



认知控制发展神经科学: 未来路径与布局

齐玥^{1,2}, 杨国春^{3,4}, 付迪^{3,4}, 李政汉^{3,4}, 刘勋^{3,4*}

1. 中国人民大学心理学系, 北京 100872;

2. 中国人民大学心理学系实验室, 北京 100872;

3. 中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101;

4. 中国科学院大学心理学系, 北京 100049

* 联系人, E-mail: liux@psych.ac.cn

收稿日期: 2020-10-15; 接受日期: 2021-01-12; 网络版发表日期: 2021-03-03

北京市科技重大专项“脑科学与类脑研究北方科学中心”配套(科研)(批准号: Z181100001518003)、中国科学院行为科学重点实验室经费、中国人民大学中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金和中国科学技术协会学科发展项目(批准号: 2018XKFZ03)资助

摘要 认知控制是个体在信息加工过程中, 通过调配资源自上而下地对相关信息进行储存、计划和操控的过程. 认知控制的研究包含选择性注意、冲突解决、工作记忆、认知灵活性、抑制控制等不同方面, 每个方面都有其独特的毕生发展规律. 结合心理物理学和神经影像学方法, 揭示认知控制的发展规律, 了解认知控制与其他心理功能发展的制衡与促进, 探索认知控制的可塑性和认知训练, 对于解决认知控制发展失衡所导致的成瘾行为障碍, 以及年龄增长所带来的认知老化等问题有重要意义. 目前, 针对认知控制的大规模标准化测试依然欠缺, 考虑到认知控制包含多个子维度, 开发标准化测试集、建设常模数据库, 并结合现有大数据分析技术, 从不同层面检验认知控制及其发展的调控因素将是未来的发展重点. 本文在对以往认知控制毕生发展相关研究进行梳理的基础上, 分析了我国当前研究面临的机遇与挑战, 并提出未来发展的规划与路线.

关键词 认知控制, 发展, 神经科学, 路线图

认知控制(cognitive control), 也称作执行功能(executive function), 是指个体在信息加工中, 根据当前任务目标, 通过对资源的调配, 自上而下地对相关信息进行储存、计划和操控的过程^[1,2]. 当人们需要克服自动化的行为, 或者面临不熟悉的、危险的、需要规划和决策的任务时, 认知控制能力就显得尤为必要. 相比“认知控制”, “执行功能”这一概念出现得更早, 与传统的神经心理学框架更契合, 而且在特定认知过程(如工作记忆)中使用“执行功能”更恰当; 而随着认知心理学

(包括发展心理学)的发展, “认知控制”的概念更抽象, 可以使用的范围更广, 因而被越来越多地使用^[3]. 在很多重要的心理过程中都涉及认知控制, 比如冲突控制、注意、决策、计划、工作记忆、任务转换等^[4,5]. 认知控制是人类核心的高级功能之一, 在个体发展过程中发挥重要的调节作用, 对认知控制的深入研究将更好地服务于儿童和青少年的健康发展. 另一方面, 发展认知神经科学的蓬勃发展也为揭示认知控制的机制提供了重要的实证依据. 个体认知控制的毕生发展

引用格式: 齐玥, 杨国春, 付迪, 等. 认知控制发展神经科学: 未来路径与布局. 中国科学: 生命科学, 2021, 51: 634–646

Qi Y, Yang G C, Fu D, et al. Developmental neuroscience of cognitive control: the future path and layout (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2021, 51: 634–646, doi: 10.1360/SSV-2020-0248

水平对营造健康积极的社会环境具有重大影响. 揭示认知控制系统和奖赏动机系统之间的制衡关系及其发育轨迹, 也有助于理解认知控制能力与其他心理活动的关系, 以及由于认知控制能力发育不成熟和功能退化导致的疾病. 对认知控制的研究是解决理论争议并进一步开展发育行为障碍干预与治疗的关键.

本文在对以往认知控制毕生发展相关研究梳理的基础上, 结合国内外研究, 梳理学科发展现状, 重点分析我国当前研究面临的机遇与挑战, 并提出未来发展的规划与路线.

1 认知控制的毕生发展

截至目前, 对认知控制系统发展规律的探索取得了一定进展. 有行为研究发现, 整体而言, 认知控制功能水平随年龄增加呈线性增加^[6], 认知控制加工速度则随年龄呈现log函数或曲线递增的变化模式, 直到成年期增长放缓^[7]. 脑电研究发现, 成人的错误相关负波(error-related negativity, ERN)大于老人和儿童, 成人比儿童和老年人更能有效调动认知控制和反应冲突的监测资源^[8]. 目前的研究对认知控制的理解存在较大差异, 有必要对其进行分类总结. 一个影响较广的理论认为, 认知控制分为三个核心成分: 抑制控制、工作记忆和认知灵活性^[9]. 但是, 这一分类在认知控制的发展神经科学研究中显得有些粗糙, 在实际应用中起到的指导作用有限. 一方面, 当前研究认知控制发展变化的心理学范式和测量指标十分丰富, 三分类的方法并不能完全涵盖所有的认知控制子成分; 另一方面, 认知控制的目标导向性不仅包含抑制性加工, 还包含与其对立的增强性加工^[10]. 因此, 本文将认知控制分为以下五个子成分: 选择性注意、冲突解决、工作记忆、认知灵活性、抑制控制(图1), 并对每个子成分的发展神经机制进行了阐述和总结(表1).

1.1 选择性注意的发展

人们每时每刻都在接收丰富的外界信息, 选择性地加工部分重要的信息, 而忽略其他不重要的信息, 这种功能被称为选择性注意. 研究者常用视觉搜索范式探究选择性注意的毕生发展机制.

现有的大量研究表明, 视觉的选择性搜索能力呈现倒U型发展趋势, 即从儿童时期到青少年时期呈上

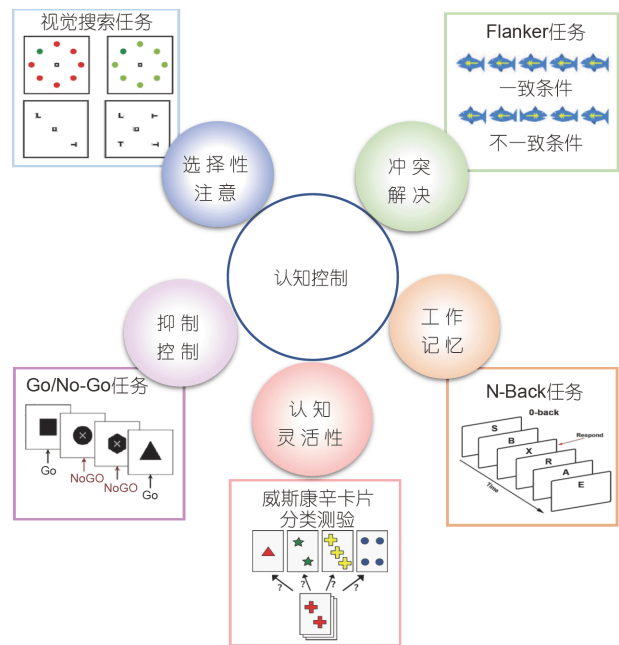


图 1 认知控制能力发展的五个维度及常用测量范式. 选择性注意(selective attention)可通过视觉搜索范式(visual search task)等测量, 请被试在一众干扰刺激中搜索到目标刺激. 冲突解决(conflict resolution)可通过Flanker等任务测量, 请被试判断一组横向排列小鱼刺激中最中间小鱼头部的朝向, 中间小鱼可能和两侧小鱼头部朝向一致(congruent)或不一致(incongruent). 工作记忆(working memory)可通过N-Back范式测量, 请被试接受一连串的刺激物, 并在当前的刺激物与第 n 次之前的相符时做出反应. 认知灵活性(cognitive flexibility)可通过威斯康辛卡片分类测验(Wisconsin card sorting test)测量, 请被试按照不同规则对测试卡片进行分类, 当规则改变时, 尽快调整反应, 改变卡片分类方式. 抑制控制(inhibition control)可通过Go/No-Go任务测量, 要求被试对Go刺激及时反应, 并抑制对No-Go刺激的反应

Figure 1 Five dimensions of cognitive control development and measurements. Selective attention can be measured by visual search tasks in which participants are asked to search for a target stimulus in a crowd of distractors. Conflict resolution can be measured by the Flanker task. Participants are asked to determine the orientation of the head of the middle fish in a set of horizontally arranged fish stimuli, which may be congruent or incongruent with the head orientation of the fish on either side. Working memory can be measured by the N-Back paradigm. Participants are asked to receive a sequence of stimuli and respond when the current stimulus matches the n th previous one. Cognitive flexibility can be measured by the Wisconsin card sorting test. Participants are asked to sort the test cards according to different rules, and when the rules change, they adjust their responses as soon as possible to change the way the cards are sorted. Inhibition control can be measured by the Go/No-Go task, in which participants are asked to respond promptly to Go stimuli and inhibit their responses to No-Go stimuli

升趋势, 在成年早期达到顶峰, 在老年时期呈下降趋势^[11,12,40]. 其中, Enns等人^[12]开展的横跨6~72岁年龄段的横断研究发现, 联合视觉搜索能力在儿童和老年阶

表 1 认知控制子成分的发展特点、相关脑区与脑网络总结

Table 1 Summary of the developmental features, related brain areas, and brain networks of cognitive control subcomponents

认知控制子成分	发展特点	相关脑区	涉及脑网络
选择性注意	儿童到青少年时期呈上升趋势, 成年早期达到顶峰, 老年期呈下降趋势 ^[11,12]	视觉皮层、前扣带回皮层、顶叶皮层 ^[13,14]	额顶控制网络、背侧注意网络 ^[13,14]
冲突解决	不同类型冲突加工能力发展机制存在差异, 刺激-刺激冲突在儿童早期与中期接近成人水平, 而刺激-反应冲突则成熟较晚 ^[15-18]	前额叶皮层、前扣带回皮层、顶叶皮层 ^[19,20]	额顶控制网络、扣带-岛盖网络 ^[20,21]
工作记忆	儿童到成年早期呈上升趋势 ^[22] , 老年呈下降趋势 ^[23]	前额叶皮层 ^[24-26] 、前扣带回皮层 ^[27] 、后顶叶皮层 ^[25]	中央执行脑网络 ^[27] 、额顶控制网络 ^[28] 、背侧注意网络 ^[28]
认知灵活性	儿童早期发展至10岁接近成人水平, 青春期和成年期仍不断提升, 至成年早期达到顶峰 ^[29,30] , 老年人出现衰退 ^[31]	前额叶皮层 ^[31,32] 、纹状体 ^[32]	额顶控制网络 ^[33]
抑制控制	儿童早期发展至10~12岁接近成人水平, 成年后开始下降 ^[34,35] , 个体差异对其发展水平影响长久 ^[36]	前额叶皮层 ^[31] 、感觉运动区 ^[31,37]	额顶控制网络 ^[38] 、反应抑制网络 ^[39]

段都有十分明显的年龄效应, 他们认为可能是由于儿童和老年人在注意过程中的注意解离能力较差造成的. 而后, Hommel等人招募了298位6~89岁的被试探究其视觉搜索能力的差异, 结果发现, 儿童和老年人群体视觉搜索能力水平尽管都较低, 但是解释机制不同^[11]. Hommel^[11]认为, 相比于成年早期, 儿童在完成视觉搜索任务时更容易受到分心物的干扰, 而老年人则除了更容易受到分心物干扰外, 还会受到目标信息缺失的影响. 此外有研究表明, 老年群体的选择性注意机制中存在一种刺激信息的“积极效应”^[41]. 视觉搜索任务中表现出更强的自上而下控制能力的老人, 会更加专注于积极刺激忽略消极刺激^[42], 这表明老年群体可以通过对积极信息的选择性注意对抗晚年生活压力, 有效地调节情绪^[43].

研究者利用脑影像技术对选择性注意的发展机制进行了探究. Wolf等人^[13]使用物体追踪任务分别测查7岁、11岁儿童及成年早期个体的行为表现及相应的脑功能. 结果发现, 随着年龄增长, 个体行为表现显著提升, 并伴有更多顶叶注意相关区域激活, 视皮层区域的激活从更多初级皮层参与转为更多高级皮层参与. 此外, 随着年龄增长, 前扣带回激活水平下降, 个体激活了更多注意加工相关的功能特异性脑区. Geerligs等人^[14]对比18~26岁成年早期被试与59~74岁老年被试在视觉搜索任务中的表现发现, 老年被试比成年早期被试抑制无关信息的能力更弱, 老年人更容易受到无关刺激的干扰, 但是在对任务相关信息的注意方面二者无差异. 磁共振成像结果表明, 老年被试被无关刺

激分散注意力时, 背侧注意网络激活增强, 表明注意的重新定位功能发生改变. 在对目标探测过程中, 老年人表现出更强的额顶控制网络与躯体运动区域的功能连接, 说明老年被试可能是通过调动更多认知控制资源以提升其在目标探测中的表现.

1.2 冲突解决的发展

对冲突的解决是认知控制的一个重要方面. 经典的冲突任务有Stroop, Simon和Flanker等. 不同的冲突任务都包含一个一致条件和一个不一致条件, 通常不一致条件下的反应时和正确率要显著差于一致条件下的成绩, 被试需要付出更大的努力来克服不一致条件所产生的干扰.

一些发展研究关注刺激-刺激(stimulus-stimulus, S-S)与刺激-反应(stimulus-response, S-R)两种不同的冲突加工能力发展成熟的机制差异. 有研究表明, S-S冲突控制比S-R冲突控制成熟得早^[15]. Liu等人^[16]在一项针对5岁儿童、10岁儿童和成年人的事件相关电位(event-related potential, ERP)研究中采用了Simon任务和Flanker任务. 行为结果表明, 10岁个体的S-S冲突加工就已经达到成人水平, 而S-R冲突加工则未达到成人水平. 分析产生于前扣带回与冲突监测有关的脑电N2成分^[19]发现, 与10岁和5岁儿童相比, 成人在S-R冲突监测中表现出更小的N2成分幅值. 分析产生于背外侧前额叶和顶叶皮层与冲突解决相关的脑电P3成分^[44]发现, S-R冲突加工中, 与5岁儿童相比, 成人与10岁儿童表现出更短的P3潜伏期. 上述结果均表明, 相比于5

岁儿童, 10岁儿童与成人具有更强的S-R冲突解决能力. 另外一项ERP研究将S-R和S-S冲突整合到一个颜色-目标-Stroop任务中, 结果显示, S-S冲突加工在儿童早期(6~7岁)达到成人水平, 而S-R冲突加工一直发展到青春期才趋于成熟^[17]. Bryce等人^[18]比较了5岁儿童、8岁儿童和成人在一项动物Stroop任务中的行为表现和单侧化准备电位(lateralized readiness potential, LRP)的变化. 其中, LRP成分反映了运动反应前的准备活动, 可用来分离冲突处理的刺激评价和反应选择^[45]. 结果同样发现了S-S冲突加工在个体5岁时已接近成人水平, 而S-R冲突加工还将继续发展.

1.3 工作记忆的发展

工作记忆是人类认知活动的核心, 其资源有限, 在认知任务加工过程中, 负责暂时储存与加工信息, 是学习、推理、问题解决等多种认知任务的重要成分^[46]. 工作记忆涉及信息的加工、存储、监控, 以及认知成分的协调建构等复杂功能, 中央执行系统是工作记忆的核心^[46]. 针对不同年龄段人群工作记忆的研究大多围绕多种感觉信息编码展开.

言语工作记忆是工作记忆中研究较早且较多的功能. Mcnamara和Wong^[47]利用学业和日常生活两种工作记忆任务发现, 发展性阅读障碍(reading disabilities, RD)儿童的言语工作记忆存在缺陷. Knoop-van Campen等人^[48]以9、10岁患有阅读障碍的儿童为研究对象, 测试其语音意识、工作记忆和阅读速度, 结果表明, 语音意识和工作记忆存在障碍会降低阅读速度和效率. Williams等人^[49]采用N-back任务和工作记忆标准测验对8~16岁的高功能孤独症(high-functioning autism, HFA)儿童、青少年以及17~48岁的HFA成人进行言语和空间工作记忆测查, 结果发现, 相比于年龄和认知相匹配的控制组, HFA的言语工作记忆没有受损, 但空间工作记忆能力缺损, 揭示了言语和空间工作记忆的分离. 工作记忆作为认知老化的重要中介变量, 对老年人认知功能也有着直接影响, 随年龄增长逐渐减退.

Patael等人^[24]利用脑影像技术分析了43名学龄儿童拼音文字阅读的fMRI(functional magnetic resonance imaging)结果, 发现左侧背外侧前额叶皮层(left dorso-lateral prefrontal cortex, IDLPFC)与儿童的工作记忆和阅读理解有密切的关系. Spreng等人^[27]比较了老年人

与年轻人在工作记忆任务中的大脑活动, 发现老年人的前额叶脑区以及前扣带皮层等中央执行系统相关脑区有更多的激活. 另外, 还有研究发现, 在完成工作记忆任务时, 年轻人的前额叶和后顶叶呈现单侧激活, 而老年人同时激活了对侧的前额叶和后顶叶脑区^[25]. Eyster等人^[26]的研究也表明, 老年人额叶激活的增强幅度与其工作记忆任务的行为表现呈正相关关系. 这些研究提示, 老年人由于认知功能的退化, 在完成工作记忆任务时不得不补偿性地增强了相关脑区的激活^[50]. 其中, 执行控制网络和背侧注意网络组成的额顶叶连接是工作记忆能力发展过程中的重要神经基础^[28].

1.4 认知灵活性的发展

认知灵活性是执行功能的一种突显特性, 在实验室中通常使用集合转移或任务切换行为范式进行测量^[51].

认知灵活性在儿童早期就开始发展, 在7~9岁之间急剧增长, 10岁时基本成熟, 但在整个青春期和成年期都在不断提高^[29], 直至21~30岁之间达到顶峰^[30]. 行为研究表明, 儿童使用不同于成人的定性策略来实现灵活的认知^[52], 其发展差异主要体现在儿童将更多注意资源分配在刺激呈现阶段对任务相关维度的选择上, 而其在反应阶段的资源分配与成人接近. 另一项研究发现, 在8~9岁左右, 儿童通过将注意力转向任务相关刺激来改变他们的控制策略, 以达到线索-刺激-反应的联结^[53]. 对认知灵活性的脑成像研究发现, 与青少年相比, 健康成年人在切换任务中的表现更好, 任务相关的额叶和纹状体激活更强, 表明认知灵活性得到了发展^[32]. Rubia等人^[32]的研究发现, 从儿童到成年, 在抑制和转换任务中, 右侧腹外侧前额叶(ventrolateral prefrontal cortex, vlPFC)的激活呈线性增加. 还有研究指出, 相比于年轻的成年个体, 老年人在行为表现上认知灵活性更差, 全脑活动的平均BOLD信号更弱且变化性更低^[31]. 此外, Moriguchi和Hiraki^[54]利用维度变化卡片分类(dimensional change card sorting, DCCS)任务测量了3岁、5岁儿童和成年人, 并用近红外技术考察了任务进行中被试的大脑活动, 发现通过了DCCS测试的3岁儿童只有右下侧前额叶激活, 而5岁儿童和成年人都激活了双侧前额叶. Ezeziel等人^[33]发现, 外侧前额叶和顶叶下回之间的功能连接随着儿童年龄的增长而增强, 表明前额叶在认知灵活性的发展

中起了关键作用。认知灵活性毕生发展未来的研究可以从脑区间的功能性连接出发,探究不同脑区间功能连接强度与行为表现、年龄变化之间的关系。

1.5 抑制控制的发展

对抑制控制的测量主要有Go/No-Go, Stop-Signal等范式。通过比较需要抑制的条件(No-Go或Stop)和无需抑制的条件(Go)下的反应绩效,可以考察个体的抑制控制能力。虽然Stroop等测量冲突解决的任务也常被用于测量个体的抑制控制能力,但是冲突解决更加侧重冲突的监测和对目标信息的增强,而抑制控制更加关注个体的反应控制能力^[9]。

抑制控制能力早在儿童12个月就形成,在10~12岁时基本成熟^[51]。抑制控制水平会在儿童时期得到提升,并在成年后期下降^[34]。例如,Bedard等人^[35]招募了317名6~82岁的健康被试,采用改编的Go/No-Go任务探究了抑制控制的毕生发展模式,结果发现,在整个儿童期, No-Go试次的反应时随着年龄的增加而降低,但是在老年期则随着年龄的增加而提升,表明抑制控制能力在毕生发展早期随着年龄增长不断提升,而在毕生发展后期逐渐下降。但是有一项持续了40年的纵向追踪研究发现,在4岁时更难以做到延迟满足的被试,在40年后仍表现出较低的抑制控制能力^[36],表明抑制控制水平尽管会随着年龄的增长而变化,但是个体间的差异影响深远而持久。关于抑制控制的脑成像研究发现,在抑制任务中,右侧vIPFC的激活从儿童到成年呈线性增加^[31],表明vIPFC在抑制控制的发展过程中起到了重要作用。此外,一项磁共振研究基于Stop-Signal任务探究了119名18~88岁的健康成年人的前额叶、运动前区和运动区等脑区的激活和功能连接水平,结果发现,抑制控制能力与脑区连接性之间的联系会随着被试年龄的变化而变化,但是抑制控制水平与大脑激活水平的联系却没有表现出年龄的调节效应^[37]。Tsvetanov等人^[37]指出,年龄对抑制能力的影响是由额下回和背侧前额皮层的活动决定的,并且受到这些区域与感觉运动区域之间连接性的调节。但值得注意的是,这项研究是横断研究,这些结论还不能推广到个体的毕生发展中。未来的研究方向需要关注两个方面,一个是纵向的追踪研究,一个是大脑网络之间的大尺度连接性随年龄变化的模式。

总的来看,立足于毕生发展的视角,认知控制的发

展存在阶段性,于婴幼儿期便已开始萌芽,进入儿童青少年时期发展迅速,进入成年期后发展较为平缓,在成年后期至老年初期有明显的下降趋势,而后基本保持稳定。

2 认知控制能力与其他能力的发展关系

认知控制作为核心的认知能力,其发育过程和其他能力密不可分,既有与其他能力的相互约束,也有和其他能力的相互促进。奖赏是人们快乐的来源之一,是对一切行为进行再强化的基础,也是一切行为动机的基础^[55]。适度的奖赏能对青少年的认知控制起到正向的促进作用。例如,脑成像研究发现,当给予一定的奖赏时,青少年在认知控制脑区的激活比成人更高^[56]。但是奖赏系统过于活跃,也会带来问题,比如导致不理智的冒险、成瘾等多种行为障碍^[57]。因此,认知控制和奖赏动机系统的制衡在人们的日常生活中扮演重要角色,这一双系统动态制衡关系早就被学界认识并系统研究^[58]。Casey等人^[59]与Steinberg等人^[60]分别提出双系统模型(The Dual Systems Model),该模型认为,“青少年时期之所以是各种风险行为及成瘾问题的高发期,是因为这个时期大脑的奖赏系统发展过快,而认知控制系统发展相对迟滞,导致青少年对于奖赏和新异刺激的渴求程度较高,却难以有效抑制”^[61]。

然而,关于双系统发展轨迹及其关键期,学界存在较大意见分歧。Steinberg等人^[60]认为,社会情感系统的发展呈现倒U型轨迹,奖赏反应在青春期早期增加,在成年早期下降;Casey等人^[59]则认为,奖赏反应一直持续增加到青春期中期,随后逐渐平缓至成年。最近提出的驱动双系统模型则认为,奖赏系统的发展轨迹是遵循倒U型的,但认知控制的发展则在青春期中期就开始变平^[62]。无论何种发育轨迹,都说明两个系统之间存在很大程度的重叠和交互。

认知控制对奖赏的有效制约不仅能控制当下的行为,也能预测个体未来的发展。一项经典的延迟满足研究对4岁的儿童进行了测试,发现有些儿童能够等待一段时间以得到更多的报酬,因而有更好的延迟满足能力,而另一些儿童无法抵抗当前奖励的诱惑,不能有效地延迟满足。若干年后的追踪研究发现,延迟满足能力更强的儿童更容易在后来的人生中获得成功^[36]。

与奖赏系统类似,情绪系统的发展也和认知控制

系统有明显的相互制约关系。青少年时期是情绪发展和认知控制发展的重要阶段。两个系统之间的制衡关系决定了青少年在很多方面的行为表现。在青少年阶段, 情绪系统的发展往往占上风, 因此导致行为的不可控^[63]。由于青少年时段是产生情绪问题的高危阶段, 因此在这个阶段进行认知控制训练等干预可能有比较好的效果^[64]。

此外, 还有一些能力的发展和认知控制之间是相互促进的关系。内部言语在任务转换中起到重要作用, 比如对任务规则的表征、对任务顺序的提示以及任务的检索, 因此, 内部言语的发展也决定了认知灵活性的发展^[52,65]。研究发现, 5~6岁的儿童很难加工随机的图片线索, 而7~9岁的儿童加工起来变得更加容易, 说明随着年龄的增加, 人们会更多地运用策略对非言语信息(如图片)进行言语标记, 进而提升认知灵活性^[52]。

一般而言, 青少年的奖赏和情绪相关脑区过度活跃^[66], 而认知控制脑区的功能不够成熟^[67]。但认知控制脑区的发展能加强其对奖赏和情绪脑区的调控强度。研究表明, 从青年到老年阶段, 伏隔核、杏仁核与前额叶间的功能连接逐渐增强^[68~70]。

总体来说, 作为人类的高级心理功能, 认知控制的正常发展能够确保人们具有充分的主观能动性和自我控制性, 对其他系统起到相互制约和相互促进的作用。儿童时期的奖赏和情绪系统发育迅速, 容易出现一些成瘾、暴力等行为, 随着认知控制系统的逐渐成熟, 这些行为可以得到很好的控制, 这种现象被称为双系统平衡^[58]。此外, 其他系统, 如智力、言语能力对认知控制系统的发展能够起到推动作用^[65,71]。

3 认知控制能力的可塑性

认知能力的衰退和损伤是衰老和身心疾病中最令人担忧和经济负担最高的方面之一。认知障碍发病率较高, 大约是痴呆症的两倍^[72], 预计会影响15%~25%的老年人^[73]。患有轻度认知障碍的老年人的直接医疗费用比未受损的老年人高出44%^[74]。而传统的认知干预方法无法满足当下需求, 如何通过新型干预措施有效减轻因年龄增长而导致的认知下降成为全球性的优先事项。

计算机化认知训练(computerized cognitive training, CCT)被认为是安全且价廉的。CCT涉及标准化和

认知挑战性任务的结构化练习^[75], 与传统的练习方法相比, 它具有多方面优势, 如高视觉吸引力的界面、高效且可扩展的交付方式以及不断使培训内容和难度适应个人绩效的能力^[76]。尽管CCT在改善各年龄阶段的认知控制能力方面有一定的效果, 但训练效果和迁移能力在各个认知控制的子领域中并不相同, 并且在很大程度上取决于训练程序的设计^[77~83]。例如, 在不同子领域中, 工作记忆的训练提升和迁移效果最好^[84]。对于不同年龄群体, 训练效果是否一致, 目前尚有争议。老年群体在认知训练后网络内(主要是默认网络、额顶控制网络)连接性的增加以及网络之间(尤其是额顶控制网络和默认网络之间)的反相关程度增加, 提示老年群体更受益于认知训练^[85]。而采用视觉搜索范式的研究则发现, 在接受足够的训练后, 老年人和成年早期的被试在选择性注意任务中的绩效均得到提升, 忽略无关信息的能力和对任务相关信息的关注能力没有显著年龄差异^[40], 表明选择性注意的训练与该能力的发展阶段无关。在注意控制训练的元分析研究中, 覆盖了从新生儿到老年人(70岁以上)的各年龄群体, 结果发现, 年轻被试的训练效果要优于老年人^[86]。训练方法、强度的差异导致难以得出认知控制能力可塑性在不同年龄是否一致的结论。一项针对老年人的元分析研究指出, 训练的频次会对训练效果产生影响^[77]。另有研究者提出, 只有在训练任务和转移任务涉及重叠的认知加工成分和大脑区域的情况下, 训练效果的迁移才能发生^[87]。认知训练后, 任务相关脑区可能发生激活的增强或减弱, 提示任务相关功能脑区激活程度与行为表现之间呈倒U型曲线关系^[85]。因此, 针对不同年龄群体设置合适的训练强度, 可能是提高训练效果的重要手段。此外, 近期的一项系统评价研究指出, 计算机化认知训练可以结合经颅电刺激(transcranial electrical stimulation, tES)技术, 用于增强认知训练治疗效果, 从而使认知控制功能得到持久改善^[88]。其中, 以背外侧前额叶为刺激区域, 以老年人和成年早期被试为干预对象的研究结果表明, 在工作记忆训练中结合了tES的被试, 其训练效果能够迁移至未训练的其他工作记忆任务中^[88]。这为结合认知控制能力发展神经机制的精准化干预提供了未来的研究思路。

正念冥想练习(mindfulness meditation practice, MMP)作为冥想练习的一个子类别, 在改善认知能力方面的应用受到越来越多的关注^[89]。正念训练的早期

阶段更关心集中注意力的能力提升与发展, 主要从选择性注意和执行控制角度考虑; 正念训练后期阶段的特点主要是关注对内部和外部刺激的持续性监测, 主要从持续性注意能力的角度考虑。此外, MMP还被认为可以提升工作记忆容量和执行功能, 改善儿童注意力的自我调节能力^[90]。对于不同年龄群体的研究发现, 小学生在24周的MMP训练后, 能够有效提高选择性注意, 高中生在8周训练后, 注意缺陷多动症(attention deficit hyperactivity disorder, ADHD)的症状有所缓解^[91]。有研究指出, 正念训练后, 儿童的大脑后部区域绝对theta功率明显较低, 而在Cz电极上的theta/beta比值却明显较小, 说明正念训练有助于增强与认知控制和自我调节有关的大脑区域的成熟, 这可能为平稳过渡到青春期提供了支持^[92]。另一方面, 对于认知能力衰退和损伤的多领域训练研究的结果一致表明, 正念可以通过增加网络内连接性(主要是默认网络)以及网络间(尤其是额顶控制网络和默认网络之间)的反相关程度来抵消与年龄相关或与疾病相关的网络功能障碍, 这些改变被认为与更好的认知功能有关^[93-95]。研究发现, 右侧额叶皮层厚度上的年龄差异在正念训练之后减少, MMP可能是通过减缓或减轻神经退行, 提高了老年人的认知表现^[96]。目前, MMP对于各个认知控制子领域的训练效果尚未得到充分研究, 对于不同年龄的作用效果仍需要进一步研究论证。未来研究可以更多关注训练周期、频次对于训练效果的影响。

综上, 认知控制能力是可以通过训练而提升和改善的。CCT借助网络多媒体更有卷入性的交互界面并结合心理学知识来训练和改善认知能力, 而MMP通常被用来提升自我调节和控制的能力以及情绪管理。认知训练的效果依赖于认知控制能力及相关神经基础的可塑性, 对于认知训练的研究一方面有助于验证发展研究中的相关发现, 例如, 有关工作记忆训练的研究为进一步揭示工作记忆能力发展和衰退过程中的神经机制提供了辅助证据^[28]; 另一方面, 认知训练效果的变化则为认知控制能力可塑性与年龄发展的关系提供了直接证据。近年来, 认知控制能力的可塑性是否随年龄发展而发生变化, 引发了越来越多的关注。一些研究提出, 老年人由于学习能力下降, 其训练效果要比成年早期更差^[97-100], 即使同样是老年人, 更年长的老年人训练效果也要比更年轻的老年人效果更差^[101,102]。而另一些研究则发现, 由于认知能力的提升存在天花板, 因

此相比于提升空间较大的儿童和老年人, 成年早期被试的训练效果反而更差^[79,103]。因此, 认知控制不同维度的训练效果是否受到年龄的影响, 仍值得进一步探索。

4 学科未来发展方向的预测和展望

目前, 针对认知控制的大规模标准化测试仍是研究难点, 考虑到认知控制包含多个子维度, 开发标准化测试集、建设常模数据库, 并结合现有大数据分析技术, 从不同层面检验认知控制及其发展的调控因素将是未来的发展重点。未来研究应当在以下方面着力。

第一, 认知控制测量方法的统一。认知控制包含多个子维度, 因此对于认知控制发展的测量应从不同子维度着手。目前关于认知控制发展的测量存在任务特异性, 欠缺标准化评测体系与工具, 使得研究结果的鲁棒性与可重复性偏低。今后研究者应着手于开发标准化、流程化、具体化的一组测试任务用于测量认知控制能力的综合发展水平。在任务标准化的基础上, 日后还应大规模获取数据, 构建认知控制能力的发展常模, 推进认知控制发展理论的统一化。在数据的采集方法上, 研究者应注重年龄层的连续性与完整性, 包含儿童、青少年与老人。此外, 在人群的选取上应注重多样性并尽可能保留人口学信息, 如居住城市或农村、种族与性别、受教育程度等。结合现有大数据分析技术, 研究者可以更好地发掘认知控制的发展模式, 并可更具有针对性地解决相应认知控制的发展问题, 提出相关心理疾病的干预方案。

第二, 认知控制能力的常模数据库建设。大规模标准化测试是目前的研究难点。如果未来计划验证双系统轨线, 积累实验证据, 需要有一个无偏、跨年龄段的研究方法。现有的研究范式主要是针对健康成人开发的。如何在不同年龄段上发展一个难度合理、可量化、跨年龄段比较的认知控制的研究范式, 是未来研究值得进一步探索的。发展一个或一套用于认知控制能力测量的标准化研究范式, 如同制造了一把测量认知控制能力的“尺子”, 可增加心理实验的可比性。在此前提下, 大规模收集各个年龄段的标准化数据, 才有助于后期绘制认知控制系统的发展轨线, 进行纵向比较, 并进一步在不同的能力系统之间进行横向比较。因此, 亟待以认知控制的标准化测试为基础, 建立认知

控制及其相关心理过程的大数据库, 构建认知控制和其他相关心理功能的常模, 并绘制这些心理功能的发展轨线。

第三, 认知控制对其他能力发展水平的预测. 认知控制作为个体重要的认知功能, 对个体未来的发展起到举足轻重的作用. 正如俗语所说, “三岁看大, 七岁看老”, 认知控制能力的早期发育很可能对个体的长期发展提供可靠的预测. 然而, 当前对个体的纵向追踪研究还非常少, 个体差异对于预测儿童青少年后期各项能力(比如3~5年学业成绩)发展的关系, 目前也缺乏系统性证据. 今后的研究要做好长远的打算, 建立个体信息完善系统和跟踪随访机制, 形成连续性的多维度数据库, 以便进行因果分析和预测力检验. 美国的早期儿童纵向研究幼儿园项目(ECLS-K)为开展类似研究提供了借鉴^[104,105].

第四, 深入探讨认知控制不同维度之间的关系及发展神经机制. 目前, 只有少量研究关注了认知控制的五个不同维度在发展上的关系及其神经机制. 一些研究发现, 在成年晚期, 工作记忆与认知灵活性会随着年龄增长而衰退, 但在两种能力的电生理指标上P3b和P3a两个成分的幅值变化是独立的, 没有发现交互作用, 可能暗示着两个维度的能力是独立发展的^[106]. 另一些研究则提出, 在学龄前儿童认知灵活性的发展过程中, 工作记忆和抑制控制的发展要优先于认知灵活性, 这两种能力的发展水平决定了认知灵活性的发展^[107]. 那么, 在认知控制的毕生发展中, 不同维度之间的能力发展是否存在稳定的先后顺序和相互依赖关系? 未来的研究可进一步探索认知控制的不同维度之间在发展神经机制上的关联。

第五, 从研究成果的应用层面, 探索认知控制的可塑性与迁移性. 近5年以“‘cognitive training’ AND/OR ‘executive functions’”为关键词检索到的引用较高的实证类研究多以老年人、儿童为研究对象, 采用N-back, WCST, Stop-Signal等范式(N-back居多), 进行长期(如2年)或相对短期(如4周)的认知训练任务, 探究了认知训练对认知控制能力(多为工作记忆)的影响, 以及不同认知控制能力间训练效果的迁移. 结果表明, 神经可塑性是终身存在的, 不论是长期还是短期的训练都存在阳性结果, 例如, 儿童在经过“Braintwister”训练后得到的能力提高可以迁移到其他未经训练的有关工作记忆的测试以及阅读能力上^[77]. 前人的研究发现, 认知

训练的确可以提高不同年龄组, 包括儿童、成年早期和老年组的认知控制水平^[89,108], 但训练的短期效果以及迁移能力却存在差异. 比如, 有元分析文献指出, 在经过修正分析后并没有证据表明工作记忆训练可以提高智力测量的表现^[89]. 另外有研究将经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)、运动和认知训练结合在一起, 训练组的表现同样显著优于控制组. 这似乎预示着认知训练能作用于不同的生命发展阶段^[88]. 那么, 对于不同年龄组的人群, 如何开展更有针对性的认知控制训练, 其训练结果对于当前的生活状态以及之后的发展是否能对持续的影响, 值得未来研究进一步探索。

5 国内发展路线图

当前老龄化问题日渐显现, 探明认知控制发展的神经生理机制, 不仅有助于解决认知控制及其发展失衡所导致的成瘾行为障碍, 对于年龄增长所带来的认知老化等问题同样有重要意义. 我国在认知控制发展神经科学方面的研究面临着机遇与挑战. 国内应在以下几个方面部署发展路线。

首先, 建设认知控制的标准化测量任务. 目前认知的概念相对分散、重叠, 导致研究结果不一致. 对认知控制概念的构建需要基于经典的研究范式和测量指标, 并结合认知控制神经机制研究的证据进行合理分类. 未来的研究需要系统梳理认知控制相关的概念结构, 形成包含概念和测试任务的认知图谱, 建立标准化的测量工具和测试任务集, 构建认知控制及其发展的理论维度体系, 进一步完成标准化测试任务平台的搭建^[109], 为认知控制发展研究的进一步开展奠定理论和方法学基础。

其次, 建设认知控制及其发展的常模数据库. 基于认知控制的完整理论维度体系, 以及标准化的测量工具, 后续的研究应进一步采集大规模的队列数据. 认知控制的发展需要建立一个适应我国人群、在单一功能体系下跨维度并且与其他心理功能测试任务交叉的常模数据库, 从而汇总认知控制多维度大规模队列研究的数据, 绘制发展轨线, 检验有关脑与行为发展的理论。

再次, 对认知控制及其发展的调控因素进行多层次检验. 认知控制的发展不仅体现在宏观的行为层面

以及脑发育层面。近期的双生子研究为探索单一心理功能如何受基因与环境因素的影响提供了方法学的参考^[110,111]。未来研究应更加深入地从基因、分子等多个水平上检验认知控制水平的发展受到哪些因素调控。从人类、动物实验出发, 认知控制发展的调控因素需要来自跨学科交叉证据的检验。

最后, 着眼实际应用, 建设认知控制能力的训练工具, 将实验室研究应用于实践。基于标准化的常模数据库与测量工具建设, 未来将能够像生长发育曲线

一样, 去识别诊断个体的认知控制发展水平是正常, 还是超常或失常。不论是儿童、青少年的认知控制能力发展变化, 还是老年人认知控制能力衰退所导致的认知障碍, 以及脑损伤后的心理功能评估和诊断, 后续的研究将能够形成一套针对性的干预训练方法。开发针对认知能力发展各个维度的训练工具, 并按照具体维度开发不同的训练方法。这些精准的训练工具将为认知控制多维度发展的干预训练提供有力的保障。

参考文献

- 1 Miller E K, Cohen J D. An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu Rev Neurosci*, 2001, 24: 167–202
- 2 Yang G C, Li Z H, Wu H Y, et al. Generality and specificity of cognitive control: research logics and debates (in Chinese). *Acta Physiol Sin*, 2019, 71: 140–148 [杨国春, 李政汉, 伍海燕, 等. 认知控制的一般性/特异性机制: 研究逻辑和争论. *生理学报*, 2019, 71: 140–148]
- 3 Cohen J D. Cognitive control: Core constructs and current considerations. In: Egner T, ed. *The Wiley Handbook of Cognitive Control*. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2017. 1–28
- 4 Lenartowicz A, Kalar D J, Congdon E, et al. Towards an ontology of cognitive control. *Top Cogn Sci*, 2010, 2: 678–692
- 5 Egner T. *The Wiley Handbook of Cognitive Control*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017
- 6 Paulsen D J, Hallquist M N, Geier C F, et al. Effects of incentives, age, and behavior on brain activation during inhibitory control: a longitudinal fMRI study. *Dev Cogn Neurosci*, 2015, 11: 105–115
- 7 Kail R V, Ferrer E. Processing speed in childhood and adolescence: Longitudinal models for examining developmental change. *Child Dev*, 2007, 78: 1760–1770
- 8 Manzi A, Nessler D, Czernochowski D, et al. The development of anticipatory cognitive control processes in task-switching: An ERP study in children, adolescents, and young adults. *Psychophysiology*, 2011, 48: 1258–1275
- 9 Diamond A. Executive functions. *Annu Rev Psychol*, 2013, 64: 135–168
- 10 Li Z, Göschl F, Yang G. Dissociated neural mechanisms of target and distractor processing facilitated by expectations. *J Neurosci*, 2020, 40: 1997–1999
- 11 Hommel B, Li K Z, Li S C. Visual search across the life span. *Dev psychol*, 2004, 40: 545–548
- 12 Enns J T, Brodner D A, Trick L M. Selective attention over the life span: Behavioral measures. In: Richards J E, ed. *Cognitive Neuroscience of Attention*. New York: Psychology Press, 1998. 393–418
- 13 Wolf K, Galeano Weber E, van den Bosch J J F, et al. Neurocognitive development of the resolution of selective visuo-spatial attention: Functional MRI evidence from object tracking. *Front Psychol*, 2018, 9: 1106
- 14 Geerligs L, Saliasi E, Maurits N M, et al. Brain mechanisms underlying the effects of aging on different aspects of selective attention. *NeuroImage*, 2014, 91: 52–62
- 15 Davies P L, Segalowitz S J, Gavin W J. Development of response-monitoring ERPs in 7-to 25-year-olds. *Dev Neuropsychol*, 2004, 25: 355–376
- 16 Liu X, Liu T, Shangquan F, et al. Neurodevelopment of conflict adaptation: Evidence from event-related potentials. *Dev Psychol*, 2018, 54: 1347–1362
- 17 Jongen E M M, Jonkman L M. The developmental pattern of stimulus and response interference in a color-object Stroop task: an ERP study. *BMC Neurosci*, 2008, 9: 82
- 18 Bryce D, Szűcs D, Soltész F, et al. The development of inhibitory control: an averaged and single-trial lateralized readiness potential study. *NeuroImage*, 2011, 57: 671–685
- 19 Yeung M K, Lee T L, Chan A S. Neurocognitive development of flanker and stroop interference control: A near-infrared spectroscopy study. *Brain Cogn*, 2020, 143: 105585

- 20 Sheridan M, Kharitonova M, Martin R E, et al. Neural substrates of the development of cognitive control in children ages 5-10 years. *J Cogn Neurosci*, 2014, 26: 1840–1850
- 21 Li Q, Yang G, Li Z, et al. Conflict detection and resolution rely on a combination of common and distinct cognitive control networks. *Neurosci Biobehav Rev*, 2017, 83: 123–131
- 22 Isbell E, Fukuda K, Neville H J, et al. Visual working memory continues to develop through adolescence. *Front Psychol*, 2015, 6: 696
- 23 Pliatsikas C, Verissimo J, Babcock L, et al. Working memory in older adults declines with age, but is modulated by sex and education. *Q J Exp Psychol*, 2019, 72: 1308–1327
- 24 Patael S Z, Farris E A, Black J M, et al. Brain basis of cognitive resilience: Prefrontal cortex predicts better reading comprehension in relation to decoding. *PLoS ONE*, 2018, 13: e0198791
- 25 Cabeza R, Anderson N D, Locantore J K, et al. Aging gracefully: compensatory brain activity in high-performing older adults. *NeuroImage*, 2002, 17: 1394–1402
- 26 Eyler L T, Sherzai A, Kaup A R, et al. A review of functional brain imaging correlates of successful cognitive aging. *Biol Psychiatry*, 2011, 70: 115–122
- 27 Spreng R N, Wojtowicz M, Grady C L. Reliable differences in brain activity between young and old adults: a quantitative meta-analysis across multiple cognitive domains. *Neurosci Biobehav Rev*, 2010, 34: 1178–1194
- 28 Chen C C, Kuo J C, Wang W J. Distinguishing the visual working memory training and practice effects by the effective connectivity during n-back tasks: A DCM of ERP study. *Front Behav Neurosci*, 2019, 13: 84
- 29 Anderson P. Assessment and development of executive function (EF) during childhood. *Child Neuropsychol*, 2002, 8: 71–82
- 30 Cepeda N J, Kramer A F, Gonzalez de Sather J C M. Changes in executive control across the life span: Examination of task-switching performance. *Dev Psychol*, 2001, 37: 715–730
- 31 Garrett D D, Kovacevic N, McIntosh A R, et al. The importance of being variable. *J Neurosci*, 2011, 31: 4496–4503
- 32 Rubia K, Smith A B, Woolley J, et al. Progressive increase of frontostriatal brain activation from childhood to adulthood during event-related tasks of cognitive control. *Hum Brain Mapp*, 2006, 27: 973–993
- 33 Ezekiel F, Bosma R, Morton J B. Dimensional Change Card Sort performance associated with age-related differences in functional connectivity of lateral prefrontal cortex. *Dev Cogn Neurosci*, 2013, 5: 40–50
- 34 Williams B R, Ponesse J S, Schachar R J, et al. Development of inhibitory control across the life span. *Dev Psychol*, 1999, 35: 205–213
- 35 Bedard A C, Nichols S, Barbosa J A, et al. The development of selective inhibitory control across the life span. *Dev Neuropsychol*, 2002, 21: 93–111
- 36 Casey B J, Somerville L H, Gotlib I H, et al. Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 14998–15003
- 37 Tsvetanov K A, Ye Z, Hughes L, et al. Activity and connectivity differences underlying inhibitory control across the adult life span. *J Neurosci*, 2018, 38: 7887–7900
- 38 Luna B, Padmanabhan A, O’Hearn K. What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence? *Brain Cogn*, 2010, 72: 101–113
- 39 Bari A, Robbins T W. Inhibition and impulsivity: behavioral and neural basis of response control. *Prog Neurobiol*, 2013, 108: 44–79
- 40 Ho G, Scialfa C T. Age, skill transfer, and conjunction search. *J Gerontol Ser B Psychol Sci Soc Sci*, 2002, 57: P277–P287
- 41 Reed A E, Carstensen L L. The theory behind the age-related positivity effect. *Front Psychol*, 2012, 3: 339
- 42 Sasse L K, Gamer M, Büchel C, et al. Selective control of attention supports the positivity effect in aging. *PLoS ONE*, 2014, 9: e104180
- 43 Brummer L, Stopa L, Bucks R. The influence of age on emotion regulation strategies and psychological distress. *Behav Cogn Psychother*, 2014, 42: 668–681
- 44 Polich J. Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b. *Clin Neurophysiol*, 2007, 118: 2128–2148
- 45 Coles M G. Modern mind-brain reading: psychophysiology, physiology, and cognition. *Psychophysiology*, 1989, 26: 251–269
- 46 Baddeley A. Working memory and language: an overview. *J Commun Disord*, 2003, 36: 189–208
- 47 McNamara J K, Wong B. Memory for everyday information in students with learning disabilities. *J Learn Disabil*, 2003, 36: 394–406
- 48 Knoop-van Campen C A N, Segers E, Verhoeven L. How phonological awareness mediates the relation between working memory and word reading efficiency in children with dyslexia. *Dyslexia*, 2018, 24: 156–169

- 49 Williams D L, Goldstein G, Carpenter P A, et al. Verbal and spatial working memory in autism. *J Autism Dev Disord*, 2005, 35: 747–756
- 50 Grady C L. Cognitive neuroscience of aging. *Ann N Y Acad Sci*, 2008, 1124: 127–144
- 51 Dajani D R, Uddin L Q. Demystifying cognitive flexibility: Implications for clinical and developmental neuroscience. *Trends Neurosci*, 2015, 38: 571–578
- 52 Chevalier N, Blaye A, Dufau S, et al. What visual information do children and adults consider while switching between tasks? Eye-tracking investigation of cognitive flexibility development. *Dev Psychol*, 2010, 46: 955–972
- 53 Lucenet J, Blaye A, Chevalier N, et al. Cognitive control and language across the life span: Does labeling improve reactive control? *Dev Psychol*, 2014, 50: 1620–1627
- 54 Moriguchi Y, Hiraki K. Neural origin of cognitive shifting in young children. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 6017–6021
- 55 Dayan P, Balleine B W. Reward, motivation, and reinforcement learning. *Neuron*, 2002, 36: 285–298
- 56 Geier C F, Terwilliger R, Teslovich T, et al. Immaturities in reward processing and its influence on inhibitory control in adolescence. *Cereb Cortex*, 2010, 20: 1613–1629
- 57 Arias-Carrión O, Salama M. Reward-seeking behavior and addiction: cause or cog? *Curr Drug Abuse Rev*, 2012, 5: 178–189
- 58 Montague P R, Hyman S E, Cohen J D. Computational roles for dopamine in behavioural control. *Nature*, 2004, 431: 760–767
- 59 Casey B J, Getz S, Galvan A. The adolescent brain. *Dev Rev*, 2008, 28: 62–77
- 60 Steinberg L, Albert D, Cauffman E, et al. Age differences in sensation seeking and impulsivity as indexed by behavior and self-report: Evidence for a dual systems model. *Dev Psychol*, 2008, 44: 1764–1778
- 61 Casey B J, Duhoux S, Malter Cohen M. Adolescence: what do transmission, transition, and translation have to do with it? *Neuron*, 2010, 67: 749–760
- 62 Luna B, Wright C. Adolescent brain development: Implications for the juvenile criminal justice system. In: Heilbrun K, ed. *APA Handbook of Psychology and Juvenile Justice*. Washington: American Psychological Association, 2016. 91–116
- 63 Casey B J, Heller A S, Gee D G, et al. Development of the emotional brain. *Neurosci Lett*, 2019, 693: 29–34
- 64 Ahmed S P, Bittencourt-Hewitt A, Sebastian C L. Neurocognitive bases of emotion regulation development in adolescence. *Dev Cogn Neurosci*, 2015, 15: 11–25
- 65 Cragg L, Nation K. Language and the development of cognitive control. *Top Cogn Sci*, 2010, 2: 631–642
- 66 Galvan A. Adolescent development of the reward system. *Front Hum Neurosci*, 2010, 4
- 67 Luna B. Developmental changes in cognitive control through adolescence. *Adv Child Dev Behav*, 2009, 37: 233–278
- 68 Weissman D G, Schriber R A, Fassbender C, et al. Earlier adolescent substance use onset predicts stronger connectivity between reward and cognitive control brain networks. *Dev Cogn Neurosci*, 2015, 16: 121–129
- 69 Aldao A, Gee D G, De Los Reyes A, et al. Emotion regulation as a transdiagnostic factor in the development of internalizing and externalizing psychopathology: Current and future directions. *Dev Psychopathol*, 2016, 28: 927–946
- 70 Allard E S, Kensinger E A. Age-related differences in functional connectivity during cognitive emotion regulation. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci*, 2014, 69: 852–860
- 71 Liu T, Shi J, Zhang Q, et al. Neural mechanisms of auditory sensory processing in children with high intelligence. *Neuroreport*, 2007, 18: 1571–1575
- 72 Peltz C B, Corrada M M, Berlau D J, et al. Incidence of dementia in oldest-old with amnesic MCI and other cognitive impairments. *Neurology*, 2011, 77: 1906–1912
- 73 Unverzagt F W, Gao S, Baiyewu O, et al. Prevalence of cognitive impairment: Data from the indianapolis study of health and aging. *Neurology*, 2001, 57: 1655–1662
- 74 Zhu C W, Sano M, Ferris S H, et al. Health-related resource use and costs in elderly adults with and without mild cognitive impairment. *J Am Geriatr Soc*, 2013, 61: 396–402
- 75 Clare L, Woods R T. Cognitive training and cognitive rehabilitation for people with early-stage Alzheimer’s disease: A review. *Neuropsychol Rehabil*, 2004, 14: 385–401
- 76 Jak A J, Seelye A M, Jurick S M. Crosswords to computers: A critical review of popular approaches to cognitive enhancement. *Neuropsychol Rev*, 2013, 23: 13–26
- 77 Lampit A, Hallock H, Valenzuela M. Computerized cognitive training in cognitively healthy older adults: a systematic review and meta-analysis

of effect modifiers. *PLoS Med*, 2014, 11: e1001756

- 78 Brehmer Y, Li S C, Müller V, et al. Memory plasticity across the life span: Uncovering children's latent potential. *Dev Psychol*, 2007, 43: 465–478
- 79 Karbach J, Kray J. How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training. *Dev Sci*, 2009, 12: 978–990
- 80 Karbach J, Mang S, Kray J. Transfer of task-switching training in older age: The role of verbal processes. *Psychol Aging*, 2010, 25: 677–683
- 81 Dorbath L, Hasselhorn M, Titz C. Aging and executive functioning: A training study on focus-switching. *Front Psychol*, 2011, 2: 257
- 82 Strobach T, Frensch P, Müller H, et al. Age- and practice-related influences on dual-task costs and compensation mechanisms under optimal conditions of dual-task performance. *Aging Neuropsychol Cogn*, 2012, 19: 222–247
- 83 Strobach T, Liepelt R, Schubert T, et al. Task switching: effects of practice on switch and mixing costs. *Psychol Res*, 2012, 76: 74–83
- 84 Karbach J, Verhaeghen P. Making working memory work: a meta-analysis of executive-control and working memory training in older adults. *Psychol Sci*, 2014, 25: 2027–2037
- 85 van Balkom T D, van den Heuvel O A, Berendse H W, et al. The effects of cognitive training on brain network activity and connectivity in aging and neurodegenerative diseases: a systematic review. *Neuropsychol Rev*, 2020, 30: 267–286
- 86 Wass S V, Scerif G, Johnson M H. Training attentional control and working memory—Is younger, better? *Dev Rev*, 2012, 32: 360–387
- 87 Dahlin E, Neely A S, Larsson A, et al. Transfer of learning after updating training mediated by the striatum. *Science*, 2008, 320: 1510–1512
- 88 Elmasry J, Loo C, Martin D. A systematic review of transcranial electrical stimulation combined with cognitive training. *Restor Neurol Neuros*, 2015, 33: 263–278
- 89 Chiesa A, Calati R, Serretti A. Does mindfulness training improve cognitive abilities? A systematic review of neuropsychological findings. *Clin Psychol Rev*, 2011, 31: 449–464
- 90 Alexandra L, Sabine W, Carolin T. Grandchild-grandparent relationships in different family types: Children's view. *Int J Psychol*, 2012, 47: 281
- 91 Burke C A. Mindfulness-based approaches with children and adolescents: a preliminary review of current research in an emergent field. *J Child Fam Stud*, 2010, 19: 133–144
- 92 Siripornpanich V, Sampoon K, Chaithirayanon S, et al. Enhancing brain maturation through a mindfulness-based education in elementary school children: a quantitative EEG study. *Mindfulness*, 2018, 9: 1877–1884
- 93 Kelly A M C, Uddin L Q, Biswal B B, et al. Competition between functional brain networks mediates behavioral variability. *NeuroImage*, 2008, 39: 527–537
- 94 Baggio H C, Segura B, Sala-Llanch R, et al. Cognitive impairment and resting-state network connectivity in Parkinson's disease. *Hum Brain Mapp*, 2015, 36: 199–212
- 95 Hampson M, Driesen N, Roth J K, et al. Functional connectivity between task-positive and task-negative brain areas and its relation to working memory performance. *Magn Reson Imag*, 2010, 28: 1051–1057
- 96 Luders E. Exploring age-related brain degeneration in meditation practitioners. *Ann NY Acad Sci*, 2014, 1307: 82–88
- 97 Brehmer Y, Westerberg H, Bäckman L. Working-memory training in younger and older adults: training gains, transfer, and maintenance. *Front Hum Neurosci*, 2012, 6: 63
- 98 Bürki C N, Ludwig C, Chicherio C, et al. Individual differences in cognitive plasticity: an investigation of training curves in younger and older adults. *Psychol Res*, 2014, 78: 821–835
- 99 Schmiedek F, Lövdén M, Lindenberger U. Hundred days of cognitive training enhance broad cognitive abilities in adulthood: findings from the COGITO study. *Front Aging Neurosci*, 2010, 2: 27
- 100 Langer N, von Bastian C C, Wirz H, et al. The effects of working memory training on functional brain network efficiency. *Cortex*, 2013, 49: 2424–2438
- 101 Zinke K, Zeintl M, Rose N S, et al. Working memory training and transfer in older adults: Effects of age, baseline performance, and training gains. *Dev Psychol*, 2014, 50: 304–315
- 102 Borella E, Carretti B, Cantarella A, et al. Benefits of training visuospatial working memory in young-old and old-old. *Dev Psychol*, 2014, 50: 714–727
- 103 Bherer L, Kramer A F, Peterson M S, et al. Transfer effects in task-set cost and dual-task cost after dual-task training in older and younger adults: further evidence for cognitive plasticity in attentional control in late adulthood. *Exp Aging Res*, 2008, 34: 188–219

- 104 West J, Denton K, Germino-Hausken E. America's Kindergartners: Findings from the Early Childhood Longitudinal Study, Kindergarten Class of 1998-99, Fall 1998. Educational Resources Information Center, 2000. NCES 2000-070
- 105 Min L B, Ma Y, Guo L P. The early childhood longitudinal study project of kindergarten class (ECLS-K) in the US and its enlightenment (in Chinese). *J School Stud*, 2016, 13: 92-99 [闵兰斌, 马鹰, 郭力平. 美国早期儿童纵向研究项目(ECLS-K)及其启示. 基础教育, 2016, 13: 92-99]
- 106 Peltz C B, Gratton G, Fabiani M. Age-related changes in electrophysiological and neuropsychological indices of working memory, attention control, and cognitive flexibility. *Front Psychol*, 2011, 2: 190
- 107 Blakey E, Visser I, Carroll D J. Different executive functions support different kinds of cognitive flexibility: Evidence from 2-, 3-, and 4-year-olds. *Child Dev*, 2016, 87: 513-526
- 108 Melby-Lervåg M, Hulme C. Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Dev Psychol*, 2013, 49: 270-291
- 109 Sun Y W, Chen Z W, Cao S Q, et al. Survey on standardized testing platform of psychological experiment based on cognitive atlas (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2201-2208 [孙雨薇, 陈子炜, 曹思琪, 等. 基于认知图谱的心理实验标准化测试平台调研. 科学通报, 2020, 65: 2201-2208]
- 110 Selzam S, Ritchie S J, Pingault J B, et al. Comparing within- and between-family polygenic score prediction. *Am J Hum Genet*, 2019, 105: 351-363
- 111 Lee T, Sachdev P. The contributions of twin studies to the understanding of brain ageing and neurocognitive disorders. *Curr Opin Psychiatry*, 2014, 27: 122-127

Developmental neuroscience of cognitive control: the future path and layout

QI Yue^{1,2}, YANG GuoChun^{3,4}, FU Di^{3,4}, LI ZhengHan^{3,4} & LIU Xun^{3,4}

1 The Department of Psychology, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

2 The Laboratory of the Department of Psychology, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

3 CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4 Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Cognitive control is the top-down process by which individuals store, plan, and manipulate relevant information through the deployment of resources during information processing. Cognitive control encompasses different research perspectives such as selective attention, conflict resolution, working memory, cognitive flexibility, and inhibitory control, each of which has its own unique lifelong developmental characteristics. It is of great significance to combine the psychophysical and neuroimaging techniques, in order to elucidate the developmental mechanism of cognitive control, investigate the delicate balance and interaction between cognitive control and other psychological functions, and explore the plasticity and training of cognitive control. This may contribute to solving the problems such as addictive behavioral disorders caused by the imbalance of cognitive control development as well as decline of cognitive control in cognitive aging. At present, large-scale standardized testing of cognitive control is still lacking. Considering that cognitive control consists of several sub-dimensions, future research should focus on the development of standardized test battery, the construction of normative databases, and the combination of existing big data analysis techniques to examine the developmental and regulatory factors of cognitive control at different levels. This review article analyzed the opportunities and challenges faced by the current research in China, and also proposed the future development plan and roadmap based on previous research on the lifelong development of cognitive control.

cognitive control, development, neuroscience, roadmap

doi: [10.1360/SSV-2020-0248](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0248)