

青少年风险决策的发展认知神经机制*

张颖 冯廷勇

(西南大学心理学部, 重庆 400715)

摘要 随着认知神经科学技术的发展, 青少年风险决策的发展认知神经机制成为了新近的一个热点课题。从双系统理论模型(社会情感神经网络系统、认知控制神经网络系统)出发, 对与青少年风险决策相关的大脑结构、功能的变化进行了阐述, 重点分析了新近的大脑功能连接、脑网络的研究; 阐述了青少年风险决策认知神经机制的主要理论模型: 双系统模型和三角模型。未来研究还应加强对认知神经机制理论模型的检验、整合和创新, 从社会认知神经科学的角度深入研究社会参照系统(同伴关系、亚文化等)在青少年风险决策中的作用及机制, 以及从认知神经层面如何预防和干预青少年高风险行为。

关键词 青少年; 风险决策; 神经机制; 功能连接; 神经系统模型

分类号 B844; B849:C91; B845

1 引言

现实生活中充满了不确定性, 而这些不确定性往往伴随着风险, 因此风险决策是人们日常生活中普遍的一种决策形式, 也是决策领域的经典研究方向之一。风险决策(Risky Decision Making)是指个体在已知不同选项及其概率的不确定情境中, 权衡不同选项的主观预期价值从而做出决策的过程(Kahneman, 2003)。青少年期一般是指介于11、12岁到18、19岁的青春发育期。该时期个体身心快速发展却又不平衡, 从而表现出情绪敏感、不稳定、自控力差等特点。同时, 该时期大脑正处于神经精细结构组织的重要发展阶段, 发育不成熟的大脑神经结构和功能可能导致青少年失调的行为模式, 其中最普遍且最受关注的就是风险行为(risky behaviors) (Blakemore, 2008; Romer, 2010)。

青少年期是风险行为的高发时期, 例如酗酒、吸毒、暴力犯罪、危险驾驶、不安全性行为等(Casey, Jones, & Hare, 2008; Eaton et al., 2012;

Steinberg, 2008)。有研究表明, 青少年期的风险行为显著高于儿童和成人期(Burnett, Bault, Coricelli, & Blakemore, 2010; Rakow & Rahim, 2010)。奖赏敏感(reward sensitivity)、风险偏好(risk preference)和对新异刺激的寻求(sensation seeking)是该时期的典型特征(Casey et al., 2008; Romer, 2010; Steinberg, 2008)。先前大量行为研究已对青少年风险决策的现象、影响因素和认知机制等进行了深入考察和探讨。随着认知神经科学技术的发展, 青少年风险决策的发展认知神经机制已成为新近的一个重要研究方向。其中, 大部分研究者倾向从双系统理论模型(社会情感系统、认知控制系统)出发, 对青少年风险决策的发展认知神经机制进行研究(Figner, Mackinlay, Wilkening, & Weber, 2009; Galvan, 2010; Somerville, Jones, & Casey, 2010; Steinberg, 2010)。

本文从双系统理论模型出发, 首先介绍与青少年风险决策过程相关的大脑结构、功能的变化, 重点分析新近的大脑功能连接和脑网络的研究, 然后阐释了两个主要的认知神经机制理论模型(双系统模型、三角模型), 最后在此基础上探讨了该领域未来的研究方向。

2 青少年大脑结构发展与风险决策

有关青少年风险决策与大脑结构变化之间关

收稿日期: 2013-09-26

* 国家自然科学基金面上项目(31271117)、中央高校基本科研业务经费重大培育项目(SWU1309002)和西南大学心理学部 2012 研究团队建设项目(TR201207-2)资助。

通讯作者: 冯廷勇, E-mail: fengty0@swu.edu.cn

系的探讨主要聚焦于前额叶灰质和白质的变化。总体上可概括为:1)相比于儿童和成人期,其前额皮层区灰质比例下降;2)从儿童到成人期,其前额皮层区白质比例始终呈上升趋势。概而言之,青少年期个体前额皮层发育还不成熟,认知控制能力发展受限,从而影响其在风险决策中的表现。

早期的一项纵向研究中,Giedd等人(1999)研究了145名4~22岁被试大脑结构的变化。结果发现,在儿童期和青少年早期之间(4~12岁),前额皮层灰质体积在不断上升,而从青少年中期(约14岁)开始,大脑皮层区域——包括前额叶(prefrontal cortex, PFC)、顶叶(parietal lobe)、颞叶(temporal lobe),灰质体积比例则在不断下降。Giedd等人(1999)认为,这一下降很可能是青春期荷尔蒙分泌和经验作用的结果。该研究表明从儿童期到青少年晚期,大脑灰质体积的变化呈倒U型,且灰质/白质绝对体积的比率随年龄增长线性下降。Sowell, Thompson, Tessner和Toga(2001)也提出,儿童到青少年阶段,背侧前额皮层(dorsal prefrontal cortex, DLPFC)和顶叶皮层的灰质密度在急剧下降,且灰质密度下降最明显的区域,也是白质密度增加最快的区域。这一发展模式也在灵长类动物身上得到了证明(Casey, Jones, & Somerville, 2011)。因此,总的来说,青少年期大脑前额皮层灰质体积、密度呈下降趋势。那么,灰质下降的原因是什么呢?普遍的解释有两点:一是突触的修整(synaptic pruning)和重组,即将多余的、低效率的、信噪比低的突触淘汰,而将高效率的突触留下来继续完成任务,从而能大大提高认知加工过程的效率(Petanjek et al., 2011)。二是在有限的大脑空间内,灰质的减少是因为白质相对增加了,具体表现在髓鞘的形成(myelination)和轴突直径的增大(Theodosis, Poulain, & Oliet, 2008)。

那么,青少年期前额皮层灰质比例的下降与风险决策有什么内在联系呢?Giedd(2008)对3~30岁个体的纵向研究表明,青少年期个体额叶皮层经历着逐渐变薄的趋势,从而影响该时期个体的计划、记忆、决策等复杂的认知功能。系列研究表明大脑前额叶在风险决策以及冲动控制中起着重要作用。例如,采用经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)暂时抑制右背外侧前额皮层(dorsolateral prefrontal cortex,

DLPFC)功能,个体在赌博任务中表现出更多的风险行为(Knoch et al., 2006)。同样采用TMS作用于左外侧前额皮层,个体将选择更多的即时满足(Figner et al., 2010)。因此,基于以上前额皮层与个体认知控制发展的密切关系,Steinberg(2008)和Casey等人(2008)提出青少年期的高风险行为很大程度是由于前额皮层发育的滞后和不成熟所致:青少年认知控制能力发展的不足,导致其不能抵御该时期强烈的奖赏寻求冲动,因而在风险决策中做出冒险的决策。

从大脑白质来看,青少年时期前额皮层的白质体积、密度呈上升趋势。Sowell等人(1999)早期对比了儿童(平均年龄9岁)和青少年(平均年龄14岁)白质和灰质的变化。结果发现,相对于儿童,青少年在前额叶和顶叶的灰质密度下降,而白质密度上升,且直到成人期才趋于稳定(Barnea-Goraly et al., 2005; Paus et al., 1999)。白质的这种变化主要体现在轴突髓鞘化和轴突直径的增加(Giorgio et al., 2010; Paus, Keshavan, & Giedd, 2008; Perrin et al., 2008)。同时,白质的磁化传递率(Magnetisation Transfer Ratio, MTR)和各向异性分数(Fractional Anisotropy, FA)也在不断上升(Schmithorst & Yuan, 2010),这些变化终将导致神经信号更加有效地传递,从而有助于青少年高级认知能力的发展(Nagy, Westerberg, & Klingberg, 2004)。因此,从白质发展角度来看,相比于成人,青少年前额皮层区发展仍不成熟。综合以上研究,从大脑成熟的角度分析了青少年和成人期个体认知控制能力发展的差异,而这一差异为解释青少年的风险行为提供了重要的神经基础。

3 青少年大脑功能发展与风险决策

众所周知,大脑结构和功能的变化是相辅相成的,那么该时期大脑功能的变化又是如何影响青少年的风险决策呢?下面将从社会情感和认知控制神经网络出发,结合众多新近研究,探讨青少年风险决策的发展认知神经机制。

3.1 社会情感神经网络的发展

社会情感神经网络又称作热系统,主要位于大脑边缘区域,涉及的主要脑区有杏仁核(amygdala)、腹侧纹状体(ventral striatum, VS)、眶额叶皮层(orbital frontal cortex, OFC)和内侧前额皮层(medial prefrontal cortex, MPFC)(Steinberg,

2010)。总的来说,青少年期社会情感神经网络获得了快速的发展,且活跃水平要高于儿童和成人期,表现为强烈的感官刺激寻求和奖赏敏感,因而在风险决策过程中表现出更多的风险行为。

杏仁核与情绪、奖赏加工密切相关。早期研究考察了青少年在面对积极和消极社会信息时杏仁核的反应,结果表明青少年(9~17岁)的杏仁核激活强度要大于成人(25~36岁)(Monk et al., 2003)。Hare 等人(2008)研究也表明,青少年在面对情绪面孔时,杏仁核的活动强度要显著大于儿童和成人。后来研究发现,只在面对消极面孔时,青少年(9~17岁)杏仁核的激活强度大于成人(21~40岁)(Guyer et al., 2008)。这一系列研究表明,青少年在面对情绪信息时,杏仁核表现出过度激活状态(Somerville, Fani, & McClure-Tone, 2011)。当然,杏仁核对社会信息的过度激活并不仅局限于情绪信息。Ernst 等人(2005)发现,相比于成人,当失去奖赏时,青少年杏仁核也表现出强烈的激活。这一大脑功能的变化在一定程度上可以解释青少年期情绪的不稳定、爱冲动,以及对社会信息(例如情绪、奖赏)的敏感。因此,来自杏仁核的过度激活很可能是青少年风险决策过程中强烈感官刺激寻求、奖赏敏感的重要神经基础。

青少年在风险决策任务中,面对金钱的获得和失去,大脑腹侧纹状体的活动变化也获得了研究者的关注。大量研究证明,青少年在获得奖赏时,腹侧纹状体的活动要强于成人和儿童(Chein, Albert, O'Brien, Uckert, & Steinberg, 2011; Padmanabhan, Geier, Ordaz, Teslovich, & Luna, 2011; Van Leijenhorst et al., 2010)。Galvan 等(2006)对比了儿童、青少年、成人在预期小、中、大奖赏时,奖赏回路活动的变化。结果发现,当预期更大奖赏时,青少年腹侧纹状体和伏隔核(nucleus accumbens, NAcc)的活动强度大于儿童和成人,且与自我报告的风险行为呈正相关。Fareri, Martin 和 Delgado (2008)也发现,青少年在奖赏评估时,不但腹侧纹状体的活动强度要大于成人,且活动时程也长于成人,腹侧纹状体的活动强度与青少年风险行为呈正相关(Figner et al., 2009)。新近研究进一步证实,青少年在预期奖赏时,腹侧纹状体的活动与其现实生活中风险行为(毒品使用)呈正相关(Bjork, Smith, Chen, & Hommer, 2011)。这一系列研究表明,青少年期个体对奖赏信息的敏

感性上升,表现为腹侧纹状体等社会情感脑区的过度激活,这也是青少年高风险行为产生和维持的重要神经基础。

眶额叶皮层也是重要的奖赏加工区域,且与热执行功能的控制密切相关。其中内侧眶额叶对奖赏信息较为敏感,并表现出奖赏大小与其活动强度呈正相关(O'Doherty, Kringelbach, Rolls, Hornak, & Andrews, 2001)。此外,眶额叶皮层在奖赏信息与奖赏结果学习之间发挥重要作用。有研究表明,青少年在预期奖赏时,相比于成人,眶额叶皮层区的活动比较分散,而正是该区发展的滞后阻碍了个体对事件和奖赏结果进行联想,从而做出冒险决策(Galvan et al., 2006)。

综上所述,青少年期社会情感神经网络已快速发展,且在情绪信息和奖赏加工中起着重要作用。该时期杏仁核、腹侧纹状体和内侧眶额叶皮层的过度激活影响了青少年风险决策中的奖赏加工过程,表现出强烈的感官刺激寻求和奖赏敏感,从而使青少年做出冒险决策。值得注意的是,与社会情感神经网络活动高涨相反,该时期认知控制神经网络却表现出完全不一样的发展轨迹。

3.2 认知控制神经网络的发展

相比于成人,青少年认知控制神经网络发育还不成熟。认知控制神经网络包含的脑区主要有:背外侧前额皮层(DLPFC)和顶叶皮层(parietal cortex)。以往研究大多采用抑制控制任务、工作记忆和任务转换来研究个体认知控制能力的发展。例如 Durston 等人(2006)研究表明,在抑制控制任务中(例如 Stroop, Go-No/Go 任务),相比于成人,青少年激活的认知控制脑区较少、活动较弱。在另一项关于空间和言语工作记忆任务的研究发现,相比于低工作记忆负荷条件,在高工作记忆负荷下,个体腹侧和背外侧前额皮层、顶叶的活动随着年龄的增长而增长(Jolles, Kleibeuker, Rombouts, & Crone, 2011)。此外,在转换任务中,随着年龄的增长,外侧前额皮层和顶叶活动呈上升趋势(Christakou et al., 2009)。且有研究发现青少年前额皮层区活动强度与其风险行为呈负相关(Eshel, Nelson, Blair, Pine, & Ernst, 2007)。因此综合以上研究,青少年期个体认知控制神经网络的滞后或缓慢发展相对突出了社会情感神经网络的优势(表现为强烈的感官刺激寻求和奖赏敏感),继而出现高风险行为。

然而, Velanova, Wheeler 和 Luna (2009)采用反向眼跳任务,研究了8~27岁个体抑制控制能力的发展。结果发现,青少年和成人前额皮层区激活水平并无差异,只是青少年前额皮层区激活的时间持续性明显短于成人,认知控制的持续性较差。那么,青少年期认知控制能力发展的神经机制究竟是什么?是特定脑区(例如背外侧前额皮层、顶叶)血氧水平的活动强度,还是其活动的时间持续性?Crone, Wendelken, Donohue, van Leijenhorst 和 Bunge (2006)认为,在青少年和成人之间,认知控制能力的提升更多体现在各脑网络内外部之间功能连接水平上。综上所述,在风险决策过程中,成人的“智慧冷静”与青少年的“意气用事”均可以从前额皮层成熟发展的角度进行解释。因此对青少年认知控制能力内在机制的探讨是揭示其风险决策神经机制过程中不可或缺的部分。

4 青少年脑网络发展与风险决策

近年来,随着青少年风险决策神经机制研究的深入,研究者们逐渐将研究重心从先前的脑定位研究转移到各脑区功能连接和脑网络的发展,使得青少年风险决策的神经机制研究向更高水平方向发展。下面将从社会情感神经网络、认知控制神经网络功能连接出发,进一步探讨大脑功能连接和脑网络发展对青少年风险决策的影响。

首先,青少年社会情感神经网络功能连接的发展。Camara, Rodriguez-Fornells 和 Münte (2008)对青少年晚期个体(平均年龄21岁)研究发现,赌博任务中在金钱的获得和损失条件下,以腹侧纹状体(VS)为种子区(seed region),它与脑岛(insular)、杏仁核(amygdala)、海马(hippocampus)、眶额叶皮层(OFC)之间的功能连接明显增强。但在金钱损失条件下,腹侧纹状体与杏仁核、眶额叶皮层的功能连接强度更大。这说明对于青少年风险决策的神经机制研究,不再仅局限于单一脑区的激活,而应扩展到不同脑区间的功能连接。Weiland 等人(2013)研究酗酒家庭中成长(family history of alcoholism, FH+)的青少年脑区功能连接的发展。结果发现,在奖赏预期过程中, FH+组青少年的伏隔核、楔前叶(precuneus)和感觉运动区(sensorimotor areas)的功能连接强度大于控制组,且该连接强度在奖赏寻求和风险行为(酗酒)

中起着重要调节作用。因此,青少年社会情感网络内部功能连接强度对其冲动、风险行为有着一定的预示作用。

其次,青少年认知控制神经网络功能连接的发展。Hwang, Velanova 和 Luna (2010)采用功能性磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)研究反向眼跳任务(与控制相关)中儿童、青少年、成人大脑功能连接的变化。结果发现,儿童在顶叶区域内(parietal regions)功能连接最强,而成人则是在前额皮层区域内表现出显著功能连接,且范围最广。青少年则处于这一变化的过渡时期,具体表现为顶叶区域内功能连接减弱,前额皮层区域内的功能连接逐渐增强。由此说明,从儿童到青少年,前额皮层区占主导的内部功能连接逐渐稳定下来,且在青少年和成人期之间持续加强。因此,研究者认为青少年认知控制神经网络内部各脑区的功能连接水平是其自我控制能力发展的内在神经机制之一,而这一神经机制发展的不成熟,使得青少年表现出上升的风险行为。

最后,Steinberg 等人(2008)认为,青少年期皮层和皮层下脑区信息交流的“贫乏”使得个体认知和情感协调能力受阻,从而未能在风险决策中权衡利弊,做出最优的决策。也就是说,社会情感和认知控制神经网络间结构/功能连接发展的局限亦是其自我控制能力发展滞后重要的神经基础。例如 Liston 等人(2006)研究表明,随着年龄的增长(7~31岁),个体前额皮层—纹状体回路(fronto-striatal)结构连接越紧密,且表现出较好的冲动控制能力。Hare 等人(2008)研究证明,在面对情绪信息时,杏仁核—腹侧前额皮层(amygdala-ventral frontal)的功能连接与个体控制能力相关。即相对于成人,青少年表现出杏仁核活动的上升,而前额皮层活动弱且分散,且两者之间的功能连接较弱。同时,对于 FH+组青少年,前额皮层—小脑(fronto-cerebellar)功能连接强度的下降将提升风险行为(酗酒)出现的概率(Herting, Fair, & Nagel, 2011)。总之,相比于成人,青少年期皮层和皮层下脑区功能连接强度较弱,阻碍了认知和情感协调能力的发展,使得青少年在风险决策中“情感”战胜了“理智”。

综合以上研究,青少年期大脑功能连接的发展在风险决策中起着至关重要的作用。青少年

期个体认知控制网络已经初步形成(也就是说,青少年能够像成人那样运用认知控制能力来达到自己的目标),但由于青少年认知控制神经网络功能连接发展的不成熟,社会情感—认知控制网络间活动协调性差,整合能力受限,使得青少年认知控制能力的发挥不稳定,从而表现出易受社会环境影响的特性(Luna, Paulsen, Padmanabhan, & Geier, 2013)(例如同伴影响),出现各种高风险行为。

5 风险决策的发展认知神经模型

Steinberg (2008)的双系统模型在解释青少年风险决策神经机制中获得了普遍的运用。另外,三角模型也从不同的角度对青少年风险决策的神经机制做出了解释。

5.1 双系统模型(The Dual Systems Model)

Steinberg (2008)和 Casey 等人(2008)认为,青少年风险行为的产生是大脑两个神经生物系统相互作用的结果:1)社会情感系统(social affective system),主要位于大脑边缘区域,包括杏仁核、腹侧纹状体、眶额叶皮层、内侧前额皮层和颞上沟(superior temporal sulcus, STS);2)认知控制系统(cognitive control system),涉及外侧前额皮层、扣带回皮层(anterior cingulate cortex, ACC)以及与两者联系的顶叶。由于社会情感系统的快速发展,导致青少年期出现强烈的奖赏寻求,而该时期认知控制系统缓慢发展,使得青少年自我控制水平较低,从而表现出上升的风险行为。Figner 等人(2009)的研究结果支持了双系统理论模型,即在情感激活条件下,青少年风险行为要显著大于成人,而在没有情感激活时,青少年的风险行为与成人不存在差异。

但有研究提出对双系统模型的质疑。Steinberg (2008)双系统模型认为,个体社会情感系统在青少年期便获得了充分发展,而认知控制系统则发展滞后。然而有研究表明,在面对奖赏时,青少年腹侧纹状体的活动并不总是大于成人(Bjork, Smith, Chen, & Hommer, 2010),在一些情绪反应的研究中,青少年也并没有始终表现出杏仁核的过度激活(Pfeifer et al., 2011)。此外,有研究表明个体前额皮层区的活动随着年龄的增长而下降(McRae et al., 2012),这都是双系统理论无法解释的。近来有研究发现,青少年期腹侧纹状体

对情绪调节起着一定的作用,某种程度上充当着前额皮层的功能。例如,腹侧纹状体活动的上升有利于降低由社会排斥所带来的消极情绪(Masten et al., 2009)。Forbes 等人(2009)的研究则表明,那些有抑郁倾向的青少年,在面对奖赏结果时,纹状体激活显著,且伴随着较高的积极情感体验和较低的抑郁症状。总而言之,认知控制系统和情感系统的分工并不是绝对的,在某种条件下,这两个系统的角色将互换。

双系统模型是该领域使用最为广泛的理论,其突出的优点是能从系统层面(社会情感系统和认知控制系统)解释了青少年风险决策的发展认知神经机制。它将青少年风险决策的发展特点与社会情感系统、认知控制系统的不平衡发展以及两者之间的交互作用紧密联系起来;并明确提出了两个系统包含的主要脑区。然而,双系统模型也存在明显的缺陷:(1)双系统模型的解释与风险决策特异性的认知过程和神经基础还是存在一定距离,例如风险认知与评估、潜在获益预期与潜在损失预期等;(2)社会情感和认知控制两系统内各脑区之间以及两系统之间的发展交互机制并不清楚;(3)双系统模型并没有解答应该如何来干预和预防青少年的高风险行为。

5.2 三角模型(The Triadic Model)

Ernst 和 Fudge (2009)提出三角模型,来解释青少年的风险行为。“三角”分别代表三个神经系统:(1)杏仁核及其相关回路,涉及的脑区有:前额皮层传入神经(prefrontal cortical afferents, PFC-aff)、基底外侧杏仁核(basolateral amygdala, BLA)、中央杏仁核(central amygdala, CEA),主要作用是情绪加工;(2)纹状体及其相关回路,涉及的脑区有:前额皮层传入神经(prefrontal cortical afferents, PFC-aff)、前侧纹状体(anterior striatum, Ant)、后侧纹状体(posterior striatum, Post),主要作用是奖赏加工;(3)前额皮层回路(调节回路),涉及的脑区有背外侧前额皮层(DLPFC)、内侧眶额叶皮层(m-OFC)、外侧眶额叶皮层(l-OFC)主要作用为认知控制,协调纹状体及杏仁核的活动。这三个系统间的激活程度则取决于个体当时所处的社会环境(见图1)。

那么,社会环境究竟是如何影响决策行为呢?以往研究表明,与奖赏相关的主要脑区有杏仁核、纹状体和眶额叶皮层(Ernst & Paulus,

2005)。有研究发现,当呈现消极社会信息时,杏仁核的活动更强(Ernst et al., 2005),而当为积极信息时,腹侧纹状体的活动更强(Guyer et al., 2008),且在一项fMRI研究中,相比于成人,青少年这一效应将得到扩大。所以不难理解,当出现积极信息时,三角模型中的纹状体回路激活显著,个体倾向于表现“趋近”行为(风险行为);而当出现消极信息时,杏仁核回路激活显著,个体倾向于表现“回避”行为。那么,在既有积极和消极信息的风险决策中,个体又该如何决策呢?这时调节回路将发挥作用。但由于青少年前额皮层尚未发育成熟,其自我控制能力发展受阻,从而促进了其纹状体回路功能的发挥,却抑制了杏仁核回路的反应,从而出现了更多的风险行为。三角模型理论也获得了相应行为研究结果的支持,即青少年在风险决策中更倾向于冒险,且失败时自我报告的消极情绪低于成人,而成功时,报告的积极情绪却高于成人(Eshel et al., 2007; Ernst et al., 2005; Galvan et al., 2006)。

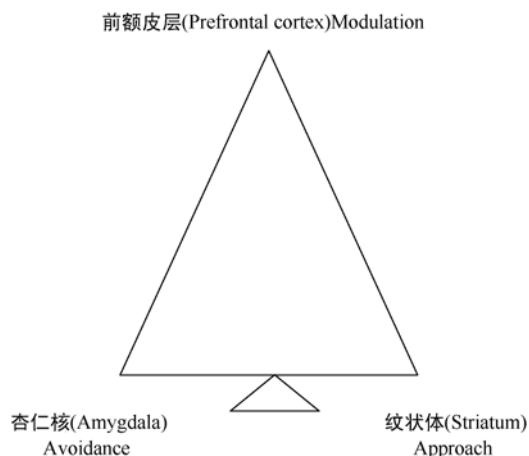


图1 青少年风险决策的三角模型:当纹状体回路显著激活时,个体倾向于表现冒险行为;当杏仁核回路显著激活时,个体倾向于表现回避行为;前额皮层在这一过程中起着调节作用,调节杏仁核与纹状体回路活动的平衡(资料来源:Ernst & Fudge, 2009)。

总之,根据三角模型理论,青少年在风险决策中,相比于成人,纹状体回路参与度要显著大于杏仁核、调节回路的参与度,正是这一不平衡性使得青少年成为风险行为的高危人群。相比于双系统理论模型,三角模型将杏仁核与纹状体区

分开来,也就是说对个体社会情感神经网络各脑区的功能进行了更为细致、准确的区分,且能对日常生活中的各种动机行为进行了更广泛的解释。未来还需结合青少年大脑功能连接与脑网络研究对三角模型进行检验、改进与创新。

6 研究展望

Steinberg (2008)认为,青少年期高风险行为是正常的,不可避免的,同时也是具有适应性的。青少年通过风险行为的尝试,不断积累成功或失败经验,这也是一种学习过程。但这种学习也往往伴随着代价,例如药物成瘾、暴力犯罪、高疾病率和死亡率时有发生。因此,对青少年风险决策的发展认知神经科学进行研究,不仅有利于揭示风险决策的内在神经机制,也为现实生活的干预提供了理论指导。但目前的研究仍存在一些问题和不足,未来可从以下几方面进行更为深入的研究。

首先,认知神经机制理论模型的检验、整合和创新。双系统模型和三角模型均有各自的特点和相似之处,且都能在一定程度上对青少年风险决策的认知神经机制进行解释。但是,目前对于这些神经系统理论模型的检验研究十分有限,且近来已有研究提出对双系统模型的质疑(Bjork et al., 2010)。因此,我们认为目前关于青少年风险决策的神经机制研究尚不成熟。且以往神经系统理论模型的提出主要是基于脑定位研究,未来有必要将研究重点转向青少年大脑结构和功能网络的发展;以双系统模型和三角模型为基础,提出一个对青少年风险决策做出更广泛解释的整合型的认知神经机制理论模型,以期从更高的视角揭示青少年风险决策的内在神经机制。同时新模型的建立也为理论创新奠定了基础,而理论的创新则为实际的应用提供了重要依据。

其次,从社会认知神经科学的角度深入研究社会参照系统(同伴关系、亚文化等)在青少年风险决策中的作用及机制。相对于儿童和成人,社会环境对青少年风险决策的影响得到了扩大。在同伴陪同、家庭、社会排斥等条件下,青少年风险决策的神经机制在发生着微妙的变化。例如,Chen 等人(2011)发现在同伴陪同下,青少年奖赏相关脑区得到了显著激活,包括腹侧纹状体和眶额叶皮层,且这些激活能预测青少年的风险行

为。长期良好的家庭关系会降低青少年社会情感系统活动而加强认知控制系统的活动,从而减少风险行为的发生(Telzer, Fuligni, Lieberman, & Galván, 2013)。似乎同伴的出现、家庭关系为青少年提供了强烈的内在动机,而这一动机激发了社会情感系统或认知控制系统的活动,从而表现出风险行为的上升或下降。如此看来,社会环境在青少年风险决策中起着重要的作用,未来可细化研究范围,探讨同伴数量、同伴亲密程度、社会经济地位、文化等因素对青少年风险决策神经机制的影响。

最后,有关青少年风险决策神经机制研究的应用价值。从青少年个体健康成长和社会发展(青少年犯罪等高风险行为)角度出发,对该领域的系统深入研究具有重要的科学价值和实践意义。例如,Steinberg (2008)认为,青少年时期出现的强烈奖赏寻求更多具有生物性,亦是发展过程中不可避免的。因此,一方面从社会环境入手,例如提高香烟的价格、延长驾考的年龄等(这一干预获得了显著的效果),而不是试图改变青少年的态度、信念。另一方面,功能磁共振成像结果也表明练习和训练可以促使大脑活动模式发生变化,即大脑功能具有可塑性。而青少年时期,个体认知能力迅速提高,其中枢神经系统的可塑性也最强。那么,是否可以通过后天训练而加快青少年认知控制能力的发展,从而减少一系列风险行为的发生。例如延迟满足能力干预、工作记忆的训练以及当下流行的神经反馈训练——该方法已被证实注意力集中、情绪稳定训练中效果显著。同样,这一训练过程所带来的大脑结构和功能活动模式的变化,对于揭示青少年风险决策的神经机制具有重要作用,也为将来教育政策的制定、良好环境的设定提供了实证依据。

参考文献

- Barnea-Goraly, N., Menon, V., Eckert, M., Tamm, L., Bammmer, R., Karchemskiy, A., ... Reiss, A. L. (2005). White matter development during childhood and adolescence: A cross-sectional diffusion tensor imaging study. *Cerebral Cortex*, 15(12), 1848–1854.
- Bjork, J. M., Smith, A. R., Chen, G., & Hommer, D. W. (2010). Adolescents, adults and rewards: Comparing motivational neurocircuitry recruitment using fMRI. *PLoS One*, 5(7), e11440.
- Bjork, J. M., Smith, A. R., Chen, G., & Hommer, D. W. (2011). Psychosocial problems and recruitment of incentive neurocircuitry: Exploring individual differences in healthy adolescents. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(4), 570–577.
- Blakemore, S.-J. (2008). The social brain in adolescence. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 267–277.
- Burnett, S., Bault, N., Coricelli, G., & Blakemore, S. J. (2010). Adolescents' heightened risk-seeking in a probabilistic gambling task. *Cognitive Development*, 25(2), 183–196.
- Camara, E., Rodriguez-Fornells, A., & Münte, T. F. (2008). Functional connectivity of reward processing in the brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2, 19.
- Casey, B. J., Jones, R. M., & Hare, T. A. (2008). The adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124, 111–126.
- Casey, B. J., Jones, R. M., & Somerville, L. H. (2011). Braking and accelerating of the adolescent brain. *Journal of Research on Adolescence*, 21(1), 21–33.
- Chein, J., Albert, D., O'Brien, L., Uckert, K., & Steinberg, L. (2011). Peers increase adolescent risk taking by enhancing activity in the brain's reward circuitry. *Developmental Science*, 14(2), F1–F10.
- Christakou, A., Halari, R., Smith, A. B., Irfkovic, E., Brammer, M., & Rubia, K. (2009). Sex-dependent age modulation of frontostriatal and temporo-parietal activation during cognitive control. *Neuroimage*, 48(1), 223–236.
- Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S., van Leijenhorst, L., & Bunge, S. A. (2006). Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(24), 9315–9320.
- Durston, S., Davidson, M. C., Tottenham, N., Galvan, A., Spicer, J., Fossella, J. A., & Casey, B. J. (2006). A shift from diffuse to focal cortical activity with development. *Developmental Science*, 9(1), 1–8.
- Eaton, D. K., Kann, L., Kinchen, S., Shanklin, S., Flint, K. H., Hawkins, J., ... Chyen, D. (2012). Youth risk behavior surveillance—United States, 2011. *Morbidity and Mortality Weekly Report. Surveillance Summaries*, 61(4), 1–162.
- Ernst, M., Nelson, E. E., Jazbec, S., McClure, E. B., Monk, C. S., Leibenluft, E., ... Pine, D. S. (2005). Amygdala and nucleus accumbens in responses to receipt and omission of gains in adults and adolescents. *Neuroimage*, 25(4), 1279–1291.
- Ernst, M., & Fudge, J. L. (2009). A developmental neurobiological model of motivated behavior: Anatomy, connectivity and ontogeny of the triadic nodes.

- Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(3), 367–382.
- Ernst, M., & Paulus, M. P. (2005). Neurobiology of decision making: A selective review from a neurocognitive and clinical perspective. *Biological Psychiatry*, 58(8), 597–604.
- Eshel, N., Nelson, E. E., Blair, R. J., Pine, D. S., & Ernst, M. (2007). Neural substrates of choice selection in adults and adolescents: Development of the ventrolateral prefrontal and anterior cingulate cortices. *Neuropsychologia*, 45(6), 1270–1279.
- Fareri, D. S., Martin, L. N., & Delgado, M. R. (2008). Reward-related processing in the human brain: Developmental considerations. *Development and Psychopathology*, 20(4), 1191–1211.
- Figner, B., Knoch, D., Johnson, E. J., Krosch, A. R., Lisanby, S. H., Fehr, E., & Weber, E. U. (2010). Lateral prefrontal cortex and self-control in intertemporal choice. *Nature Neuroscience*, 13(5), 538–539.
- Figner, B., Mackinlay, R. J., Wilkening, F., & Weber, E. U. (2009). Affective and deliberative processes in risky choice: Age differences in risk taking in the Columbia Card Task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(3), 709–730.
- Forbes, E. E., Hariri, A. R., Martin, S. L., Silk, J. S., Moyles, D. L., Fisher, P. M., ... Axelson, D. A. (2009). Altered striatal activation predicting real-world positive affect in adolescent major depressive disorder. *The American Journal of Psychiatry*, 166(1), 64–73.
- Galvan, A. (2010). Adolescent development of the reward system. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 6.
- Galvan, A., Hare, T. A., Parra, C. E., Penn, J., Voss, H., Glover, G., & Casey, B. J. (2006). Earlier development of the accumbens relative to orbitofrontal cortex might underlie risk-taking behavior in adolescents. *Journal of Neuroscience*, 26(25), 6885–6892.
- Giedd, J. N. (2008). The teen brain: Insights from neuroimaging. *Journal of Adolescent Health*, 42(4), 335–343.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., ... Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2(10), 861–863.
- Giorgio, A., Santelli, L., Tomassini, V., Bosnell, R., Smith, S., De Stefano, N., & Johansen-Berg, H. (2010). Age-related changes in grey and white matter structure throughout adulthood. *Neuroimage*, 51(3), 943–951.
- Guyer, A. E., Monk, C. S., McClure-Tone, E. B., Nelson, E. E., Roberson-Nay, R., Adler, A. D., ... Ernst, M. (2008). A developmental examination of amygdala response to facial expressions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(9), 1565–1582.
- Hare, T. A., Tottenham, N., Galvan, A., Voss, H. U., Glover, G. H., & Casey, B. J. (2008). Biological substrates of emotional reactivity and regulation in adolescence during an emotional go-nogo task. *Biological Psychiatry*, 63(10), 927–934.
- Herting, M. M., Fair, D., & Nagel, B. J. (2011). Altered fronto-cerebellar connectivity in alcohol-naive youth with a family history of alcoholism. *Neuroimage*, 54(4), 2582–2589.
- Hwang, K., Velanova, K., & Luna, B. (2010). Strengthening of top-down frontal cognitive control networks underlying the development of inhibitory control: A functional magnetic resonance imaging effective connectivity study. *The Journal of Neuroscience*, 30(46), 15535–15545.
- Jolles, D. D., Kleibeuker, S. W., Rombouts, S. A. R. B., & Crone, E. A. (2011). Developmental differences in prefrontal activation during working memory maintenance and manipulation for different memory loads. *Developmental Science*, 14(4), 713–724.
- Kahneman, D. (2003). Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics. *American Economic Review*, 93(5), 1449–1475.
- Knoch, D., Gianotti, L. R. R., Pascual-Leone, A., Treyer, V., Regard, M., Hohmann, M., & Brugger, P. (2006). Disruption of right prefrontal cortex by low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation induces risk-taking behavior. *The Journal of Neuroscience*, 26(24), 6469–6472.
- Liston, C., Watts, R., Tottenham, N., Davidson, M. C., Niogi, S., Uluğ, A. M., & Casey, B. J. (2006). Frontostriatal microstructure modulates efficient recruitment of cognitive control. *Cerebral Cortex*, 16(4), 553–560.
- Luna, B., Paulsen, D. J., Padmanabhan, A., & Geier, C. (2013). The teenage brain cognitive control and motivation. *Current Directions in Psychological Science*, 22(2), 94–100.
- Masten, C. L., Eisenberger, N. I., Borofsky, L. A., Pfeifer, J. H., McNealy, K., Mazziotta, J. C., & Dapretto, M. (2009). Neural correlates of social exclusion during adolescence: Understanding the distress of peer rejection. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 4(2), 143–157.
- McRae, K., Gross, J. J., Weber, J., Robertson, E. R., Sokol-Hessner, P., Ray, R. D., ... Ochsner, K. N. (2012). The development of emotion regulation: An fMRI study of cognitive reappraisal in children, adolescents and young adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 7(1), 11–22.
- Monk, C. S., McClure, E. B., Nelson, E. E., Zarahn, E.,

- Bilder, R. M., Leibenluft, E., ... Pine, D. S. (2003). Adolescent immaturity in attention-related brain engagement to emotional facial expressions. *Neuroimage*, 20(1), 420–428.
- Nagy, Z., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Maturation of white matter is associated with the development of cognitive functions during childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(7), 1227–1233.
- O'Doherty, J., Kringelbach, M. L., Rolls, E. T., Hornak, J., & Andrews, C. (2001). Abstract reward and punishment representations in the human orbitofrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 4(1), 95–102.
- Padmanabhan, A., Geier, C. F., Ordaz, S. J., Teslovich, T., & Luna, B. (2011). Developmental changes in brain function underlying the influence of reward processing on inhibitory control. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(4), 517–529.
- Paus, T., Keshavan, M., & Giedd, J. N. (2008). Why do many psychiatric disorders emerge during adolescence? *Nature Reviews Neuroscience*, 9(12), 947–957.
- Paus, T., Zijdenbos, A., Worsley, K., Collins, D. L., Blumenthal, J., Giedd, J. N., ... Evans, A. C. (1999). Structural maturation of neural pathways in children and adolescents: In vivo study. *Science*, 283(5409), 1908–1911.
- Perrin, J. S., Hervé, P.-Y., Leonard, G., Perron, M., Pike, G. B., Pitiot, A., ... Paus, T. (2008). Growth of white matter in the adolescent brain: Role of testosterone and androgen receptor. *The Journal of Neuroscience*, 28(38), 9519–9524.
- Petanjek, Z., Judaš, M., Šimić, G., Rašin, M. R., Uylings, H. B. M., Rakic, P., & Kostović, I. (2011). Extraordinary neoteny of synaptic spines in the human prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(32), 13281–13286.
- Pfeifer, J. H., Masten, C. L., Moore III, W. E., Oswald, T. M., Mazziotta, J. C., Iacoboni, M., & Dapretto, M. (2011). Entering adolescence: Resistance to peer influence, risky behavior, and neural changes in emotion reactivity. *Neuron*, 69(5), 1029–1036.
- Rakow, T., & Rahim, S. B. (2010). Developmental insights into experience-based decision making. *Journal of Behavioral Decision Making*, 23(1), 69–82.
- Romer, D. (2010). Adolescent risk taking, impulsivity, and brain development: Implications for prevention. *Developmental Psychobiology*, 52(3), 263–276.
- Schmithorst, V. J., & Yuan, W. H. (2010). White matter development during adolescence as shown by diffusion MRI. *Brain and Cognition*, 72(1), 16–25.
- Somerville, L. H., Jones, R. M., & Casey, B. J. (2010). A time of change: Behavioral and neural correlates of adolescent sensitivity to appetitive and aversive environmental cues. *Brain and Cognition*, 72(1), 124–133.
- Somerville, L. H., Fani, N., & McClure-Tone, E. B. (2011). Behavioral and neural representation of emotional facial expressions across the lifespan. *Developmental Neuropsychology*, 36(4), 408–428.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Holmes, C. J., Batth, R., Jernigan, T. L., & Toga, A. W. (1999). Localizing age-related changes in brain structure between childhood and adolescence using statistical parametric mapping. *Neuroimage*, 9(6), 587–597.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Tessner, K. D., & Toga, A. W. (2001). Mapping continued brain growth and gray matter density reduction in dorsal frontal cortex: inverse relationships during postadolescent brain maturation. *The Journal of Neuroscience*, 21(22), 8819–8829.
- Steinberg, L. (2008). A social neuroscience perspective on adolescent risk-taking. *Developmental Review*, 28(1), 78–106.
- Steinberg, L. (2010). A dual systems model of adolescent risk-taking. *Developmental Psychobiology*, 52(3), 216–224.
- Steinberg, L., Albert, D., Cauffman, E., Banich, M., Graham, S., & Woolard, J. (2008). Age differences in sensation seeking and impulsivity as indexed by behavior and self-report: Evidence for a dual systems model. *Developmental Psychology*, 44(6), 1764–1778.
- Telzer, E. H., Fuligni, A. J., Lieberman, M. D., & Galván, A. (2013). Meaningful family relationships: Neurocognitive buffers of adolescent risk taking. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(3), 374–387.
- Theodosis, D. T., Poulain, D. A., & Oliet, S. H. (2008). Activity-dependent structural and functional plasticity of astrocyte-neuron interactions. *Physiological Reviews*, 88(3), 983–1008.
- Van Leijenhorst, L., Gunther Moor, B., Op de Macks, Z. A., Rombouts, S. A. R. B., Westenberg, P. M., & Crone, E. A. (2010). Adolescent risky decision-making: Neurocognitive development of reward and control regions. *Neuroimage*, 51(1), 345–355.
- Velanova, K., Wheeler, M. E., & Luna, B. (2009). The maturation of task set-related activation supports late developmental improvements in inhibitory control. *The Journal of Neuroscience*, 29(40), 12558–12567.
- Weiland, B. J., Welsh, R. C., Yau, W.-Y. W., Zucker, R. A., Zubieta, J.-K., & Heitzeg, M. M. (2013). Accumbens functional connectivity during reward mediates sensation-seeking and alcohol use in high-risk youth. *Drug and Alcohol Dependence*, 128(1-2), 130–139.

The Developmental Cognitive Neural Mechanisms of Adolescents' Risky Decision Making

ZHANG Ying; FENG Tingyong

(Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: With the development of cognitive neuroscience and technology, it became a newly research hotspot that investigate the developmental cognitive neural mechanisms of adolescents' risky decision making. From the perspective of dual systems model (Social Affective Neural Network System and Cognitive Control Neural Network System), we expounded the changes of brain structures and functions which are associated with adolescents' risky decision making, and focused on analyzing the latest studies of adolescents' brain functional connectivity and brain networks. Then we discussed the main theoretical models of cognitive neural mechanisms on adolescents' risky decision making: the dual systems model and the triadic model. Future directions should emphasize the examination, integration and innovation of the neural system models, and deeply explore the effects and neural mechanisms of Social Referencing Systems (such as peer influence, subculture) on adolescents' risky decision making from the perspective of social cognitive neuroscience, as well as how to prevent and intervene adolescents' high risky behaviors from the level of cognitive neuroscience.

Key words: risky decision making; adolescents; neural mechanisms; functional connectivity; neural system model