermore, behavioral tests, fMRI, and TMS will be used to clarify the mechanisms by which reward enhances monocular deprivation effects. Finally, this study will compare paradigms of short-term monocular deprivation with and without reward to assess the effectiveness of reward-enhanced monocular deprivation in treating adult amblyopia. This research will contribute to a deeper understanding of brain plasticity and support the development of innovative methods for reshaping ocular dominance and treating adult amblyopia.

Keywords: reward, ocular dominance, plasticity, monocular deprivation, attention