

小学儿童执行功能与问题解决能力的关系^{*}

王 晶 陈英和 齐 琳

(北京师范大学发展心理研究所,北京 100875)

摘 要:本研究选取小学二、四、六年级儿童为被试,采用计算机操作的方式,考察小学生执行功能中抑制、工作记忆和认知灵活性与 4 类伦敦塔问题解决表现之间的关系。结果表明在问题解决的计划方面,抑制能力较高的被试体现出良好的适应性解决能力,而工作记忆高的被试更能有效的利用资源;根据问题解决路径的不同划分了三大伦敦塔问题解决表现类型,工作记忆和抑制在问题解决中均起到重要作用。

关键词:执行功能;抑制;工作记忆;问题解决;伦敦塔任务;小学生

1 问题提出

执行功能(executive function, EF)是一种有目的性的控制机制,它以灵活有效的方式协调不同的认知亚过程并调节人类复杂的认知活动^[1],大多数研究者认为广义上的执行功能由抑制、工作记忆和认知灵活性 3 个成分构成^[2,3]。由于执行功能与人类的许多高级心理功能有密切关系,因而已经成为心理学研究的一个前沿性课题。执行功能作为高级认知能力,主要体现在问题解决过程中,因此探讨学生在问题解决过程中的表现可以更好的分析其执行功能的作用。在各类一般问题解决任务中,我们更关注界定清楚的问题,即初始状态(initial state)、目标状态(goal state)以及由初始状态如何达到目标状态的一系列过程都很清楚的问题,如汉诺塔(Tower of Hanoi, ToH)和伦敦塔(Tower of London, ToL)问题。ToH 问题是问题解决研究中常用的经典实验,ToL 最早由 Shallice(1982)从 ToH 问题中发展出来,之后 Culbertson 和 Zillmer(1999)将其重新修订并标准化,成为应用较为广泛的一种任务。

以往研究中有关执行功能中各成分对 ToH 问题解决影响的结论并不一致。一些研究认为工作记忆在问题解决过程中起重要作用。如 Simon 等人^[4]以 70 个本科生为被试,探讨视空间工作记忆和言语工作记忆与条件推理、ToH 任务表现之间的关系,结

果表明解决 ToH 问题的时间与两种空间工作记忆广度呈高相关。Goel 等人^[5]采用计算机模拟的方法,也证实了工作记忆在 ToH 问题解决中的作用。研究对 20 名计算机模拟的工作记忆有缺陷的前额叶损伤病人和 20 名正常被试在 ToH 问题上的成绩相比较,结果发现,当工作记忆负荷增加时,模拟病人的解题的时间和移动所需的步数也随着增加,同时正确率也有所下降。而 Miyake 等人^[1]使用结构方程分析了三种执行功能,抑制、转换和更新与 ToH 问题中移动总步数的关系,模型拟合的结果表明抑制起主要作用。为了检验移动中的冲突在何种程度上影响了 ToH 问题解决, Miyake 等人还分析了达到目标问题所使用的最佳方案,进一步证明了抑制在其中的作用,并认为这是由于 ToH 问题中的目标和子目标移动需要抑制功能的参与。对认知灵活性和问题解决的关系的研究还不是很多,但也有研究证实了在此类问题的解决中需要有认知灵活性的参与。Bull 等人^[6]对 118 名正常学前儿童(平均年龄 4 岁 9 个月)测试了 ToH 和 ToL 问题上的表现,并用 shape school 任务(测量学前儿童的执行功能)测量转换和抑制能力,结果表明转换可以独立预测 ToH 任务上的表现。控制了短时记忆后,抑制和转换对 ToH 和 ToL 问题表现都有预测作用,转换任务与这两类问题的复杂性(从初始状态到目标状态中与直觉移动相反的移动步数)有显著相关。可见认知灵

^{*} 基金项目:全国教育科学规划国家重点项目(ABA050001)、国家自然科学基金项目(30770729)、北京市哲学社会科学规划项目(06BaJY010)。

通讯作者:陈英和,北京师范大学发展心理研究所教授,博士, E-mail:yinghechen@263.net

活性在塔问题解决中也起到一定的作用。这些研究虽然采用类似的塔任务,却得出不一致的结论,除了测量工具和研究被试的差异之外,另一个重要的原因可能是对所测量的问题本身的分析不够深入,由于选择了不同的问题类型,因而得出不同的结果。

许多研究采用 ToH 或 ToL 任务作为测量一般问题解决能力的工具,但以往研究更多使用 ToH 问题,很少涉及到 ToL 问题,并且以往研究中缺乏对问题结构因素的深入分析^[7]。我们通过分析发现在问题结构类型上 ToL 任务比 ToH 任务更为丰富。因此,本研究采用 ToL 问题,并试图对问题解决任务进行细致的划分,从有无子目标和有无次佳路径两个问题因素入手,深入探讨执行功能各成分在问题解决中的作用。根据这两个问题结构因素,可以产生 4 类问题:有子目标有次佳路径,有子目标无次佳路径,无子目标有次佳路径,无子目标无次佳路径,参见图 1。其中目标移动(goal move)是指将球放到目标位置上;子目标移动(subgoal move)指移动对最终达到目标很重要,但并没有将球放在目标位置上;最佳路径(optimal solution)指以最少的步数从起始状态达到目标状态;次佳路径(suboptimal alternative)指除了最佳路径外另一条解决问题的路径,移动的步数或者等于或者多出一到两步。

从衡量问题解决能力的指标上来看,以往研究中大多采用较为简单的记分方式(如移动步数和计划时间等)作为问题解决的表现,并对正确率进行整体的分析,但缺乏针对问题解决路径的更细致的分析。我们认为那些没有以最少步数完成 ToL 任务的人,其问题解决过程具有差异性。更深入地分析他们在解决问题过程中的不同表现,对探讨影响问题解决的因素有很大帮助。另一方面,我们认为问题解决的好坏不仅仅表现在解决的正确性上,还应该包括解决的效率。在对计划能力的考察上,考虑到不同个体在进行操作和思考时会存在差异,因此计划时间长并不代表能更有效的解决问题。只有当计划的时间长并且实际解决问题的时间更短的情况下,才能说明由于计划而体现出来的效应。所以本研究将计划与执行时间之比作为解决问题计划的指标。本研究拟深入探讨:(1)执行功能中抑制、工作记忆和认知灵活性同 4 类 ToL 任务计划表现之间的关系;(2)执行功能中抑制、工作记忆和认知灵活性同 4 类 ToL 任务表现类型的关系。

2 研究方法

2.1 被试

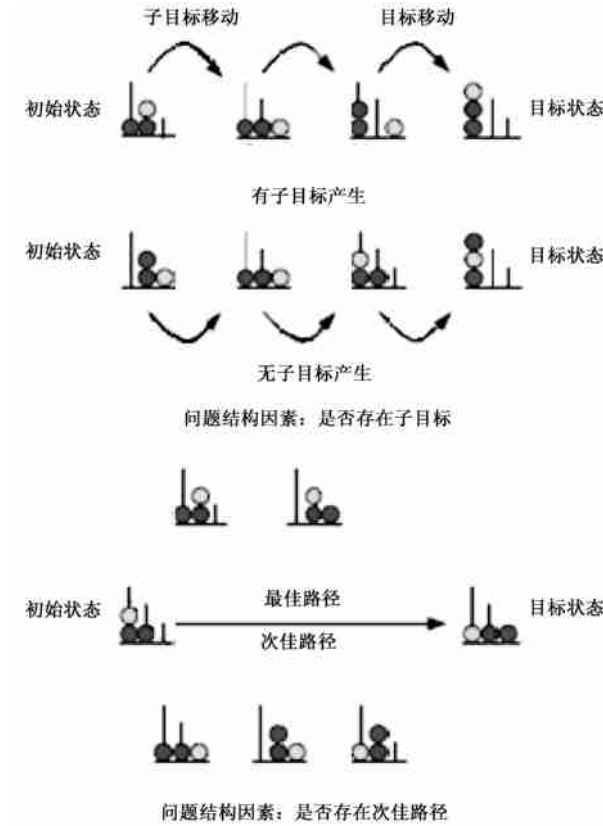


图 1 ToL 问题结构因素

本研究被试为某中等公立小学的二、四、六年级学生。采用分层随机取样,先从每个年级中各随机抽取 4 个班级,之后从每个班级中按学号随机抽取若干学生,共 125 人,最后有效被试为 121 人。其中 7 岁组($M=7.17, SD=0.35$)男生 16 人,女生 23 人; 9 岁组($M=9.27, SD=0.47$)男生 25 人,女生 21 人; 11 岁组($M=11.25, SD=0.46$)男生 20 人女生 16 人。所有被试都学习过计算机课程,能进行熟练操作。被试均为右利手,且无色盲或色弱。

2.2 测量和材料

2.2.1 智力测量

本研究采用瑞文推理测验来测量儿童的流体智力。并根据最后的得分按照测验的标准常模得出每个人的百分位数,再根据测验手册上的划分标准将被试分为 3 个智力水平。具体情况见表 1。

表 1 智力水平划分						
智力水平	瑞文成绩		百分位数		划分标准 (%)	人数
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>		
高	48.84	4.89	98.34	3.52	≥95	40
中	43.16	6.71	88.08	4.76	>75	52
低	37.24	5.94	51.53	20.96	>25	29

2.2.2 执行功能的测量

在本研究中,对执行功能的测量包括抑制、工作记忆容量和认知灵活性 3 项测量任务。

抑制:指人有意识地对优势的、自动的、具有支配性的反应的抑制。本研究中采用 Go/no-go 任务。参考 Brocki 和 Bohlin^[8]的实验范式,测量被试抑制先前使用过的反应的能力。任务要求被试快速区分 go 刺激和 no-go 的刺激,当呈现 go 刺激(中间有 X 的方形,中间有短垂直线的方形,中间有左对角线和右对角线的方形)的时候快速按键盘的空格键;而当 no-go 刺激(中间有长垂直线的方形)呈现的时候则不对其反应。每个刺激呈现时间持续 500 ms,刺激的间隔时间为 2500 ms、2650 ms 和 2800 ms 随机出现。总共呈现 100 组刺激,为了建立起优势反应倾向,其中 75% 的为 go 刺激,25% 为 no-go 刺激。正式实验前练习 10 组,让被试对任务熟悉。测量指标:虚报率(对 no-go 刺激的错误反应率),数值越小说明抑制能力越好。

工作记忆容量(working memory capacity):反映了个体对当前加工任务所需的信息进行管理或优化使用的能力。本研究中主要使用计算广度任务。参考 Grant 和 Dagenbach^[9]的研究任务进行改编。在白色屏幕中央呈现简单算术题(10 以内正整数的加减法)。要求被试判断算式是否正确,并按键反应,同时尽可能记住算术题中的第二个数(加数或减数)。被试按键判断后立刻呈现下一道算术题。从每道算术题呈现到被试按键反应的最长间隔时间为 4000 毫秒,超过此时间则呈现下一道。算术题呈现完毕,要求被试通过按相应数字键将算术题中的第二个数依次回忆出来。所有算术题均通过计算机随机产生,其中相邻两道题的第 2 个数不能等同,同时算术题中的第二个数不能和答案等同。每一分实验包括 2~7 道题目组,每个组呈现 3 次,总共完成 18 组题目。正式实验前进行 1 组 2 道算术题和 1 组 3 道题目的测验进行练习。测量指标:被试按照正确顺序回忆出数字的总和,分值范围 0~71。

认知灵活性:指根据情境的变化转换到不同的思维或活动的的能力。本研究中采用大小-形状转换任务。在测试时,屏幕中央呈现一系列大的图形和小图形,被试按要求对图形进行判断,测验中有三种判断要求。第一,大小判断,大图形按←,小图形按→。二,形状判断:圆形的按←,三角形按→。第三,大小-形状判断转换:如果屏幕下方出现提示词“大小”,判断图形的大小;如果屏幕下方出现提示词“形

状”,判断图形的形状。要求被试在保证准确的前提下,尽快按键判断。正式测验分 6 小段,采用 ABCBBA 的顺序。A 和 B 系列不需要转换,要求做第一或第二种判断,两种判断次序随机,各 24 次;C 系列需要转换,要求做第三种判断,共 48 次,其中包含 24 次转换过程和 24 次不需要转换的过程。第一次进行 A 或 B 系列前练习 8 次,C 系列前练习 16 次。测量指标:C 系列的转换条件与 A、B 系列的不转换条件下的平均反应时之差。

为了尽量减少被试进行操作时其他因素的干扰,本研究中对每项任务都设置了正确率和操作反应时间等指标。要求被试必须达到一定标准之后才认为其是认真操作的。

2.2.3 问题解决测量任务

参考 Welsh 等人^[10]和 Scheres 等人^[11]的研究对 ToL 任务进行改编,从初始状态到目标状态需要移动的最少步数为 3 步,使其更适用于小学生的能力水平。给被试呈现两组在 3 个高低不同的柱子上摆放的不同颜色(红、黄、蓝)的球,一个为初始状态,一个为目标状态。要求被试移动初始状态中的小球,使其和目标状态的摆放位置相同。每次只能移动一个小球;只有柱子最上面的球可以移动;最高的柱子可以放 3 个球,中间的柱子可以放 2 个球,最矮的柱子只能放 1 个球。用计算机呈现 ToL 任务测量一般问题解决。每种问题类型包括 2 个小测验,共 8 个小测验。被试被告知尽量使用最少的移动步数达到目标状态,这个数目也在屏幕上呈现。任务中设置“提交”按钮,当被试认为已经解决完问题时,点击这一按钮。如果被试没有完成任务就点击“提交”按钮,程序会提醒被试注意目标状态,并要求其继续完成。如果在问题解决过程中,被试感觉不能继续完成时,可以点击“再来一次”按钮重新做一次。这时记录的成绩为最后一次完成的成绩。每个小测验只给被试两次尝试机会。正式开始前进行练习,呈现 2 个两步难度的小测试。由于本研究要求全部被试都能够完成所有的 ToL 问题,因此只有在解决问题的移动步数为 3 步的情况下,才称为正确完成,否则为完成不良。

测量所记录的数据:(1)从问题出现到进行第一步移动所需要的时间(第一次尝试),作为计划时间。(2)从第一步移动到完成问题所用的时间,作为执行时间。(3)移动的步数(从初始状态达到目标状态)。(4)移动每一步的状态,以根据问题空间进一步分析问题解决路径。

根据以上记录的数据进一步整理出两个指标,作为本研究中代表被试 ToL 表现成绩的指标:一个指标是每一类题目上移动的步数;另一个指标是计划时间与执行时间之比。

2.3 实验程序

首先在小学二、四、六年级中各随机抽取 4 个班级进行瑞文推理测验。施测时保持教室安静。对瑞文测验成绩进行分析,排除作答异常的被试。并从这些班级中随机抽取部分被试参加计算机操作。以防止整班施测中班级差异造成的影响。

在正式实验之前先对少量被试进行预测,确定任务的难度是否适宜,以及整个任务完成的时间长短。确保施测过程中实验的计算机程序不出现问题。本实验的主试选取 10 名非心理学专业的大学生。进行正式实验前,给每名主试一份主试手册,并对其进行一次培训和一次预操作练习,以保证其能正确实施测验任务。

在学校机房施测实验任务,使用计算机呈现并记录反应时间和其他指标。计算机型号和配置相同,经过测试性能稳定,尽量将数据记录的系统误差降到最低。测量材料使用计算机呈现,任务测试次序随机。每个任务都有相应的指导语和练习部分,以确保被试熟悉如何操作和反应。实验任务的完成时间大约为 25 分钟。每个主试负责 2 名学生,指导并监控他们在电脑上按照随机抽取的题目顺序作答。计算机自动记录各项测量指标。主试在记录纸上填写每个学生的作答情况以及测试过程中是否发生意外情况。在实验中尽量保持环境的安静,减少噪音的干扰。被试间隔一定的距离,防止相互干扰。每次实验完毕后赠送被试一个小礼物表示谢意。

3 结果与分析

3.1 伦敦塔问题解决整体情况分析

3.1.1 伦敦塔任务反应时间的情况

首先分析各年龄组被试在 4 类 ToL 问题上计划时间和执行时间的基本情况,具体见表 2。

从表 2 中可以看出,随年龄的升高被试在各项任务上问题解决的时间都有所降低。在计划时间上,各年龄组无显著差异;在执行时间上,年龄差异显著 ($F_{(2, 118)} = 5.68, p < 0.05$), 11 岁组所用时间少于 7 岁组。

表 2 各年龄组被试在 4 类 ToL 问题上反应时间的平均数(标准差)

ToL 问题类型	年龄 (岁)	计划时间 (ms)	执行时间 (ms)
子目标一次佳路径	7	4554(2813)	9760(7842)
	9	4406(2366)	6907(6236)
	11	3848 (1484)	5861(3161)
无子目标一次佳路径	7	4988(2806)	9576(9227)
	9	4077(2062)	7387(6007)
	11	4600(3315)	7278(5250)
子目标一无次佳路径	7	7412(5253)	9113(5741)
	9	7557(4423)	8593(5072)
	11	6703(2490)	6708(3554)
无子目标一无次佳路径	7	4569(3638)	7537(4815)
	9	3273(1414)	6511(5828)
	11	3479(1715)	4352(936)

3.1.2 伦敦塔任务上移动步数情况

对不同年龄组被试在 8 个 ToL 问题上移动步数的人次进行卡方检验,结果表明年龄主效应不显著。表 3 所示为所有被试移动步数的人次表。

表 3 ToL 问题上移动步数的人次表

移动步数	ToL1	ToL2	ToL3	ToL4	ToL5	ToL6	ToL7	ToL8
3	107	104	103	101	103	102	114	117
4	7	8	6	6	10	8	3	2
5	2	6	7	6	3	5	3	0
6	1	1	1	1	4	5	0	0
7	0	2	2	4	1	0	0	0
8 步及以上	4	0	2	3	0	1	1	2

从表 3 中可以看出,在 8 个 ToL 问题上被试移动步数的情况。在统计上,各题目正确率没有显著差异。在正确率的绝对数值上,7、8 这两道题目(无子目标无次佳路径问题)较高,平均为 95.5%;3、4 题(无子目标有次佳路径问题),5、6 题(有子目标无次佳路径问题),这两类问题的正确率较低,分别为 85.1%和 84.7%;1、2 题(有子目标有次佳路径问题)正确率为 87.2%。

综合来看,儿童在 ToL 问题上的表现并不存在显著的年龄差异。

3.1.3 伦敦塔问题解决表现类型分析

根据被试在解决问题过程中每一步移动的状态,分析被试问题解决路径,发现存在不同的问题解决表现类型,具体划分为 8 种情况,如表 4 所示。

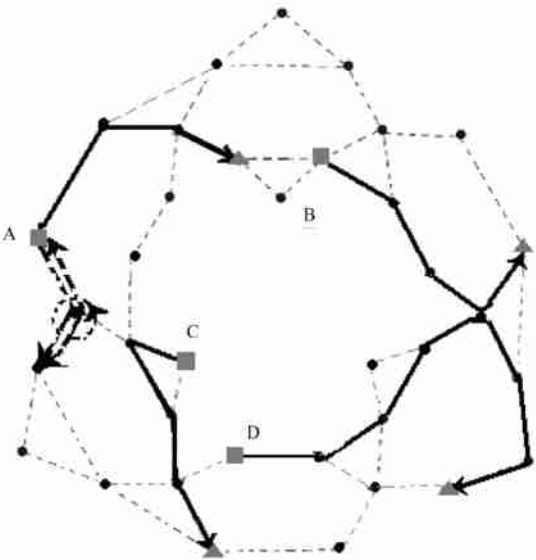
从 ToL 的问题状态空间中,可以清楚看到每种情况的表现,具体见图 2 所示。

在不同的问题类型上其各种问题解决表现类型出现的次数如表 5 所示。

表 4 ToL 问题解决表现分类

ToL 问题解决表现大类	表现类型	表现细类	解释
I 重复	0	正确完成	按正确路径解决问题
	1	重复同一步	拿起一个球但又放在原位置
	2	重复两步及以上	对已经走过的路径又倒回原来的位置
II 绕远	3	走次佳路径	存在次佳路径的问题中采用
	4	迂回路线(2步)	在无次佳路径的问题中本来一步就可以实现的采用 2 步完成
	5	较远路径超过 5 步	采用较远的路径,超过 5 步
III 其他	6	重新做	当被试觉得一次不能完成时,重新开始
	7	错误提交	没有到达目标状态就提交

注:表现类型 3 只出现在有次佳路径问题上;表现类型 4 只出现在无次佳路径问题上



注:方块代表起始状态,三角代表目标状态。A 路径中虚线圆圈代表重复同一步,为表现类型 1,虚线箭头部分代表重复走的路径,为表现类型 2;B 路径表示次佳路径,为表现类型 3;C 路径表示的为迂回路线,为表现类型 4;D 路径表示“绕远”路线,表现类型 5

图 2 ToL 问题解决路径及表现类型

表 5 4 类 TOL 题目上出现各种问题解决表现类型的次数

表现类型	TOL 问题类型			
	子目标一 次佳路径	无子目标一 次佳路径	子目标一 无次佳路径	无子目标一 无次佳路径
0	199	196	199	224
1	2	14	0	0
2	23	19	10	6
3	12	14	3	4
4	0	0	13	1
5	1	2	15	1
6	12	13	5	5
7	1	6	4	3

3.2 执行功能与伦敦塔问题解决计划表现的关系

3.2.1 整体情况分析

首先对所有被试进行分析,以抑制、工作记忆分数和整体转换为协变量,ToL 任务的问题结构因素

(有无子目标和有无次佳路径)为被试内变量,年龄、智力水平、性别和完成情况^① 为被试间变量,计划与执行时间比值的对数^② 为因变量,进行重复测量的方差分析。结果发现,完成情况 ($F_{(1,111)}=34.97, p<0.01$) 的主效应显著。正确完成的被试,计划指标上的成绩要好于完成不良的被试。工作记忆和子目标具有交互作用 ($F_{(1,111)}=3.98, p<0.05$)。其次,对正确完成的被试进一步分析。以抑制、工作记忆分数和整体转换为协变量,ToL 任务的问题结构因素(有无子目标和有无次佳路径)为被试内变量,年龄、智力水平、性别为被试间变量,计划与执行时间比值的对数为因变量,进行重复测量的方差分析。结果表明,被试间变量的主效应不显著,被试内变量上次佳路径有主效应 ($F_{(1,53)}=6.61, p<0.01$),子目标则没有。子目标和算术工作记忆存在交互作用 ($F_{(1,53)}=6.18, p<0.05$),次佳路径和抑制存在交互作用 ($F_{(1,53)}=6.22, p<0.05$)。代表认知灵活性的整体转换与其他变量并无显著关系。

综合以上结果,下面将从两个角度进一步分析。首先分析正确完成的被试中,具有不同抑制和工作记忆的人问题解决计划表现上的差异;其次针对完成不良的被试,分析各执行功能不同的人在问题解决表现类型上的差异。

3.2.2 执行功能分组与伦敦塔问题计划表现

抑制和工作记忆同 ToL 任务的问题结构因素均存在交互作用,并且对抑制和工作记忆进行的相关

① 完成情况分组中,正确完成组是指所有的伦敦塔问题都以 3 步完成,并且解决过程中没有出现错误提交和重做一次的情况;完成不良组是指在解决问题中,至少有一个伦敦塔问题移动步数超过 3 步,或者在解决过程中出现错误提交,或者在解决过程中出现重做一次的情况。

② 计划与执行时间比反映了被试在问题解决时是否事先在头脑中形成计划的情况。在进行统计分析时,对这一比值取自然对数,使得分布成为正态。

分析也表明两者不存在显著相关 ($r=0.12, p>0.05$), 为了进一步分析工作记忆和抑制同 ToL 解决关系, 将所有被试的算术工作记忆和抑制分数按前后 30% 的比例各划分为高、中、低 3 组。然后对其中全部正确完成的被试进行分析。由于在整体分析

中发现认知灵活性与问题解决的计划表现并无显著相关, 因此不对其进一步分析。表 6 为抑制和工作记忆的分组情况, 以及被试在 4 类问题上计划时间和计划与执行时间之比的成绩。

表 6 工作记忆和抑制分组情况及计划表现

分组	指标成绩	人数	计划时间 1 (ms)	计划时间 2 (ms)	计划时间 3 (ms)	计划时间 4 (ms)	计划执行 比 1	计划执行 比 2	计划执行 比 3	计划执行 比 4
工作记忆低组	M	47.94	4990	4604	6296	4377	0.78	0.82	1.07	0.86
	SD	16.29	4018	3171	2754	3221	0.52	0.49	0.50	0.50
工作记忆中组	M	71.53	3491	3722	5228	2815	0.83	0.85	1.02	0.72
	SD	3.78	1253	1999	2340	704	0.26	0.50	0.36	0.28
工作记忆高组	M	79	4685	4964	8054	2999	1.03	0.88	1.41	0.69
	SD	15.89	1679	3165	3498	979	0.40	0.35	0.50	0.23
抑制低组	M	77.39	5518	5096	6558	3475	1.08	0.94	1.24	0.74
	SD	7.39	3664	3078	3544	2920	0.46	0.46	0.63	0.27
抑制中组	M	54.47	3988	4748	6823	3502	0.77	0.86	1.13	0.74
	SD	5.92	1731	3272	3369	1641	0.34	0.47	0.48	0.47
抑制高组	M	31.05	3586	3335	6330	3018	0.81	0.74	1.17	0.77
	SD	8.94	1278	1448	2384	794	0.37	0.37	0.30	0.25

注: 1 为有子目标有次佳路径; 2 为无子目标有次佳路径; 3 为有子目标无次佳路径; 4 为无子目标无次佳路径。执行时间=计划时间/计划执行比; 总时间=计划时间+执行时间

以抑制分组和工作记忆分组为被试间变量, 以子目标和次佳路径为被试内变量进行重复测量的方差分析。结果表明, 被试间变量中, 抑制和工作记忆主效应不显著。被试内变量中, 次佳路径和子目标的交互作用显著 ($F_{(1,52)}=10.84, p<0.01$), 并且次佳路径和抑制 ($F_{(1,52)}=4.31, p<0.05$), 子目标和工作记忆 ($F_{(1,52)}=3.16, p<0.05$) 存在交互作用。

进一步分析各抑制组和工作记忆组在 4 类 ToL 问题上表现, 如图 3 和图 4 所示。

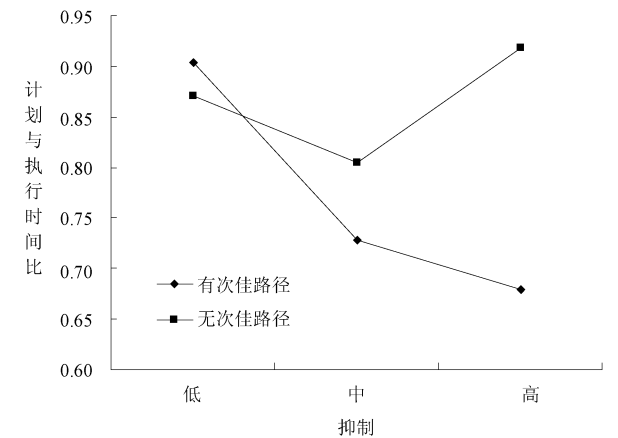


图 3 抑制和次佳路径交互作用图

从图 3 中可以看出, 抑制能力较高的人, 在有无次佳路径的情况下计划与执行时间比的差异较大 ($F_{(1,35)}=7.07, p<0.05$), 即无次佳路径的情况下计划时间相对执行时间较少, 但有次佳路径的情况下

计划的时间相对执行时间较多。而抑制能力不好的人两种情况没有差异。

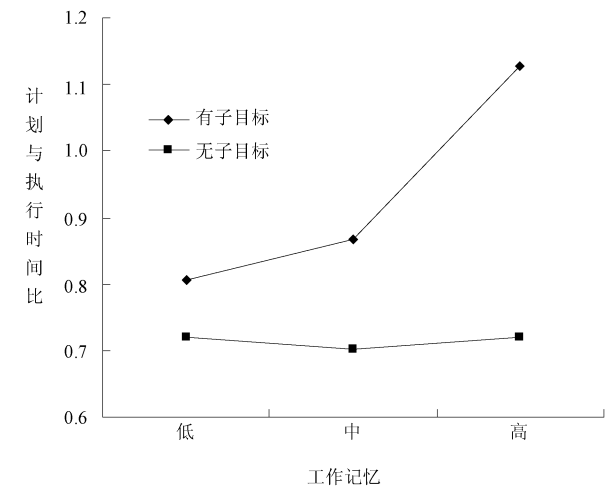


图 4 工作记忆和子目标交互作用图

从图 4 中可以看出, 工作记忆容量低的人不管有无子目标存在其计划与执行的时间比差异不大, 但工作记忆容量高的人的表现在有无子目标两种情况下存在显著差异 ($F_{(1,35)}=15.51, p<0.01$)。在有子目标存在的条件下, 其计划与执行的时间比增大, 他们有足够的记忆资源提前计划问题如何解决, 从而能够快速地执行计划。在无子目标的情况下, 工作记忆的大小并不影响问题解决的计划和执行时间比, 而有子目标存在的条件下, 工作记忆容量越高计划所占的比重也越大。

3.3 各执行功能与问题解决表现类型的关系

以上主要从问题解决计划的角度来考察执行功能的影响,下面则从问题解决路径的角度进行分析。由于要分析被试在4类ToL问题解决表现类型上的频次差异,故将所有被试分为人数相等的高分组和低分组(此分组与前面的分组在执行功能的平均分上没有差异)。分组的具体情况见表7。

表7 执行功能分组情况

分组	抑制		工作记忆		认知灵活性		人数
	M	SD	M	SD	M	SD	
高	31.87	9.91	79.03	1.52	121.66	51.45	36
中	57.92	7.04	70.86	3.97	233.2	28.99	49
低	79.71	8.05	44.97	18.97	308.47	24.38	36
总平均	56.65	20.29	65.59	17.46	222.41	80.63	121

3.3.1 抑制对问题解决表现类型的影响

对抑制高组和低组的问题解决表现类型进行分析,使用卡方检验比较在4类ToL问题上抑制高组和低组出现各种问题解决表现类型的频次差异。结果发现,在有子目标无次佳路径问题上,两组在3种表现类型上存在差异($\chi^2(2)=6.05, p<0.05$),抑制低组比抑制高组更容易出现“绕远”表现类型,但在“重复”表现类型上在差异不明显。

3.3.2 工作记忆对问题解决表现类型的影响

对工作记忆高组和低组的问题解决表现类型进行分析,使用卡方检验比较工作记忆高组和低组被试出现各种问题解决表现类型的频次差异。结果表明,在有子目标的问题上,两组在3种表现类型上存在差异($\chi^2(2)=8.12, p<0.05$),工作记忆低分组和高分组相比更容易出现“重复”表现类型。而在有子目标无次佳路径问题上出现“重复”和“绕远”的频次则没有显著差异。对无子目标有次佳路径以及有子目标无次佳路径两个问题上的频次进行合并,发现当子目标和次佳路径只有一个因素存在时,工作记忆高低两组在这3种表现类型上存在显著差异($\chi^2(2)=9.55, p<0.01$),工作记忆低组出现“绕远”类型的人相对较多,而在“重复”类型上不存在显著差异。

3.3.3 认知灵活性对问题解决表现类型的影响

对认知灵活性高组和低组的问题解决表现类型进行分析,使用卡方检验比较认知灵活性高组和低组被试出现各种问题解决表现类型的频次差异。结果表明,在有子目标问题上认知灵活性低组出现“重复”类型的频次比认知灵活性高组多,在子目标无次佳路径问题上表现“绕远”类型的频次也较高,但整体来说并不存在显著差异。

4 讨论

本研究探讨了执行功能中抑制、工作记忆和认知灵活性对不同结构ToL问题解决的影响。研究对ToL问题进行了细致的分析,划分出两类问题结构因素,即有无子目标和有次佳路径。在对问题解决表现的分析中,采用了不同于以往研究的指标变量,分别从问题解决的计划表现以及问题解决的表现类型两个方面进行分析。结果发现,抑制和工作记忆在执行功能中起到较为重要的作用。从问题解决的计划表现来看,在解决有子目标的问题时,工作记忆起到主要作用,而解决次佳路径问题时,抑制起到主要作用。并且抑制和工作记忆不同的人,在解决不同类型的问题时也存在差异。认知灵活性则与ToL问题解决没有显著关系。

4.1 抑制与问题解决的关系

研究发现,抑制能力会影响到在有次佳路径上计划的表现。无论是否存在次佳路径,抑制能力能力高分组和低分组在计划表现上并没有差异,计划时间所占的比重都较大。但是在有次佳路径的情况下,抑制能力高的人计划时间所占的比重反而缩短了,抑制能力低的人在两种情况下并没有什么差异,抑制能力中等的人虽然在数值上有降低的趋势,但并没有达到显著性的程度。

很多研究都发现抑制在问题解决中具有重要的作用。Asato等人^[12]发现抑制同ToL问题解决的移动步数具有0.37的相关,而Miyake等人^[1]使用结构方程证实了抑制对ToL解决表现的独特贡献。一般认为在解决类似的问题时,被试需要抑制本能的反应和直觉的策略,才能快速并以最少的移动步数达到目标状态。抑制能力可以促使人更好的计划,并选择最佳的反应方式同时阻止任务中其他因素的干扰。在ToL任务中,问题解决者需要考虑不同的反应方式,最明显的移动可能是不正确的,因此就要抑制这种移动。在存在次佳路径的问题上,从一种问题状态到另一种问题状态之间,可能只有一种解决方法,也可能存在另一种次佳的解决方法。这样,当问题存在两种解决方法时,可能就需要抑制某种直觉的反应,选择一条最佳的路径。而当只有一种路径的时候,就不需要抑制的作用。对于抑制能力比较差的人来说,他们要正确解决问题,就必须在头脑中将所有的步骤计划好,然后迅速执行。而那些抑制能力比较强的人面对有次佳路径的问题,他们能抑制住次佳路径的选择,并采取边计划边执行的策

略来解决问题。这使其在计划与执行的比例上低于其他组,总时间上也更少。

在计划指标上,抑制能力的高低会影响到被试在有数次佳路径问题上的表现。从问题解决表现类型的分析上可以看出来,抑制低组比抑制高组更容易出现“绕远”解决表现类型。“绕远”包括了三种,即走次佳路径、迂回路线和较远路线。当某一问题中存在多条到达目标状态的可能路径时,抑制不良的人往往难以克服惯性思维。比如需要将某一个球从第三根柱子上移动到第一根柱子上,抑制能力差的人会将球先移到第二根柱子上再移到第一根柱子上,也就是体现出“绕远”表现类型。

4.2 工作记忆与问题解决的关系

研究发现,工作记忆的高低和有无子目标是存在交互作用的。工作记忆容量低的人不管是否存在子目标其计划表现上的差异不大,而工作记忆容量高的人的计划表现在有无子目标两种情况下则存在显著差异。在有子目标存在的情况下,工作记忆较高的人其计划与执行的时间比较大,说明他们有足够的记忆资源进行初始计划,在头脑中构想出来问题的解决方案,从而能够快速执行计划,他们问题解决的总时间比那些工作记忆差的人更少。研究中还发现,在子目标的情况下,工作记忆容量高低组的被试在问题解决的计划和执行时间上并无显著性差异。这可能是因为,子目标的问题相对较为简单,不需要进行过长时间的初始计划,因而在这类任务上被试解决问题的计划时间所占比重相对较少。

工作记忆在 ToL 问题解决中的作用很多研究都已经证明了^[4,5]。在解决 ToL 问题时,工作记忆对子目标的问题影响尤为突出。这可能是因为,在问题解决过程中,相关的信息都要在工作记忆中存储加工,比如对子目标的识别、计划好的移动顺序、对移动方案的执行、对执行结果的监控等。尤其需要将存储的子目标与问题的当前状态进行比较,以便计划下一步的操作。因此,工作记忆的缺陷会影响到被试在 ToL 问题解决中的表现^[13]。但是工作记忆的这种影响作用会受到问题本身特点的影响。这也说明了,工作记忆高的人在解决问题的过程中具有的自动调节能力,能够根据问题的要求更恰当和有效的使用自身的资源。

工作记忆在问题解决中具有重要作用,对解决表现类型的分析中发现,工作记忆低分组和工作记忆高分组相比更容易出现“重复”解决表现类型。“重复”解决表现类型包括重复走一步和重复走两步及

以上的情况。当问题解决者没有提前在头脑中勾画好如何行走的策略时,往往会临时发现无法继续前行,并且距离目标状态越来越远,因此只能原路返回,表现出重复性解决路径。工作记忆较差的人,难以在头脑中保持大量信息并迅速加工,很难有效的计划,就容易走入歧途,所以会较多出现这种重复性。另外,研究中发现当子目标和次佳路径只存在一个因素时,工作记忆较低的人比工作记忆高的人更多出现“绕远”的解决表现类型。“绕远”反映出问题解决者并没有及时发现行走路线的错误,而是一直走到目标状态为止。而工作记忆较差的人很难有效的预测到下一步状态,而导致走较远的路径达到目标。

4.3 综合分析

以往的各类有关执行功能与问题解决的研究对抑制和工作记忆的作用说法不一,有研究者认为工作记忆起主要作用^[4,5],有的认为抑制具有独特的贡献^[1,10],也有研究者认为这两者共同解释了问题解决中的变异^[14]。我们认为以往研究结果不一致是因为对 ToL 任务的测量忽略了问题结构因素的影响。当面对不同类型的问题时,需要问题解决者整合自身的加工资源,并灵活地运用,有效的使用规则和策略。因此,虽然同样是正确完成任务,但那些工作记忆和抑制能力较好的人同较差的人相比,在计划时间以及计划所占的比例上会根据问题结构的不同而有所调整。

综合研究结果来看,抑制和工作记忆对 ToL 问题解决表现具有重要作用,而认知灵活性的作用并不是很大。这和以往一些研究结果相类似,如 Semm 等人^[14]采用路径分析研究了学前儿童在 ToH 问题上不同执行功能的作用,发现抑制和工作记忆对问题解决的表现具有直接作用,而认知灵活性则没有任何作用。但区别于以往研究结果,本研究发现执行功能中的抑制和工作记忆对 ToL 问题解决的作用具有特异性,根据问题类型的不同,其作用的方式也不同,并不是笼统而言的。

执行功能中的工作记忆和抑制对问题解决所起作用的程度是存在差异的。工作记忆在整个问题解决过程中具有基础性作用。工作记忆不好的人更容易出现“重复”表现类型,并且所有的 ToL 问题上出现“重复”类型的频次比出现其它表现类型的频次高,这也说明了人处理问题时必须有一定的加工资源为前提。但是,当问题中出现需要抑制某种反应的要求时(如次佳路径),抑制能力的好坏就会影响到问题解决的表现。认知灵活性虽然和工作记忆、

抑制都存在某种程度的相关,但与 ToL 问题解决的表现并没有显著的关系。也许是因为儿童的知识策略水平有限,只有当他们能够成功的解决那些需要大量计划和图式的复杂任务时,才会体现出认知灵活性的重要性^[6]。

5 结论

(1) 在问题解决的计划方面,抑制能力较高的人,无次佳路径的情况下计划的时间相对较短,但有次佳路径的情况下计划的时间相对较多;而抑制能力不好的人两种情况没有差异。在问题解决的表现类型上,抑制不好的人在有子目标无次佳路径的问题上易出现“绕远”解决类型。

(2) 在问题解决的计划方面,工作记忆容量高的人在有无子目标的情况下,其计划与执行的时间比差异不大;但工作记忆量较低的人在有子目标存在的情况下,其计划与执行的时间比增大。在问题解决的表现类型上,有子目标的问题中,工作记忆低分组更容易出现“重复”解决类型。

参考文献:

- [1] Miyake A, Friedman N P, Emerson M J, et al. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 2000, 41, 49—100.
- [2] Lehto J E, Juujarvi P, Kooistra L, et al. Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 2003, 21(1), 59—80.
- [3] 李美华,白学军. 执行功能中认知灵活性发展的研究. *心理学探新*, 2005, 25(2), 35—38.

[4] Simon J H, Capon A, Copp C, et al. Conditional reasoning and the Tower of Hanoi: The role of spatial and verbal working memory. *British Journal of psychology*, 2002, 93(4), 501—518.

[5] Goel V, Pullara S D, Grafman J. A computational model of frontal lobe dysfunction: working memory and the Tower of Hanoi task. *Cognitive Science*, 2001, 25, 287—313.

[6] Bull R, Espy K A, Senn T E. A comparison of performance on the towers of London and Hanoi in young children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 2004, 45(4), 743—754.

[7] Kaller C P, Unterrainer J M, Rahm B, et al. The impact of problem structure on planning: insights from the Tower of London task. *Cognitive Brain Research*, 2004, 20, 462—472.

[8] Brocki K C, Bohlin G. Executive functions in children aged 6 to 13: A dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology*, 2004, 26(2), 571—593.

[9] Grant J D, Dagenbach D. Further considerations regarding inhibitory processes, working memory, and cognitive aging. *The American Journal of Psychology*, 2000, 113(1), 69—94.

[10] Welsh M C, Satterlee-Cartmell T, Stine M. Towers of Hanoi and London: Contribution of working memory and inhibition to performance. *Brain and Cognition*, 1999, 41, 231—242.

[11] Scheres A, Oosterlaan J, Geurts H, et al. Executive functioning in boys with ADHD: primarily an inhibition deficit? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 2004, 19(4), 569—594.

[12] Asato M R, Sweeney J A, Luna B. Cognitive processes in the development of ToL performance. *Neuropsychologia*, 2006, 44, 2259—2269.

[13] Morris R G, Miotto E C, Feigenbaum J D, et al. The effect of goal-subgoal conflict on planning ability after frontal- and temporal-lobe lesions in humans. *Neuropsychologia*, 1997, 35(8), 1147—1157.

[14] Senn T E, Espy K A, Kaufmann P M. Using path analysis to understand executive function organization in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 2004, 26(1), 445—464.

The Relationship between Executive Function and Problem Solving among Primary School Children

WANG Jing CHEN Ying-he Qi Lin

(Beijing Normal University, Institute of Developmental Psychology, Beijing 100875)

Abstract: The purposes of the present study were to analyze the relationship between executive functions and problem solving of Tower of London (ToL), and to compare the effect of inhibition, working memory and cognitive flexibility on the performance of planning and different solutions in four kinds of ToL problems. 121 7~11 years old were tested executive functions and ToL tasks by computers. The results revealed that subjects with high inhibition represented better adaptability in problem solving, and subjects with high working memory could use resources more efficiency; The ToL problem solving types could be distinguished into three according to different problem solving solutions. The results suggested that both inhibition and working memory played important roles in the process of ToL problem solving, while cognitive flexibility had no significant effect on it.

Key words: Executive function; inhibition; working memory; problem solving; Tower of London task; primary school children