

儿童执行功能与数学能力关系的发展性研究进展：基于子成分的文献综述

张喆童

河南大学欧亚国际学院，河南开封, 475004

摘 要 数学能力是衡量儿童学业成就的核心指标之一，而执行功能作为高级认知过程，为数学能力的发展提供了关键支撑。本文从子成分视角出发，系统梳理了学前儿童执行功能与数学能力之间关系的发展性特征。各子成分对数学能力表现出特异性贡献，其背后涉及不同的神经机制。此外，本文还拓展了对“热执行功能”的讨论，探讨了情感调节与数学动机在儿童应对数学挑战过程中的调节作用。基于现有证据，文章进一步提出了从早期筛查识别到开发“数学-认知”融合课程等一系列教育启示，旨在为促进儿童数学能力与执行功能的协同发展提供理论参考与实践依据。

关键词 学前儿童；执行功能；数学能力；子成分特异性；双向互惠模型；发展性关系

The Developmental Relationship Between Executive Function and Mathematical Ability in Children: A Literature Review Based on Sub-components

ZHANG Zhetong

Eurasia International College, Henan University, Kaifeng, Henan 475004

Received: February 23, 2026

Revised: March 21, 2026

Accepted: March 22, 2026

Published: April 20, 2026

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Axon Academic Publishing Institute, Hong Kong, China. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract Mathematical achievement is a core indicator of children's academic success, and executive function (EF), as a high-level cognitive process, provides critical support for its development. From the perspective of sub-components, this paper systematically reviews the developmental characteristics of the relationship between preschool children's executive function and mathematical ability. Specific sub-components contribute differentially to mathematical skills, underpinned by distinct neural mechanisms. Furthermore, the discussion is extended to "hot executive function," exploring the moderating roles of emotional regulation and math motivation in how children cope with mathematical challenges. Based on existing evidence, the paper

proposes a series of educational implications, ranging from early screening and identification to the development of integrated "math-cognitive" curricula. These insights aim to provide a theoretical framework and practical basis for promoting the synergistic development of children's mathematical abilities and executive functions.

Keywords preschool children; executive function; mathematical ability; sub-component specificity; bidirectional model; developmental relationship

1. 问题提出

数学认知能力是学前儿童入学准备的重要标志，对其未来的学业成就与长远发展具有显著的预测作用（Ten Braak et al., 2022）^[1]。在个体发展早期，数学能力的获得不仅依赖于对数字和运算的特定理解，更受到一系列通用认知机制的深刻影响。其中，执行功能作为一种自上而下的心理调控过程，被广泛认为是学前儿童数学能力发展的关键认知基础（费广洪等，2019）^[2]。执行功能通常涵盖工作记忆、抑制控制和认知灵活性三个核心子成分，共同负责管理与协调复杂的、目标导向的认知活动。

尽管执行功能与数学能力之间存在密切关联已得到大量研究的支持，但近年来的研究焦点正从探讨“整体结构”的关系，转向深入剖析各“子成分”的特异性作用。研究发现，执行功能的不同子成分对数学能力的各个维度贡献各异。例如，费广洪等（2020）的研究表明，3岁儿童的数学水平主要受工作记忆与认知灵活性的影响，而抑制控制的作用直到4岁才显著显现^[3]。这种贡献模式的差异性在数感（冯轲，2021）和早期数运算（卢碧露，2022）等具体数学领域中也得到了验证^{[4][5]}。

此外，研究界日益关注二者关系的动态发展及其相互作用的方向性。传统的“执行功能单向预测数学能力”观点，正逐渐被“双向互惠模型”所补充。近期纵向研究表明，学前儿童的执行功能与早期数学能力之间存在相互预测的关系（Akhavain et al., 2023）^[6]，即高效的认知控制能力有助于数学逻辑的掌握，而数学学习活动本身也能反过来促进执行功能的成熟。与此同时，研究视角已扩展至与情绪、动机相关的“热”执行功能。例如，Mercader等（2018）的纵向研究证实，幼儿早期的动机水平能够通过执行功能的中介作用，间接影响其后续的数学表现^[7]。尽管如此，对于“冷”与“热”执行功能如何在数学学习的具体情境中实时交互，以及这种交互作用的发展轨迹，当前研究仍缺乏精细化的实证证据。

然而，该领域仍有若干问题有待深入探讨。首先，各执行功能子成分对数学细分领域（如空间几何、模式识别）的具体影响机制尚未完全明晰；其次，“热”执行功能与“冷”执行功能在数学学习过程中的相互作用机制仍需更多实证证据；最后，如何将理论研究成果转化为适用于学前儿童的、融合认知训练与数学教育的综合性干预方案，仍是当前教育实践面临的重要挑战。更深层次的挑战在于，多数研究基于相关或短期纵向设计，对因果方向的推断仍需谨慎；同时，执行功能任务与真实数学学习情境中的认知需求存在差异，导致实验室结论向教育实践迁移的效果存疑。

因此，本文旨在系统梳理学前儿童执行功能子成分与数学能力关系的研究进展，重点探讨其特异性贡献、双向互惠机制及发展性规律，并整合“热”执行功能的研究视角，同时批判性审视现有研究的局限与争议，以期为学前教育中的早期评估与综合性干预课程的开发提供理论依据。

2. 儿童执行功能与数学能力的关系综述

2.1. 儿童执行功能与数学能力关系的理论基础

探究儿童执行功能与数学能力的发展性关系，首先需要对核心概念的理论结构进行清晰界定。执行功能（Executive Function, EF）与数学能力并非单一维度的心理构念，二者均包含复杂的子成分结构。厘清这些子成分的定义及其内在机制，是理解二者在不同年龄阶段产生特异性关联的前提。

2.1.1. 执行功能的结构划分

在发展心理学研究中，执行功能通常被界定为一种高级的、通用的认知控制能力。Miyake 等人提出的三成分模型得到了广泛采纳。张亚杰和胡恩慧（2023）对 12495 名儿童的元分析研究证实，在儿童早期，虽然执行功能各成分尚未完全分化，但抑制控制、工作记忆和认知灵活性均与数学能力呈显著正相关，且相关强度存在差异（执行功能整体 > 认知灵活性 > 抑制控制 > 工作记忆）^[8]。然而，元分析所呈现的相关强度排序，可能受纳入研究的测量工具异质性影响。例如，针对幼儿的抑制控制测量往往混合了反应抑制与干扰抑制，而不同研究对“工作记忆”的测量（简单广度 vs. 复杂刷新）负载的认知需求也不同，这可能导致效应量的直接比较存在偏差。

抑制控制（Inhibitory Control）：指个体在认知加工过程中主动抑制无关信息或冲动反应的能力（尹柔莎, 2025）^[9]。在数学情境下，它帮助儿童排除干扰，专注于解题步骤。

工作记忆（Working Memory）：涉及对信息的暂时存储与更新（Updating），是支持儿童进行多步运算和逻辑推演的核心机制（Emslander & Scherer, 2022）^[10]。

认知灵活性（Cognitive Flexibility）：指个体在不同的任务规则、表征方式或心理定势之间进行灵活转换的能力（张亚杰, 胡恩慧, 2023）^[8]。

2.1.2. 数学能力的多维性

数学能力被视为一种“数学智力（Math Intelligence）”，是多种数学技能的集合体（Emslander & Scherer, 2022）^[10]。张亚杰和胡恩慧（2023）指出，数学能力的形成依赖于特定的认知基础^[8]。根据儿童认知发展的特点，数学能力表现出显著的多维性：

非符号与符号数量表征：非符号表征主要涉及对物体集合数量属性的直觉感应。而符号表征能力（如数字比较）被认为是连接执行功能与数学成就的关键桥梁。Zhang 等人（2025）的最新纵向研究发现，相比于非符号表征，符号数量表征在执行功能（特别是抑制控制）预测未来数学成就的过程中起到了更关键的中介作用^[11]。

算术运算与逻辑推理：这是数学能力的核心应用层面，主要包括计算（Calculation）和应用题解决（Applied Problems）（Fung et al., 2020）^[12]。费广洪等人（2020）强调，这要求儿童在掌握数概念（Counting）的基础上，运用逻辑操作完成运算任务^[3]。

空间几何与表征转换：空间几何能力是指儿童对几何形状、空间方位以及模式（Pattern）的感知与认知（费广洪等, 2020）^[3]。而表征转换（Representational Flexibility）能力主要是指儿童在不同的数学表征形式之间进行心理转换的过程。Clements 等人（2016）将其描述为“在多种数学表征之间灵活切换（Flexibility with representations）”，例如将具体的实物操作转化为抽象的数学模型^[13]。这种表征间的转换被视为高阶数学思维的核心。然而，当前多数研究重点关注数与运算领域，对空间几何、模式识别等维度与执行功能关系的研究相对薄弱，这限制了理解数学能力全貌与认知基础之间关联的视野。

2.1.3. 二者关系的理论联结

执行功能与数学能力在早期发展中通过多种路径相互关联。Clements 等（2016）提出，执行功能并非独立于数学，而是深入参与了数学领域特定知识的习得过程^[13]。作为一种通用的认知“脚手架”，执行功能为复杂的数学运

算、空间推理及表征转换提供了必要的心理资源。从子成分视角分析其对不同数学维度（如抑制控制对算术错误抑制的作用，或认知灵活性对解题策略转换的贡献）的具体影响，是揭示二者发展性关系的关键。值得反思的是，这种“脚手架”隐喻虽然形象，但可能过于静态。双向互惠模型提示，数学活动也在塑造和优化这套“脚手架”。未来的理论模型需要更动态地刻画二者如何协同进化，而非简单的支撑关系。

2.2. 执行功能与数学能力关系的发展性与双向性

执行功能与数学能力的关系并非静态的关联，而是随着儿童年龄的增长与认知经验的积累呈现出动态的发展性特征，并表现出显著的双向预测模式。然而，对“双向性”的诠释需超越统计上的相互预测。真正的理论挑战在于阐明：在发展的不同节点，是哪一种方向（EF→数学，还是数学→EF）占据主导，其背后的认知与神经机制是什么？

2.2.1. 关系的年龄效应：跨文化的视角

执行功能对数学能力的预测力在个体发育的早期表现出明显的年龄演变规律。祝孝亮和赵鑫（2023）的研究清晰地描绘了这种发展轨迹：在小学低段，基础的“工作记忆广度”是核心支撑；而到了小学高段，随着数学任务复杂度的增加，更高阶的“工作记忆刷新”和“认知灵活性”成为数学能力的主要预测源^[14]。费广洪等人（2020）针对3-4岁儿童的研究发现，执行功能对数学水平的影响存在转折：3岁时，认知灵活性和工作记忆是主要预测源，抑制控制作用尚不显著；而进入4岁后，抑制控制的预测作用显著增强^[3]。刘新颖（2022）基于中国样本的元分析进一步证实，执行功能对数学能力的预测效应量在学前阶段达到高峰，且随着年龄增长其联结愈发紧密且趋于领域特定化^[15]。随着儿童进入小学，虽然基础运算的自动化可能减少对执行功能的即时消耗，但在习得分数或复杂空间几何等新概念时，执行功能仍作为核心“认知支架”存在（Cragg & Gilmore, 2014）^[16]。

值得注意的是，这种发展轨迹可能存在文化差异。张亚杰和胡恩慧（2023）的元分析发现，样本来源显著调节了工作记忆与数学能力的关系，亚洲样本中的相关性强于欧美样本^[8]。这可能与东亚文化中强调的心算策略和视觉化数学教学有关，导致对视空间工作记忆的依赖程度不同。例如，中国儿童在学习乘法口诀时依赖言语工作记忆的语音编码，而美国儿童可能更多使用数轴策略，涉及不同的认知资源。Zhu 等人（2025）的追踪研究也印证了工作记忆在中国小学低段对数学成就具有跨时间的稳定性影响^[17]。

2.2.2. 因果关系的方向：双向互惠的实证依据

近年来，研究焦点已从“执行功能单向预测数学”转向探讨二者的双向互惠关系（*Bidirectional Relationship*）。Fung 等人（2020）通过对中国香港儿童的交叉滞后研究发现，早期的数学能力（如计算和应用题解决）能显著预测一年后的执行功能水平，反之亦然^[12]。具体而言，在 T1 时段数学表现优异的儿童，在 T2 时段的抑制控制任务（如昼夜 Stroop）中表现更好，说明数学活动中的规则训练强化了儿童的抑制能力。Clements 等人（2016）的证据表明，高质量的数学教学不仅能提升学科水平，其高强度的认知挑战本身就在塑造和提升儿童的执行功能^[13]。例如，“构建数”项目要求儿童在多种表征（实物、图片、符号）之间转换，这种练习直接锻炼了认知灵活性。这种互惠性在 Hamamci 等人（2025）的最新预测模型中得到了进一步阐述：数学活动的参与质量通过强化执行功能，进而在后续阶段反作用于更高阶的数学技能，二者在发展过程中形成了相互驱动的上升螺旋^[18]。双向互惠模型虽然极具吸引力，但其验证面临方法论挑战。交叉滞后设计仍难以完全排除未测量的第三方变量（如教学质量、家庭智力环境）的影响。未来的研究需要结合更严谨的实验设计（如随机对照的数学干预研究，并测量 EF 的前后变化）和更密集的纵向数据采集，来为这种互惠机制提供更直接的因果证据。

2.2.3. 调节与中介变量的作用

执行功能对数学能力的影响并非直接作用，而是受到多种环境与个体变量的调节或中介。Hamamci 等人（2025）指出，家庭和学校的数学活动质量在二者关系中起到了关键作用，丰富的家庭数学环境能通过增强执行功能来间接提升数学能力^[18]。同时，社会经济地位（SES）被发现是一个重要的调节变量（Zhu et al., 2025），对于低 SES 背景的儿童，执行功能对数学能力的补偿性保护作用尤为突出^[17]。此外，张亚杰和胡恩慧（2023）的研究还发现，样本来源（文化背景）显著调节了工作记忆与数学能力的关系，亚洲样本中的相关性强于欧美样本。在性别差异方面，虽然性别对执行功能整体与数学能力关系的调节作用不显著，但该研究发现性别能显著调节工作记忆与数学能力的关系^[8]。这些调节变量的发现，凸显了将 EF-数学关系置于生物-生态模型下审视的重要性。然而，多数研究仅报告了调节效应的存在，对其深层机制（如低 SES 环境下，是 EF 资源更匮乏，还是对 EF 资源的依赖更强？）探索不足。未来研究需要整合环境测量与认知机制分析。在认知机制层面，Khatin-Zadeh 等人（2025）提出，表征转换（*Representational Shifting*）在二者关系间起中介作用，即执行功能通过支持儿童在“情境表征”与“符号表征”之间的灵活切换，从而实现数学思维的跨越^[19]。这类中介模型的提出有助于细化机制，但其测量往往面临与执行功能子成分类似的“纯净性”挑战，且需要多时间点数据来验证中介过程的时序。

2.2.4. 冷热执行功能的消长

在个体发展过程中，“冷执行功能”（纯认知逻辑）与“热执行功能”（情感动机相关）对数学的贡献呈现出动态消长的特征。早期研究多关注冷执行功能（工作记忆、抑制控制等）的底层预测作用，但正如 Muñoz 等人（2025）指出的，随着数学任务难度的增加，“数学复原力”作为热执行功能的体现，在缓解数学焦虑、维持解题动机方面变得愈发重要^[20]。Mercader 等人（2018）的纵向研究发现，动机通过执行功能的中介作用影响后续数学成就，这表明在儿童成长过程中，热功能的调节作用为冷功能的认知输出提供了必要的“情感保障”^[7]。Scerif 和 Blakey（2023）总结道，干预研究应关注这种冷热功能的平衡，确保儿童在高认知负荷的数学学习中依然能保持稳定的情绪调节与目标导向^[21]。“消长”是一个形象的比喻，但可能过于简化。更可能的图景是“协同进化”与“情境依赖”：在低压力、高趣味的任务中，冷功能可能主导；在高压力、低动机的情境中，热功能的调节作用则至关重要。未来研究需要设计能系统性操纵任务情感属性和认知难度的实验，来检验这一动态交互模型。

2.3. 执行功能子成分对儿童数学能力的特异性贡献

实证研究表明，执行功能并非以整体的、笼统的方式影响数学能力，而是通过其不同子成分对数学学习的各个领域产生特异性的贡献，这些贡献背后涉及不同的神经认知过程。然而，在肯定其特异性贡献的同时，研究者需要谨慎看待这一结论。由于执行功能子成分在神经心理层面存在交互与重叠，测量任务往往并非“纯净”，研究观察到的影响可能反映了子成分的协同作用，而非独立贡献。

2.3.1. 工作记忆：数学信息存贮与在线加工的引擎

工作记忆被认为是预测儿童早期数学成就最强有力的因子之一（Ernst et al., 2022）^[22]。在进行算术运算时，儿童需要在工作记忆中暂时存储数字，并根据运算规则动态更新信息。尹柔莎（2025）指出，工作记忆刷新是解决复杂应用题的核心^[9]。Zhu 等人（2025）通过纵向研究进一步证实，工作记忆在小学低年级阶段对数学能力具有显著且稳定的预测作用，其重要性贯穿了从幼儿园到小学的过渡期^[17]。祝孝亮和赵鑫（2023）对小学三至六年级儿童的研究发现，在低年级阶段（三、四年级），工作记忆广度是数学运算和空间想象最重要的预测因素；但随着年级升高，其预测作用会有所下降^[14]。此外，工作记忆的贡献还表现出领域特异性。Zhang 等人（2025）的研究进一步区分了言语工作记忆和视空间工作记忆，发现言语工作记忆在控制了其他变量后，能直接显著预测儿童未来的数学成就（ $\beta = 0.31, p < .001$ ），这

可能与数学学习中对数字符号的语音编码依赖有关^[11]。fMRI 研究显示，在进行心算时，儿童的大脑激活模式主要表现为左半球言语区（布罗卡区）的激活，表明其依赖言语编码策略。然而，在不同语言或数学教学体系中，视空间工作记忆的作用不容忽视。例如，在一项针对新加坡儿童的数学天才研究中，高成就儿童在视空间工作记忆任务上的得分显著高于普通儿童，这与其数学课程中强调的“模型法”（bar modeling）密切相关。

2.3.2. 抑制控制：干扰排除与冲动抑制

抑制控制帮助儿童在解决数学问题时抑制直觉性的错误答案，专注于目标任务。郑昊婕（2023）的实验研究构建了一个双重中介模型，证实了小学儿童的抑制控制不仅直接影响数学能力，还通过工作记忆和认知灵活性的链式中介作用间接影响数学表现^[23]。这表明抑制控制可能是更为基础的认知资源。Zhu 等人（2025）将抑制控制细分为干扰抑制和反应抑制，发现干扰抑制（排除无关刺激）在儿童应对复杂的数学情境时尤为重要（ $\beta = 0.22, p < .01$ ）^[17]。费广洪等人（2020）也证实，抑制控制水平能显著预测 4 岁儿童的数学得分，帮助其在面对诱导性信息时，抑制基于视觉特征的直觉判断^[3]。神经电生理（ERP）研究表明，在完成数字 Stroop 任务时，高数学能力的儿童表现出更大的 N2 波幅（反映冲突监测）和更小的 N450 效应（反映冲突解决效率），说明他们能更有效地调用前额叶资源来抑制干扰。当然，这种抑制能力在数感建立中同样不可或缺，Ernst 等人（2022）的研究显示，执行功能复合得分（含抑制控制）与数学能力的相关性显著高于其与阅读能力的相关性，这说明抑制控制在处理数学特定冲突（如大小比较任务中的数量冲突）时具有领域特异性^[22]。然而，抑制控制的测量效度常受质疑。例如，经典的“白天/黑夜”任务可能同时测量了工作记忆（记住规则）和抑制控制。因此，将抑制控制视为“基础资源”的结论，需建立在更纯净的测量模式之上。

2.3.3. 认知灵活：策略转换与表征灵活性

认知灵活性（即转换能力）是个体在不同的解题策略或数学表征之间进行灵活切换的基础。尹柔莎（2025）的研究证实，认知灵活性在学前儿童数学发展中具有显著的独立预测作用^[9]。Scerif 和 Blakey（2023）提出，有效的数学干预应侧重于如何利用执行功能来支持数学概念的转变，这种“策略适应性”正是认知灵活性的体现^[21]。在涉及空间数学的任务中，Verdine 等人（2014）的研究强调了执行功能（尤其是涉及思维转换的部分）与空间组装（Spatial Assembly）能力的密切关系（ $r=0.45$ ）^[24]。儿童在进行几何拼搭或图形分解时，需要不断在部分与整体的表征间切换，这种“表征灵活性”是高阶数学思维的核心（Clements et al., 2016）^[13]。此外，张亚杰和胡恩慧（2023）

的元分析结果显示，在执行功能的三个子成分中，认知灵活性与儿童早期数学能力的相关系数最高（ $r = 0.413$ ），甚至高于工作记忆和抑制控制，这强调了在解决复杂数学问题时“灵活转换”的重要性^[8]。例如，在维度变换卡片分类任务中表现优异的儿童，在解决需要多种策略的数学问题（如“你能用几种方法算出 $8+5$ ？”）时，也能提出更多元的解题思路。fNIRS 研究发现，这类儿童在进行策略转换时，其前额叶背外侧与眶额叶的功能连接更强，表明神经整合效率更高。这一高相关引人深思：它是否部分源于测量上的混淆？许多用于幼儿的认知灵活性任务（如维度变换卡片分类）严重依赖工作记忆来记住新规则，并需要抑制控制来抑制旧规则。因此，认知灵活性对数学的“独立”预测力，可能实质上反映了执行功能系统的整体效能。

2.3.4. 热执行功能：情感调节与数学动机

除了上述“冷”执行功能（纯认知成分）外，涉及情感和奖励的“热”执行功能对儿童应对数学挑战同样至关重要。Muñoz 等人（2025）指出的“数学复原力”反映了热执行功能在压力情境下的调节作用，帮助儿童在面对难题时保持情绪稳定^[20]。Mercader 等人（2018）发现，早期动机通过执行功能的中介作用影响后续数学成就^[7]。这说明，当儿童具备较强的热执行功能时，他们能更好地管理对数学的焦虑，从而将更多认知资源投入到冷执行功能（如工作记忆）中去解决数学问题（Scerif & Blakey, 2023）^[21]。目前，对“热”执行功能的研究大多将其视为背景变量或中介变量，探讨其如何支持“冷”功能的发挥。一个更具整合性的挑战是：在真实的数学问题解决过程中，“冷”与“热”功能是如何实时交互的？例如，解题受挫引发的焦虑（热）如何即时损耗工作记忆资源（冷）？这方面的认知神经机制研究尚处于起步阶段。

3. 儿童执行功能与数学能力关系的教育启示

基于执行功能（EF）与数学能力之间紧密的成分特异性、动态发展性及双向互惠关系，教育者应超越传统的“单纯技能训练”，转向一种更具整合性和针对性的教学模式。在将研究发现转化为教育实践时，必须清醒地认识到实验室研究与课堂应用之间的“鸿沟”。以下启示试图在证据基础上，兼顾实践的可操作性。

3.1. 早期识别与精准筛查：引入具体评估工具

EF 的缺陷往往先于数学学习障碍（MLD）显现，因此应建立基于子成分的预警机制。田丽丽等人（2016）的研究指出，数困风险儿童在刷新、抑制和转换等核心子成分上存在普遍缺陷，而高数学成就儿童则在刷新和带有

时间限制的转换任务中表现卓越^[26]。这启示教育者应将 EF 评估纳入幼儿入学准备的常规筛查中。同时，由于 EF 各成分对数学技能的预测具有领域特异性，筛查应做到“精准化”。Purpura 等人（2017）发现，反应抑制和工作记忆与早期的数感（Numeracy skills）关系最为紧密。因此，针对表现出早期计数困难的儿童，教师应重点评估其抑制冲动反应和保持信息加工的能力^[27]。基于 Zhang 等人（2025）的发现，由于言语工作记忆直接预测数学成就，教育者在筛查时应特别关注儿童对数字指令的复述和记忆能力，这对早期识别数学困难风险至关重要^[11]。因此，针对不同子成分的特异性，教育者可引入标准化筛查工具：例如使用“头-脚-膝-肩任务（HTKS）”（McClelland et al., 2014）来综合评估幼儿的抑制控制与行为调节能力；采用“Corsi 木块敲击任务”（Corsi, 1972; Kessels et al., 2000）或“数字倒背测试”精准识别视空间和言语工作记忆的潜在缺陷^{[28][29][30]}。精准筛查儿童对数字指令的复述和记忆能力，有助于早期识别数学困难高风险儿童并及时介入。

3.2. 整合式干预策略：从“孤立训练”转向“学科融合”

传统的 EF 干预多采用脱离学科情境的实验室任务，但其迁移效果往往有限（Scerif & Blakey, 2023）^[21]。最新的干预研究提倡将 EF 训练嵌入数学学科教学之中。Ruffini 等人（2024）针对小学二年级儿童的研究证明，在数学领域内整合 EF 活动（如结合数字任务的数字-纸笔训练）能显著提升儿童的数学问题解决能力和行为自控力^[31]。这种“融合式”干预的优势在于它模拟了真实学习中的认知负荷。Wongupparaj 和 Kadosh（2022）强调，相比于通用 EF，领域特定（如涉及数字）的 EF 任务对数学能力的预测力更强^[32]。因此，教师应设计具有认知挑战性的数学活动，如在解决复杂运算时有意识地训练儿童切换解题策略（认知灵活），或在处理干扰信息时强化抑制控制，使 EF 在数学情境中得到自然磨炼。在课堂实践中，教师可设计具体的融合性活动。例如，“规则转换分类游戏”（Zelazo, 2006）：要求幼儿先按照积木的“颜色”进行分类，随后听到指令立即转换为按“形状”分类，此活动在教授几何属性的同时，高强度锻炼了认知灵活性与抑制控制^[33]。再如，“动态数轴棋盘”（Ramani & Siegler, 2008）：在涉及加减法的桌面游戏中，要求儿童在脑海中暂存掷骰子的数字，并逆向计算步数，使工作记忆在真实的数学问题情境中得到自然磨炼^[34]。这种兼具认知负荷与数学学科目标的活动，对数学能力的提升预测力更强。这一方向虽被广泛认同，但如何设计既符合数学教学目标、又能有效负载特定 EF 成分训练的“融合活动”，对课程设计师和教师提出了很高要求。此外，融合干预的效果可能因儿童初始的 EF 水平而异，需警惕对 EF 薄弱儿童造成认知过载。

3.3. 关注个体差异：基于分位回归的因材施教

教育干预的效果并非“一刀切”。Dong 等人(2020)利用分位回归(Quantile Regression)分析发现, EF 干预对不同数学基线水平儿童的影响存在差异, 且综合性干预(Integrated interventions)相较于单一训练更易产生迁移^[35]。这一发现强调了因材施教的重要性: 对于数学低成就儿童, EF 干预可能更多起到“补偿性”作用, 缓解其认知资源匮乏; 而对于高成就儿童, 则更多是“促进性”作用。此外, Ruffini 等人(2024)指出, 干预的获益程度还受到儿童初始工作记忆水平的调节^[31]。因此, 在实施教育方案时, 教师应根据儿童的认知特点提供梯次化的支持, 避免对高认知负荷儿童造成过度压迫, 确保干预方案的有效实施。教师应根据分位回归等研究的启示, 提供梯次化的支持: 为数学低成就儿童提供具有“补偿性”的支架, 而为高成就儿童设计更复杂的探究任务。尽管分位回归等方法提供了更精细的视角, 但在真实课堂中, 持续、动态地评估每个儿童的 EF 子成分水平并据此个性化调整教学, 对师资和资源是巨大考验。这可能意味着, 在推广层面, 更可行的策略是提供分层、可选择的挑战任务, 而非完全个性化的方案。

3.4. 培养数学复原力: 冷热执行功能的协同促进

在关注认知维度的同时, 不能忽视热执行功能在应对挑战时的调节作用。Muñoz 等人(2025)提出的“数学复原力(Mathematics Resilience)”为教育实践提供了新视角^[20]。研究表明, 面对数学难题时, EF(尤其是抑制和工作记忆)能够帮助儿童在逆境中保持动机和坚持性, 这在社会经济地位(SES)较低的弱势群体中尤为重要。教育启示在于, 数学教学应关注“冷、热”功能的协同发展。教师可以通过营造安全且具有挑战性的课堂氛围, 在训练儿童逻辑思维(冷功能)的同时, 通过情绪调节和动机诱导(热功能)来提升其数学复原力。正如 Mercader 等人(2018)所指出的, 动机通过 EF 的中介作用影响后续数学成就^[7]。因此, 通过增强儿童的执行控制感, 可以有效缓解数学焦虑, 使儿童在面对复杂数学任务时能够保持稳定的认知输出。具体实践层面, 在遇到数学难题时, 教师可以通过设定阶段性奖励、引导积极的情绪宣泄, 帮助儿童缓解数学焦虑, 使“冷、热”执行功能协同促进, 保障稳定的认知资源输出。将“热”功能培养融入数学课堂, 意味着教学评价需超越正确率与速度, 纳入对坚持性、策略调整和情绪管理的观察。这要求教师角色从知识传授者转变为学习过程与心智习惯的教练, 对教师的专业发展提出了新的方向。

参考文献

- [1] Ten Braak D, Lenes R, Purpura D J, et al. Why do early mathematics skills predict later mathematics and reading achievement? The role of executive function [J]. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2022, 214: 105306.
 - [2] 费广洪, 谷晴晴, 张梅香. 学前儿童执行功能与数学认知能力的关系研究 [J]. *幼儿教育 (教育科学)*, 2019 (10): 48-52.
 - [3] 费广洪, 谷晴晴, 李伊莎. 3~4 岁儿童执行功能对数学水平的影响 [J]. *幼儿教育 (教育科学)*, 2020 (12): 18-22.
 - [4] 冯轲. 4-6 岁儿童执行功能对数感的影响 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2021.
 - [5] 卢碧露. 3~6 岁幼儿执行功能与早期数运算能力的关系研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
 - [6] Akhavein K, Clark C A C, Nelson J M, et al. The longitudinal contributions of preschool executive functions and early math abilities to arithmetic skills in elementary school [J]. *Cognitive Development*, 2023, 68: 101388.
 - [7] Mercader J, Miranda A, Presentación M J, et al. Contributions of motivation, early numeracy skills, and executive functioning to mathematical performance: A longitudinal study [J]. *Frontiers in Psychology*, 2018, 8: 2375.
 - [8] 张亚杰, 胡恩慧. 儿童早期执行功能与数学能力的关系: 一项元分析 [J]. *陕西学前师范学院学报*, 2023, 39 (12): 69-81.
 - [9] 尹柔莎. 3-6 岁儿童执行功能子成分与数学能力的关系研究 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2025.
 - [10] Emslander V, Scherer R. The relation between executive functions and math intelligence in preschool children: A systematic review and meta-analysis [J]. *Psychological Bulletin*, 2022, 148(5-6): 337-369.
 - [11] Zhang J Y, Zhang Y, Qi Y, et al. How executive function contributed to young children's mathematical achievement: The differential role of non-symbolic and symbolic numerical representation [J]. *Cognitive Development*, 2025, 73: 101545.
 - [12] Fung W K, Chung K K H, Lam C B. Mathematics, executive functioning, and visual-spatial skills in Chinese kindergarten children: Examining the bidirectionality [J]. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2020, 199: 104923.
-

- [13]Clements D H, Sarama J, Germeroth C. Learning executive function and early mathematics: Directions of causal relations [J]. *Early Childhood Research Quarterly*, 2016, 36: 79-90.
- [14]祝孝亮, 赵鑫. 执行功能在不同年级儿童数学能力中的作用 [J]. *心理学报*, 2023,55(5):696-710.
- [15]刘新颖, 潘华媛. 执行功能与儿童数学能力的关系 —— 基于中国样本的元分析 [J]. *教育观察*, 2022, 11 (6): 22-25, 34.
- [16]Cragg L, Gilmore C. Skills underlying mathematics: The role of executive function in the development of mathematics proficiency [J]. *Trends in Neuroscience and Education*, 2014, 3(2): 63-68.
- [17]Zhu X L, Tang Y X, Pang Z Y, et al. Executive functions and mathematical ability in early elementary school children: The moderating role of family socioeconomic status [J]. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2025, 256: 106252.
- [18]Hamamcı B, Demircan H Ö, Moriguchi Y. The cognitive and environmental predictors of young children's math abilities: Executive function and proximal environment [J]. *European Journal of Psychology of Education*, 2025, 40: 100.
- [19]Khatin-Zadeh O, Banaruee H, Farsani D. The role of executive functions in symbolic and situational mathematical abilities [J]. *European Journal of Psychology of Education*, 2025, 40(1): 1-17.
- [20]Muñoz D, Bull R, Khng K H, et al. Mathematics resilience in preschool and executive functions [J]. *Learning and Instruction*, 2025, 100: 102197.
- [21]Scerif G, Blakey E, Gattas S, et al. Making the executive 'function' for the foundations of mathematics: The need for explicit theories of change for early interventions [J]. *Educational Psychology Review*, 2023, 35: 110.
- [22]Ernst J R, Grenell A, Carlson S M. Associations between executive function and early math and literacy skills in preschool children [J]. *International Journal of Educational Research Open*, 2022, 3: 100201.
- [23]郑昊婕. 执行功能的促进对儿童数学能力提升作用的实验研究 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2023.
- [24]Verdine B N, Irwin C M, Golinkoff R M, et al. Contributions of executive function and spatial skills to preschool mathematics achievement [J]. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2014, 126: 37-51.
- [25]Garcia N L, Dick A S, Pruden S M. Contributions of executive function to spatial thinking in young children [J]. *Infant and Child Development*, 2022, 31(4): e2317.
-

- [26]田丽丽, 周欣, 康丹, 等. 5~6 岁不同数学能力水平儿童的执行功能差异研究 [J]. 心理发展与教育, 2016, 32 (1): 8-16.
- [27]Purpura D J, Schmitt S A, Ganley C M. Foundations of mathematics and literacy: The role of executive functioning components [J]. *Journal of Experimental Child Psychology*, 2017, 153: 15-34.
- [28]McClelland, M. M., Cameron, C. E., Duncan, R., Bowles, R. P., Acock, A. C., Miao, A., & Pratt, M. E. (2014). Predictors of early growth in academic achievement: The head-toes-knees-shoulders task. *Frontiers in Psychology*, 5, 599.
- [29]Corsi, P. M. (1972). Human memory and the medial temporal region of the brain. *Dissertation Abstracts International*, 34(02), 891B.
- [30]Kessels, R. P., van Zandvoort, M. J., Postma, A., Kappelle, L. J., & de Haan, E. H. (2000). The Corsi block-tapping task: Standardization and normative data. *Applied Neuropsychology*, 7(4), 252-258.
- [31]Ruffini C, Chini C, Lombardi G, et al. Training executive functions within the mathematical domain: A pilot study with an integrated digital-paper procedure in primary second-grade [J]. *Mind, Brain, and Education*, 2024, 18(1): 85-102.
- [32]Wongupparaj P, Cohen Kadosh R. Relating mathematical abilities to numerical skills and executive functions in informal and formal schooling [J]. *BMC Psychology*, 2022, 10(27): 1-14.
- [33]Zelazo, P. D. (2006). The Dimensional Change Card Sort (DCCS): A method of assessing executive function in children. *Nature Protocols*, 1(1), 297-301.
- [34]Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2008). Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games. *Child Development*, 79(2), 375-394.
- [35]Dong Y X, Clements D H, Sarama J, et al. Mathematics and executive function competencies in the context of interventions: A quantile regression analysis [J]. *The Journal of Experimental Education*, 2020.
-

