

# 努力控制及其神经基础\*

郭娜娜 吴国榕\*\* 毕明华 邱江

(西南大学心理学部, 重庆, 400715)

**摘要** 本文对努力控制的概念、发展及其神经基础进行了归纳和总结。我们发现努力控制涉及的脑区主要包括背外侧和腹外侧前额叶, 前扣带回, 顶上和顶下小叶以及辅助运动皮层等。此外, 通过分析对比后发现努力控制与执行功能之间在行为表现和神经基础上有密切关系: 两者都与个体的学业成绩、情绪状态和攻击行为等有关; 努力控制涉及的脑区有很大部分处于具有执行功能的突显网络和额顶控制网络。这些证据表明两者之间可能有共同的脑结构基础。

**关键词** 气质努力控制 神经基础 外侧前额叶 前扣带回 执行功能

## 1 前言

努力控制 (effortful control) 是与注意相关的气质维度, 反映了个体在情绪调节和行为调节方面的差异。努力控制的概念最早是 Rothbart 等人通过对儿童行为问卷进行因素分析而提出的 (Rothbart, Ahadi, Hershey, & Fisher, 2001)。近年来, 很多研究发现个体努力控制的发展水平会影响其他心理特征的发展状况, 比如, 研究发现努力控制的发展水平与儿童的情绪表现有关, 一般表现为努力控制水平高的个体能够更好的控制自己的情绪状态, 情绪表现也相对稳定 (Bridgett, Oddi, Laake, Murdock, & Bachmann, 2013; Smith, Diaz, Day, & Bell, 2016; Vroman & Durbin, 2015)。除此之外, 努力控制还与学龄期儿童的学业成绩和社会性发展有关; 研究发现在控制初始成绩的情况下, 努力控制的发展水平能够正向预测儿童几年后的学业成绩, 故可尝试通过训练提高个体的努力控制水平, 进而提高个体的学业成绩 (Blair & Razza, 2007; VanSchyndel, Eisenberg, Valiente, & Spinrad, 2017; Zhou, Main, & Wang, 2010)。另外, 研究发现努力控制和执行功能的关系十分紧密, 在一些涉及执行功能的任务中, 任务的表现水平会受到努力控制水平的影响, 个体的努力控制水平越高则 flanker 任务的表现就越好 (Kanske & Kotz, 2012)。因此本研究以两者的神经基

础为着眼点, 从神经基础的角度来探讨两者之间的关系。鉴于努力控制在个体发展中的重要作用, 本文先综述了目前关于努力控制的研究, 然后再介绍努力控制与执行功能的关系, 以及两者在神经基础上的共性和差异。

## 2 努力控制

### 2.1 努力控制概述

Rothbart 最早提出了努力控制的概念。一般认为努力控制是执行注意发展的结果, 主要包括为了执行某个非优势反应而能够主动抑制优势反应的能力、计划的能力、以及错误监测的能力 (Rothbart, Posner, & Kieras, 2008)。它反应了气质中与自我调节能力和执行功能有关的成分, 是气质的一个重要的组成成分, 对个体的正常发展起着至关重要的作用。努力控制的概念包括三个方面的内容: 注意控制, 抑制控制和激活控制 (Evans & Rothbart, 2007)。努力控制一般通过自评或他评问卷来测量, 最常用的工具是 Rothbart 等人设计的一系列适用于不同年龄阶段个体的气质问卷, 年龄范围覆盖婴儿、学龄儿童、青少年和成人 (Ellis & Rothbart, 2001; Evans & Rothbart, 2007; Gartstein & Rothbart, 2003; Putnam, Gartstein, & Rothbart, 2006; Rothbart, 1981; Rothbart et al., 2001; Simonds & Rothbart, 2004)。我们在使用问卷测量法测量努力控制时要注意根据被试的具

\* 本研究得到国家自然科学基金项目 (61403312) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (SWU116074) 的资助。

\*\* 通讯作者: 吴国榕。E-mail: gronwu@gmail.com

DOI: 10.16719/j.cnki.1671-6981.20180306

体年龄来选择合适的问卷。其次,研究者也常通过实验法来测量努力控制,主要是设定一些能够反映努力控制相关品质的任务。多数用于测量努力控制的实验任务都是适用于婴儿晚期到学龄前儿童 (Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994; Kochanska et al., 1996; Kochanska, Murray, & Harlan, 2000)。除此之外,也可以在自然环境中观察个体的行为反应来评估努力控制 (Rothbart & Goldsmith, 1985)。

## 2.2 努力控制的发展

一般认为努力控制在儿童早期发展迅速,到了小学阶段发展开始变得缓慢。努力控制最早出现在儿童 7~9 个月大时,将近 1 岁时努力控制的各个方面开始发展,2 岁以后迅速发展,并一直发展到 7 岁左右。进入小学阶段以后发展速度开始下降,但努力控制的能力仍不断提高,一直发展到成年初期并达到峰值,随后趋于平缓 (Kochanska et al., 2000)。Kochanska 和 Murray 设计了一套测验来评价 9~45 个月儿童努力控制的发展,这套测验主要包括延迟等待、减少身体活动、按信号抑制或执行、努力注意和轻声低语 (Kochanska et al., 2000)。结果发现,22~23 个月的儿童努力控制能力有稳定提高,其中女孩比男孩的表现更好。30 个月以后儿童在任务上的表现具有高度的一致性,表明他们的努力控制能力是随着年龄的增长逐步发展起来的。

Kochanska 和 Knaack 进一步追踪了被试儿童,指出“到 45 个月时,努力控制成为了一种高度连贯的、稳定的人格特征”。一般到了成年以后努力控制就相对稳定了,并且在很长一段时间内保持稳定。

## 2.3 努力控制与执行功能的关系

努力控制是气质中与自我调节能力以及执行功能有关的成分。执行功能 (executive function) 是指控制行为的一系列认知过程,包括注意控制、认知抑制、抑制控制、工作记忆和认知灵活性等。较高级别的执行功能需要同时调动多种认知过程 (Chan, Shum, Touloupoulou, & Chen, 2008; Diamond, 2013)。一般当个体遇到新的未知情景时会涉及到执行功能的认知过程,因为在这种新的环境中之前已经形成的自动化行为反应已不再适用,它需要调动认知过程来组织新的行为反应,这个过程与个体调动认知资源做出行为改变的过程有关。一般认为执行功能发生作用的过程是:面对变化了的环境时,个体首先需要确认具体哪些环境成分发生了变化,在确定原先的策略已不再适合当前环境之后,个体首先要

抑制当前已经产生的应对老环境的反应冲动,然后选择新的反应策略。选择新的反应策略时,个体需要综合考虑各种信息,然后灵活地做出适合当前环境的反应 (Dajani & Uddin, 2015)。在这个过程中,既涉及到抑制控制的过程,也涉及到注意控制和反应选择决策的过程。前面已经提到,抑制控制既是努力控制的一个子维度,又是执行功能的一个成分,所以努力控制和执行功能是有共同之处的。努力控制和执行功能之间的共同之处在一些研究中也有所体现。Kanske 和 Kotz 研究发现努力控制高的相对于努力控制低的个体,冲突加工的过程更快 (Kanske & Kotz, 2012)。Zhou 等提出努力控制和执行控制功能都是自我调节的主要成分,并且两者在定义、核心成分以及测量方法上都有很多的相似和重叠,这预示着努力控制和执行控制功能可能存在密切联系 (Zhou, Chen, & Main, 2012)。Simonds 等研究发现,7 到 10 岁的儿童努力控制与执行注意的发展水平有关,执行注意的水平越高则个体努力控制的能力越好 (Simonds, Kieras, Rueda, & Rothbart, 2007)。不仅行为研究发现了努力控制和执行功能之间存在密切联系,关于两者的神经影像研究也发现它们具有一些共同的神经基础,它进一步说明了努力控制和执行功能之间的关联性。

## 3 努力控制的神经基础

### 3.1 背外侧前额叶和腹外侧前额叶

前额叶在控制行为、思想和情感方面具有重要作用,能够控制不适宜的行为和情感,在活动中发挥着较高层次的指导和控制监督作用,指导个体的行为朝着既定目标努力,避免受到无关信息的干扰 (Buchsbaum, 2004; Chayer & Freedman, 2001)。背外侧前额叶具有初级的执行功能,控制认知加工的过程,主要包括工作记忆、认知灵活性和计划等 (Miller & Cohen, 2001)。很多研究都发现了努力控制与背外侧前额叶和腹外侧前额叶的功能有关。Vijayakumar 等进行了一项为期 4 年的 MRI 纵向追踪研究,结果发现腹外侧前额叶和背外侧前额叶皮层厚度都随着努力控制的发展而降低 (Vijayakumar et al., 2014)。一般认为前部扣带回、腹外侧前额叶和背外侧前额叶的皮层厚度变化反映了一种自然的神经生物学过程,这些脑区皮层厚度的降低提高了神经元之间连接的效率,增强了神经元放电模式的稳定性 (Rutherford, Nelson, & Turrigiano, 1998)。因此,青少年时期前

部扣带回等脑区的皮层厚度随着个体的发展而降低,神经元的连接效率增强,努力控制的水平也逐渐提高。还有研究发现努力控制与外侧前额叶的激活有关 (Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002; Fan, Fossella, Sommer, Wu, & Posner, 2003; Posner, Rothbart, Sheese, & Tang, 2007)。这些结果说明在涉及努力控制的任务中外侧前额叶发挥了重要的作用。Zhang 等人进行了一项关于努力控制的基于体素的形态学分析 (voxel-based morphometry, VBM), 研究发现个体的努力控制水平与背外侧前额叶的灰质体积呈显著正相关 (Zhang et al., 2015)。而灰质是由神经元胞体聚集而成, 一般认为灰质体积越大神经活动的效率就越高 (Miller, Alston, & Corsellis, 1980)。这些结果都说明努力控制和背外侧前额叶和腹外侧前额叶的功能有关 (图 1, 红色节点, 具体见网络版彩图)。在图 1 中, 我们总结了以往研究与努力控制有关的脑区, 每个区域以小球来表示 (球的大小正比于脑区在以往研究结果中出现的频数), 绘图基于 BrainNet Viewer 软件 ([http:// www. nitrc.org/projects/bnv/](http://www.nitrc.org/projects/bnv/) (Xia, Wang, & He, 2013))

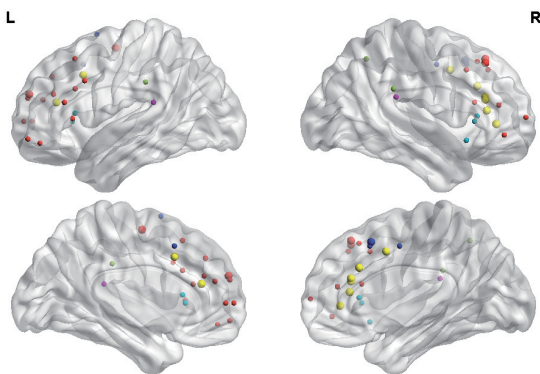


图 1

以往关于努力控制研究所涉及的脑区。红色节点属于额叶区域, 黄色节点属于前扣带区域, 绿色节点属于顶叶区域, 浅蓝色节点属于脑岛, 深蓝色节点属于辅助运动皮层, 紫色代表其他脑区 (具体见网络版彩图)。

### 3.2 前扣带回

背侧前扣带是扣带回的重要组成部分, 一般认为, 背侧前扣带在检测错误、结果预期、注意和动机等方面具有重要作用 (Bush, Luu, & Posner, 2000; Carter et al., 1998)。Pessoa 认为努力控制的发展机制不仅与背外侧前额叶和腹外侧前额叶有关, 还与背侧前扣带有关 (Pessoa, 2009)。在 Zhang 等人进行的一项关于努力控制的 VBM 研究中, 发现个体的努

力控制水平与背侧前扣带的灰质体积呈显著正相关 (Zhang et al., 2015), Nouchi 等也做了一项关于努力控制的 VBM 研究, 分别分析了努力控制的几个子维度的生理基础, 结果发现抑制控制的水平与背侧前扣带回的灰质体积呈显著正相关, 注意控制的水平与背侧前扣带的白质体积呈显著正相关 (Nouchi et al., 2016), 这说明背侧前扣带的神经连接效率与努力控制的水平有关, 连接越强则努力控制的水平也越高。在一些涉及努力控制的任务中, 研究者发现背侧前扣带也会激活 (Kanske & Kotz, 2012; Posner et al., 2007; Rothbart & Rueda, 2005)。这说明了在涉及努力控制的任务中前部扣带回也发挥了重要作用。Vijayakumar 等的纵向追踪研究发现努力控制的发展与背侧前扣带回的发展有关, 随着前部扣带回发展的成熟, 个体努力控制的水平也逐渐提高 (Vijayakumar et al., 2014)。综上, 我们认为努力控制的发展与背侧前扣带回有关 (图 1, 黄色节点, 具体见网络版彩图)。

### 3.3 顶上小叶和顶下小叶

顶叶是大脑的一个重要的区域, 一般认为顶叶皮层在集中注意、行为控制和情景记忆的检索过程中起着重要的作用 (Fogassi et al., 2005; Wagner, Shannon, Kahn, & Buckner, 2005)。目前已有一些研究发现大脑顶上小叶和顶下小叶的发展与努力控制存在相关性。例如 Durston 等研究发现在涉及抑制控制的任务中, 对于成人和儿童来说, 顶上小叶和顶下小叶都会显著激活 (Durston et al., 2002), Rothbart 和 Rueda 发现在一些涉及努力控制的 fMRI 研究中, 除了前扣带回以外, 顶上小叶也显著激活了 (Rothbart & Rueda, 2005)。Garavan, Ross 和 Stein 在一项 fMRI 研究中也发现在涉及努力控制的子维度—抑制控制的任务中顶下小叶显著地激活了 (Garavan, Ross, & Stein, 1999), 说明在涉及努力控制的任务中顶下小叶发挥了重要作用。Zhang 等以大学生为被试进行了一项关于努力控制的 VBM 研究中, 发现努力控制的水平与顶上小叶和顶下小叶的灰质体积都呈显著正相关 (Zhang et al., 2015)。这些研究说明努力控制的水平与顶上小叶和顶下小叶的发展水平都有关, 发展水平越高个体努力控制的水平就越高 (图 1, 绿色节点, 具体见网络版彩图)。

### 3.4 脑岛

脑岛是位于外侧裂深面的一个部分, 一般认为脑岛具有认知、情感和调节功能。近来有研究提出



脑岛，尤其是脑岛前部在高级认知和注意过程中也有重要作用 (Menon & Uddin, 2010; Wager & Barrett, 2017)。已有一些研究发现了努力控制和脑岛之间的关联。Garavan, Ross 和 Stein 进行了一项关于努力控制子维度—抑制控制的 fMRI 研究中，结果发现在涉及抑制控制的任务中脑岛前部显著地激活了 (Garavan et al., 1999)，这与近来发现的脑岛前部的高级认知功能是一致的，说明前脑岛在涉及努力控制的任务中也发挥了重要作用。Nouchi, Hong, Chen 等做了一项关于努力控制的 VBM 研究，分别分析了努力控制的几个子维度的生理基础，结果发现注意控制的水平与脑岛的灰质体积呈显著正相关，脑岛的灰质体积越大个体的努力控制水平越高，说明脑岛与努力控制的发展水平有关 (Nouchi et al., 2016) (图 1，浅蓝色节点，具体见网络版彩图)。

### 3.5 辅助运动皮层

辅助运动皮层具有控制、调节运动的作用。一般认为辅助运动皮层的功能主要是在运动方面，包括控制身体平衡、协调运动等 (Swann et al., 2012)。但是最近的研究发现努力控制和辅助运动皮层之间存在相关性。Zhang 等以大学生为被试进行了一项关于努力控制的 VBM 研究，发现努力控制的水平与辅助运动皮层的灰质体积呈显著正相关 (Zhang et al., 2015)。Nouchi 等也进行了一项关于努力控制的 VBM 研究，结果也发现努力控制的水平与辅助运动皮层的灰质体积呈显著正相关，说明辅助运动皮层的发展水平也影响个体的努力控制的水平 (图 1，深蓝色节点，具体见网络版彩图)。但是目前关于辅助运动皮层与努力控制关系的研究不是很多，仍需进一步的探索。

## 4 努力控制和执行功能两者神经基础的关系

涉及到执行功能的脑网络主要是突显网络 (salience network) 和额顶控制网络 (fronto-parietal network) (Niendam et al., 2012)。根据已有研究结果，我们发现努力控制的神经基础，比如前文提到的外侧前额叶、背侧前扣带等，有很多是属于突显网络和额顶控制网络的，那么努力控制和执行功能之间是否真的存在着共同的神经基础便是值得探讨的问题。基于以往的研究结果，采用 BrainNet Viewer 软件绘制出了它们之间的对比图 (图 2，各个节点的数据来自于以往的努力控制和执行功能的相关文献)。结果显示以往研究中与努力控制相关的脑区

有很大一部分都是属于突显网络和额顶控制网络，说明努力控制和执行功能有共同的神经基础的存在。这些共同神经基础的存在，可能说明执行功能和努力控制作用的神经机制是类似的，可能两者的发展都与这些脑区有关。突显网络和额顶控制网络也是努力控制的主要的神经基础，这种结果可能说明努力控制中包含了执行功能的成分，而它的发展与成熟是与突显网络和额顶控制网络的发展与成熟息息相关的。努力控制虽然是气质的一个维度，但是却与执行功能密切相关，说明气质中可能也包含了执行功能的成分，那么传统上认为的气质是先天的的是不影响个体发展好坏的说法便是有待商榷的。因为气质中包含了一部分与执行功能有关的成分，而且这部分成分还会影响到个体的发展，而关于气质的传统分析是没有具体讨论这一点的。

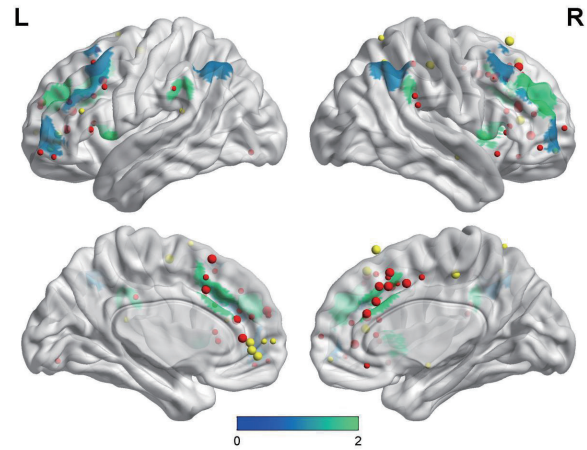


图 2

努力控制与执行功能的神经机制对比图。其中绿色脑区和蓝色脑区分别代表突显网络和额顶控制网络，都是执行功能脑网络。小球代表与努力控制相关的脑区，其中红色小球位于突显网络和额顶控制网络之内，黄色小球位于突显网络和额顶控制网络之外 (具体见网络版彩图)。

## 5 结论和展望

努力控制是气质的一个子维度，其发展水平会影响到个体的学业成绩和情绪等表现。执行功能包括认知控制、抑制控制、工作记忆等一系列认知加工过程，是个体顺利完成很多任务的重要因素。行为研究和影像研究都发现，努力控制和执行功能存在密不可分的联系，努力控制的水平会影响到涉及执行功能的任务表现，两者的神经基础也有很大的重叠和联系。这些证据说明了两之间确实存在密

切联系,努力控制中包含了执行功能的部分过程,反映了气质中与执行功能及认知过程有关的成分。这一结果提示我们以往关于气质的认识与分类可能存在不足,而以往认为的气质是天生的、不影响个体成就高低的说法也有待商榷,可能气质中也包含了一些能够影响个体成就的成分,这些问题需要有更进一步的研究来探索。

未来的研究可以考虑从两个方面着手,首先,关于努力控制的神经基础仍然需要进一步的研究,一方面任务态的研究对于了解努力控制的神经基础非常重要,另一方面探索与努力控制相关脑区之间的纤维连接也有重要的意义。希望通过这两个方面的研究能够对努力控制的作用机制有个更清晰地认识。其次,对于今后的研究,一方面需要进一步对气质的成分进行分析和界定,探索除了以往认为的先天的成分之外,气质中是否还存在受后天环境影响的、影响个体发展的并且与执行功能密切相关的成分;另一方面,关于执行功能和努力控制的神经基础的关系仍然需要进一步的研究,除了已知的都涉及相同的脑区之外,还要探索分别在涉及努力控制和执行功能两种条件下,脑区之间的功能连接和作用机制是否一致,两种情况下脑区之间的连接强弱以及方向和方式是否存在差异。只有明确这一点才可以进一步确定努力控制的神经机制以及努力控制和执行功能之间的关系。

### 参考文献

- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development, 78*(2), 647–663.
- Bridgett, D. J., Oddi, K. B., Laake, L. M., Murdock, K. W., & Bachmann, M. N. (2013). Integrating and differentiating aspects of self-regulation: Effortful control, executive functioning, and links to negative affectivity. *Emotion, 13*(1), 47–63.
- Buchsbaum, M. S. (2004). Frontal cortex function. *American Journal of Psychiatry, 161*(12), 2178–2178.
- Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences, 4*(6), 215–222.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science, 280*(5364), 747–749.
- Chan, R. C. K., Shum, D., Touloupoulou, T., & Chen, E. Y. H. (2008). Assessment of executive functions: Review of instruments and identification of critical issues. *Archives of Clinical Neuropsychology, 23*(2), 201–216.
- Chayer, C., & Freedman, M. (2001). Frontal lobe functions. *Current Neurology and Neuroscience Reports, 1*(6), 547–552.
- Dajani, D. R., & Uddin, L. Q. (2015). Demystifying cognitive flexibility: Implications for clinical and developmental neuroscience. *Trends in Neurosciences, 38*(9), 571–578.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*(1), 135–168.
- Durston, S., Thomas, K. M., Yang, Y. H., Uluğ, A. M., Zimmerman, R. D., & Casey, B. J. (2002). A neural basis for the development of inhibitory control. *Developmental Science, 5*(4), F9–F16.
- Ellis, L. K., & Rothbart, M. K. (2001). Revision of the early adolescent temperament questionnaire. In *Poster presented at the 2001 biennial meeting of the society for research in child development, Minneapolis, Minnesota*.
- Evans, D. E., & Rothbart, M. K. (2007). Developing a model for adult temperament. *Journal of Research in Personality, 41*(4), 868–888.
- Fan, J., Fossella, J., Sommer, T., Wu, Y. H., & Posner, M. I. (2003). Mapping the genetic variation of executive attention onto brain activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100*(12), 7406–7411.
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(3), 340–347.
- Fogassi, L., Ferrari, P. F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., & Rizzolatti, G. (2005). Parietal lobe: From action organization to intention understanding. *Science, 308*(5722), 662–667.
- Garavan, H., Ross, T. J., & Stein, E. A. (1999). Right hemispheric dominance of inhibitory control: An event-related functional MRI study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 96*(14), 8301–8306.
- Gartstein, M. A., & Rothbart, M. K. (2003). Studying infant temperament via the revised infant behavior questionnaire. *Infant Behavior and Development, 26*(1), 64–86.
- Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: Performance of children 3 1/2–7 years old on a stroop-like day–night test. *Cognition, 53*(2), 129.
- Kanske, P., & Kotz, S. A. (2012). Effortful control, depression, and anxiety correlate with the influence of emotion on executive attentional control. *Biological Psychology, 91*(1), 88–95.
- Kochanska, G., Murray, K. T., & Harlan, E. T. (2000). Effortful control in early childhood: Continuity and change, antecedents, and implications for social development. *Developmental Psychology, 36*(2), 220–232.
- Kochanska, G., Murray, K., Jacques, T. Y., Koenig, A. L., & Vandegeest, K. A. (1996). Inhibitory control in young children and its role in emerging internalization. *Child Development, 67*(2), 490–507.
- Menon, V., & Uddin, L. Q. (2010). Saliency, switching, attention and control: A network model of insula function. *Brain Structure and Function, 214*(5–6), 655–667.
- Miller, A. K. H., Alston, R. L., & Corsellis, J. A. N. (1980). Variation with age in the volumes of grey and white matter in the cerebral hemispheres of man: Measurements with an image analyser. *Neuropathology and Applied Neurobiology, 6*(2), 119–132.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience, 24*(1), 167–202.
- Niendam, T. A., Laird, A. R., Ray, K. L., Dean, Y. M., Glahn, D. C., & Carter, C. S. (2012). Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network

- subserving diverse executive functions. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 12(2), 241–268.
- Nouchi, R., Takeuchi, H., Taki, Y., Sekiguchi, A., Kotozaki, Y., Nakagawa, S., Kawashima, R. (2016). Neuroanatomical bases of effortful control: Evidence from a large sample of young healthy adults using voxel-based morphometry. *Scientific Reports*, 6, 31231.
- Pessoa, L. (2009). How do emotion and motivation direct executive control? *Trends in Cognitive Sciences*, 13(4), 160–166.
- Posner, M. I., Rothbart, M. K., Sheese, B. E., & Tang, Y. (2007). The anterior cingulate gyrus and the mechanism of self-regulation. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 7(4), 391–395.
- Putnam, S. P., Gartstein, M. A., & Rothbart, M. K. (2006). Measurement of fine-grained aspects of toddler temperament: The early childhood behavior questionnaire. *Infant Behavior and Development*, 29(3), 386–401.
- Rothbart, M. K. (1981). Measurement of temperament in infancy. *Child Development*, 52(2), 569–578.
- Rothbart, M. K., Ahadi, S. A., Hershey, K. L., & Fisher, P. (2001). Investigations of temperament at three to seven years: The children's behavior questionnaire. *Child Development*, 72(5), 1394–1408.
- Rothbart, M. K., & Goldsmith, H. H. (1985). Three approaches to the study of infant temperament. *Developmental Review*, 5(3), 237–260.
- Rothbart, M. K., Posner, M. I., & Kieras, J. (2008). Temperament, attention, and the development of self-regulation. In K. McCartney & D. Phillips (Eds.), *Blackwell handbook of early childhood development* (pp. 338–357). Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- Rothbart, M. K., & Rueda, M. R. (2005). *Developing individuality in the human brain: A tribute to Michael I. Posner*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Rutherford, L. C., Nelson, S. B., & Turrigiano, G. G. (1998). BDNF has opposite effects on the quantal amplitude of pyramidal neuron and interneuron excitatory synapses. *Neuron*, 21(3), 521–530.
- Simonds, J., Kieras, J. E., Rueda, M. R., & Rothbart, M. K. (2007). Effortful control, executive attention, and emotional regulation in 7–10-year-old children. *Cognitive Development*, 22(4), 474–488.
- Simonds, J., & Rothbart, M. K. (2004). The Temperament in Middle Childhood Questionnaire (TMCQ): A computerized self-report instrument for ages 7–10. *Poster Session Present at the Occasional Temperament Conference*, Athens, GA.
- Smith, C. L., Diaz, A., Day, K. L., & Bell, M. A. (2016). Infant frontal electroencephalogram asymmetry and negative emotional reactivity as predictors of toddlerhood effortful control. *Journal of Experimental Child Psychology*, 142, 262–273.
- Swann, N. C., Cai, W. D., Conner, C. R., Pieters, T. A., Claffey, M. P., George, J. S., Tandon, N. (2012). Roles for the pre-supplementary motor area and the right inferior frontal gyrus in stopping action: Electrophysiological responses and functional and structural connectivity. *NeuroImage*, 59(3), 2860–2870.
- VanSchyndel, S. K., Eisenberg, N., Valiente, C., & Spinrad, T. L. (2017). Relations from temperamental approach reactivity and effortful control to academic achievement and peer relations in early elementary school. *Journal of Research in Personality*, 67, 15–26.
- Vijayakumar, N., Whittle, S., Dennison, M., Yücel, M., Simmons, J., & Allen, N. B. (2014). Development of temperamental effortful control mediates the relationship between maturation of the prefrontal cortex and psychopathology during adolescence: A 4-year longitudinal study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 9, 30–43.
- Vroman, L. N., & Durbin, C. E. (2015). High effortful control is associated with reduced emotional expressiveness in young children. *Journal of Research in Personality*, 58, 46–54.
- Wagner, A. D., Shannon, B. J., Kahn, I., & Buckner, R. L. (2005). Parietal lobe contributions to episodic memory retrieval. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(9), 445–453.
- Xia, M. R., Wang, J. H., & He, Y. (2013). BrainNet viewer: A network visualization tool for human brain connectomics. *PLoS ONE*, 8(7), e68910.
- Zhang, W. H., Li, H., Chen, J., Liu, Q., Liu, X., Wang, D. H., & Shen, J. L. (2015). The association of gray matter volumes in the frontoparietal attention network with temperamental effortful control in young adults: A voxel-based morphometry study. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 233(1), 43–49.
- Zhou, Q., Chen, S. H., & Main, A. (2012). Commonalities and differences in the research on children's effortful control and executive function: A call for an integrated model of self-regulation. *Child Development Perspectives*, 6(2), 112–121.
- Zhou, Q., Main, A., & Wang, Y. (2010). The relations of temperamental effortful control and anger/frustration to Chinese children's academic achievement and social adjustment: A longitudinal study. *Journal of Educational Psychology*, 102(1), 180–196.

# Temperament Effortful Control and its Neuroanatomical Basis

*Guo Nana, Wu Guorong, Bi Minghua, Qiu Jiang*

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

**Abstract** Effectively controlling one's thoughts and behaviors is crucial for one's study and work. This capacity can be evaluated using temperament effortful control (EC). EC is defined as "the efficiency of executive attention, including the ability to inhibit a dominant response and/or to activate a subdominant response, to plan, and to detect errors". EC includes the abilities to voluntarily manage attention and to inhibit or activate behaviors as needed to adapt, especially when people does not want to do so. It is well established that EC includes three sub-dimensions, i.e., inhibitory control, activation control and attention control. Inhibitory control is the capacity to inhibit inappropriate behaviors. Activation control is the capacity to perform an action when there is a strong tendency to avoid it. Attention control is the capacity to focus attention as well as to shift attention when desired. EC reflects the ability to regulate behaviors in accordance with surroundings. Behavioral studies have linked effortful control to children's academic achievement, interpersonal relationship and aggressive behaviors. EC develops rapidly during the infant and preschool years. Functional neuroimaging studies have discovered that EC is associated with the activation of the anterior cingulate cortex (ACC) and prefrontal cortical (PFC) during performing cognitive tasks. Structural imaging studies have revealed a relationship between EC and the PFC maturation during adolescence, and have found that EC is positively related to the dorsal ACC volume. However, previous findings on the neural bases of EC are inconsistent and few studies have been conducted to review EC and its neural basis.

This study reviewed former research about EC, including the concepts and development of EC, as well as its neuroanatomical basis. In addition, we discussed the relationship between EC and executive function. The results have showed that EC and executive function are both related to individual performance on executive control tasks, such as Stroop task, working memory task and spatial conflict task. Besides, brain areas related

to EC are primarily located in salience network and frontal-parietal network, including the prefrontal cortex, anterior cingulate cortex, parietal lobe and supplemental motor area. It is well known that these areas mediate the neural bases of executive function, suggesting that EC and executive function might share common neuroanatomical bases, and salience network and frontal parietal network are the neuroanatomical basis of EC. Given that little is known about the neural basis of EC, this study has provided a detailed and in-depth review on EC, which helps us create a specific and systematic understanding of EC.

**Key words** temperament effortful control, neuroanatomical basis, lateral prefrontal cortical, anterior cingulate cortex, executive function