

脑机接口结合功能性电刺激技术对脑卒中患者 上肢运动功能影响的Meta分析

陈松美¹,高佳佳¹,张孝林¹,李昭缘¹,单春雷^{2,3*}

1 上海市第三康复医院,上海 200436;

2 上海交通大学医学院康复研究院,上海 200025;

3 上海交通大学医学院附属同仁医院,上海 200336

* 通信作者:单春雷,E-mail:shancl@shsmu.edu.cn

收稿日期:2025-03-15;接受日期:2025-06-04

基金项目:上海市静安区学科建设项目(2024ZB03);上海市静安区卫生科研课题面上项目(2024MS15);上海市静安区优青计划项目(2024YQ06);上海市康复医学会“健康管理”优青人才资助项目(2024JGYQ10);上海市卫生健康系统重点学科项目(2024ZDXK0032)

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.06006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



摘要 目的 运用Meta分析方法系评价脑机接口(BCI)结合功能性电刺激(FES)技术对脑卒中患者上肢运动功能的影响。**方法** 计算机检索中国知网(CNKI)、万方数据库(Wanfang Data)、维普中文科技期刊数据库(VIP)、PubMed、EMbase、Web of Science、The Cochrane Library 和 ClinicalTrials.gov 数据库有关BCI结合FES技术(BCI-FES)改善脑卒中患者上肢运动功能的临床随机对照试验(RCTs)。检索时限为建库至2025年2月。主要结局指标包括Fugl-Meyer上肢运动功能(FMA-UE)评分、FMA-UE评分差值、改良Barthel指数(MBI)评分。由2名研究人员独立完成筛选文献、提取资料并评价纳入研究的偏倚风险后,使用RevMan 5.4软件进行Meta分析。对纳入RCTs结果间的异质性,以 χ^2 检验进行分析,同时结合 I^2 定量判断异质性的大小后进行分析。当异质性较小($I^2 \leq 50\%$, $P \geq 0.1$)时,采用固定效应模型进行分析;当异质性较大($I^2 > 50\%$, $P < 0.1$)时,采用随机效应模型进行分析。**结果** 纳入11篇RCTs,共561例受试者。Meta分析结果显示,试验组治疗后FMA-UE评分明显高于对照组[$MD=4.04$, 95% $CI(2.59, 5.48)$, $Z=5.46$, $P < 0.000 01$];FMA-UE差值明显高于对照组[$MD=2.77$, 95% $CI(1.27, 4.28)$, $Z=3.61$, $P=0.000 3$];MBI评分明显高于对照组[$MD=7.41$, 95% $CI(2.47, 12.36)$, $Z=2.94$, $P=0.003$]。亚组分析结果显示,针对疾病分期、首次发生脑卒中的亚组以及BCI-FES+其他措施亚组,试验组治疗后FMA-UE评分均高于对照组,差异均具有统计学意义($P < 0.05$);针对疾病分期、首次发生脑卒中、BCI-FES+其他措施亚组,试验组治疗后FMA-UE评分差值均高于对照组,差异均具有统计学意义($P < 0.05$);针对BCI-FES+其他措施亚组,试验组治疗后MBI评分均高于对照组,差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。**结论** BCI-FES技术可有效改善脑卒中患者上肢运动功能和日常生活活动能力。首次发生脑卒中、脑卒中恢复早期进行BCI-FES治疗或联合其他康复措施的效果更好。

关键词 脑卒中;脑机接口;功能性电刺激;上肢运动功能;Meta分析

脑卒中是一种常见的神经系统疾病,60%~80%幸存者会遗留有上肢运动功能障碍^[1],严重影响

响患者日常生活,给家庭和社会造成沉重的负担。上肢运动功能的恢复是脑卒中康复工作的重点和

引用格式:陈松美,高佳佳,张孝林,等.脑机接口结合功能性电刺激技术对脑卒中患者上肢运动功能影响的Meta分析[J].康复学报,2025,35(6):582-591.

CHEN S M, GAO J J, ZHANG X L, et al. Effects of brain-computer interface combined with functional electrical stimulation on upper limb motor function of stroke patients: a meta-analysis [J]. Rehabil Med, 2025, 35(6):582-591.

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.06006

©《康复学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

难点。传统的重复主/被动活动、针灸推拿、物理治疗等,对维持患者的关节活动度有一定的作用,但因为缺少患者的主动参与,疗程较长,临床疗效有限^[2]。具有较高循证依据的任务导向性训练^[3]、强制性运动疗法^[4]等无法应用于严重上肢运动功能障碍的患者,因此需要不断探索新技术、新疗法。

脑机接口(brain-computer interface, BCI)和功能性电刺激(functional electric stimulation, FES)技术受到了广泛关注。BCI技术通过解码中枢神经系统信号直接捕捉患者的运动意图^[5],而FES则通过电刺激外周肢体神经肌肉促进运动功能的恢复。将BCI与FES技术相结合(BCI-FES)可以实现优势互补,达到事半功倍的疗效。BCI能够实时捕捉患者大脑的运动意图并将其转化为控制信号,驱动FES设备对患者进行精准的电刺激,帮助其实现预期的运动功能改善^[6]。这种中枢与外周联合的治疗策略,可以实现大脑皮质-肌肉的同步性激活效应,使得“中枢-外周-中枢”形成一个闭环通路,促进大脑神经的重塑和修复^[7],为脑卒中上肢运动功能康复提供了新的治疗思路和方法。

当前有关BCI-FES治疗方法在脑卒中上肢康复中的应用,其治疗参数(治疗时间、频率)存在差异,相关证据等级不高,系统评价少,这给临床决策造成了一定的困扰。本研究采用Meta分析总结BCI-FES干预脑卒中患者上肢运动功能障碍的随机对照试验(randomized controlled trials, RCTs),旨在为脑卒中患者上肢运动功能康复提供科学可靠、高级别的循证依据。

1 资料与方法

1.1 纳入与排除标准

1.1.1 纳入标准 ① 研究类型:纳入文献均为RCTs,语种限定为中文或英文。② 研究对象:经临床与影像学检查确诊为脑卒中,伴上肢运动功能障碍^[8]。患者年龄、种族及地域均不受限制。③ 干预措施:试验组以BCI-FES为主要干预措施,对照组以FES、常规康复为主要干预措施。④ 结局指标:包括Fugl-Meyer上肢运动功能(Fugl-Meyer Assessment of the Upper Extremity, FMA-UE)评分、FMA-UE评分差值、改良Barthel指数(Modified Barthel Index, MBI)。

1.1.2 排除标准 ① 摘要、综述、学术会议、病例报告等文献;② 无法提取全文或无法提取相关结局指标。

1.2 文献检索策略

通过计算机检索中国知网(CNKI)、万方数据库(Wanfang Data)、维普中文科技期刊数据库(VIP)、PubMed、EMbase、Web of Science、The Cochrane Library和ClinicalTrials.gov数据库,收集关于BCI结合FES治疗脑卒中患者上肢运动功能障碍的RCTs。检索时限为建库至2025年2月,检索策略结合了主题词与自由词,并追溯了RCTs所纳入的参考文献,以获取更多的相关资料。英文检索词包括:brain computer interfaces/brain machine interfaces、functional electrical stimulation、stroke/cerebrovascular accident/ischemic stroke/hemorrhagic stroke;中文检索词包括:脑机接口、功能性电刺激、脑控电刺激、脑卒中/卒中、中风、脑出血、脑梗死、脑血管意外。

1.3 文献筛选与数据提取

本Meta分析采用《系统评价和Meta分析优先报告条目》(Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, PRISMA)进行文献检索、筛选、数据提取和质量评估,以确保研究的系统性和可靠性。文献筛选与数据提取由2名研究人员独立完成,包括文献查阅与筛选、资料提取。意见若有出入,研究团队展开讨论直至统一标准。具体筛选过程为:先浏览文献标题,剔除明显不符的,再对剩余文献的摘要和全文进行审阅,判断是否纳入。针对符合纳入标准的研究,获取其全文。数据提取包括:① 纳入RCTs的基本信息,如文献标题、第一作者、发表年份、国家、分组情况、年龄等;② 试验纳入的研究对象一般特征;③ 干预措施;④ 关注的终点结局指标和结果数据。

1.4 偏倚风险评估

偏倚风险评估由2名研究人员独立完成,结果汇总后,若出现分歧,则引入第三方进行讨论解决。评估依据为国际通用的Cochrane手册6.3.0推荐的工具^[9]。采用RevMan 5.4软件绘制文献质量评价条形图及偏倚风险条目汇总图。

1.5 统计学方法

使用RevMan 5.4软件进行Meta分析。本研究结局指标(FMA-UE评分、FMA-UE评分差值和MBI评分)均为连续变量,以($\bar{x} \pm s$)表示。各指标均采用相同的评估量表,故效应值指标选择均值差(mean difference, MD),并计算95%置信区间(confidence interval, CI)。对纳入RCTs结果间的异质性,以 χ^2 检验进行分析,同时结合 I^2 定量判断异质性的的大小后进行Meta分析。当 $I^2 \leq 50\%$ 且 $P \geq 0.1$ 时,表明各研

究结果间不存在明显异质性,采用固定效应模型;若 $I^2 > 50\%$ 且 $P < 0.1$ 时,则表明各研究结果间存在明显异质性,采用随机效应模型。若存在明显的临床异质性,采用亚组分析或敏感性分析等方法来探讨异质性来源,必要时进行描述性分析。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 文献筛选流程

本研究初筛通过数据库检索获得635篇相关文献,并通过其他途径补充检索5篇。经逐层筛选后最终纳入11项RCTs,共561例受试者。文献筛选流程见图1。

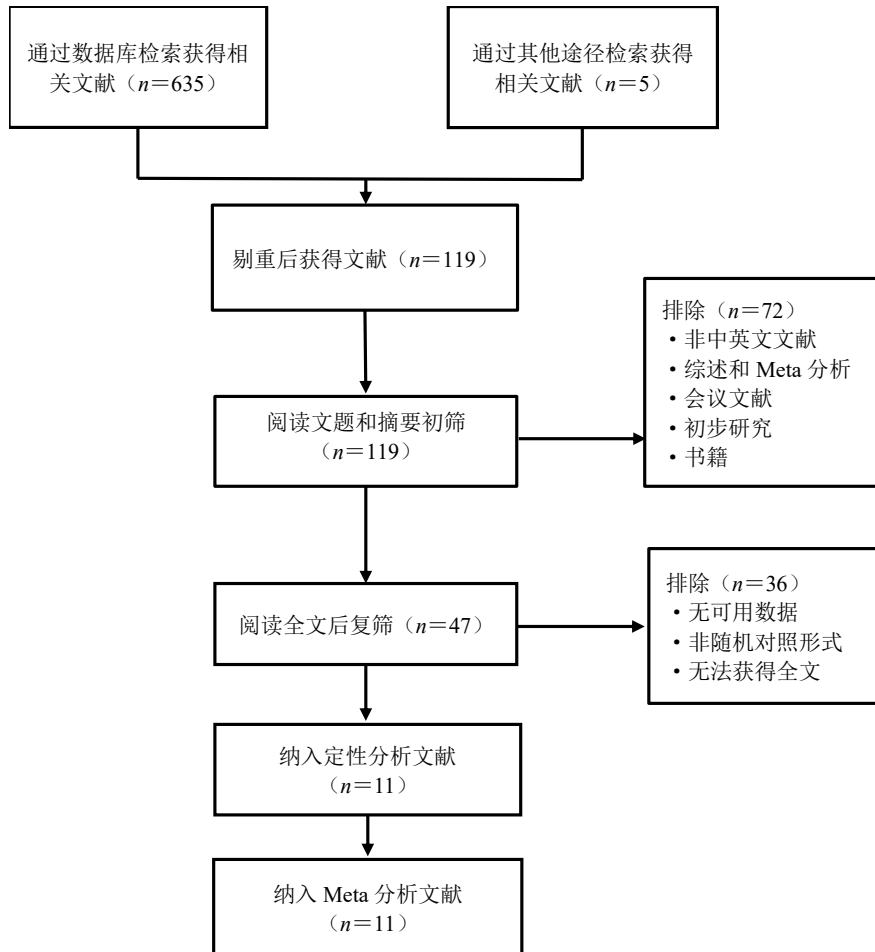


图1 文献筛选流程图

Figure 1 Flow chart of literature screening

2.2 纳入文献的基本特征

本研究纳入11项RCTs进行Meta分析^[10-20],共561例患者,其中试验组282例,对照组279例。其中,有2项研究^[11-12]基于动作观察(action observation therapy, AOT)的BCI-FES,有2项研究^[14,16]基于运动想象(motor imagery, MI)的BCI-FES,有1项研究^[16]联合虚拟现实(virtual reality, VR)的BCI-FES。纳入文献的基本特征见表1。

2.3 文献偏倚风险评估结果

本研究纳入的11项研究全部提到了随机序列产生;4项研究^[11-13,16]提到了分配隐藏;4项研究

提到了参与者盲法。文献偏倚风险评估结果见表2和图2。

2.4 Meta分析结果

2.4.1 FMA-UE评分 共9项RCTs^[10-14,17-20]报道了FMA-UE评分,其中试验组包含123例,对照组121例。各研究异质性较小($I^2 = 0\%$, $P = 0.56$),采用固定效应模型进行分析。Meta分析结果显示,试验组治疗后FMA-UE评分明显高于对照组,差异具有统计学意义 $[MD = 4.04, 95\% CI (2.59, 5.48), Z = 5.46, P < 0.000 01]$ 。见图3。

表1 纳入文献基本特征

Table 1 Basic characteristics of the included RCTs

纳入文献	国家	例数		年龄/岁		首次发病	疾病分期
		试验组	对照组	试验组	对照组		
BIASIUCCI等2018 ^[10]	瑞士	14	13	41.00~76.00	36.00~76.00	是	慢性期
KIM等2016 ^[11]	韩国	15	15	59.07±8.07	59.93±9.79	是	慢性期
LEE等2022 ^[12]	韩国	13	13	55.15±11.57	58.30±9.19	否	慢性期
LI等2014 ^[13]	中国	8	7	60.00~74.00	60.00~76.00	否	亚急性期
MIAO等2020 ^[14]	中国	8	8	22.00~70.00	25.00~72.00	否	慢性期
REMSIK等2018 ^[15]	美国	9	12	61.60±15.00	61.60±15.00	否	慢性期
WANG等2024 ^[16]	中国	150	146	60.00(中位年龄)	58.00(中位年龄)	否	亚急性期
ZHAN等2022 ^[17]	中国	12	12	60.00~90.00	60.00~90.00	否	慢性期
唐千千等2021 ^[18]	中国	17	17	49.93±8.82	51.27±8.56	是	亚急性期
徐英等2018 ^[19]	中国	16	16	72.43±8.56	76.81±9.57	是	慢性期
汪丽丽等2022 ^[20]	中国	20	20	69.05±5.79	67.25±4.78	是	亚急性期

纳入文献	治疗措施和频率		单次治疗时长/min	疗程/周	结局指标
	试验组	对照组			
BIASIUCCI等2018 ^[10]	BCI-FES+常规康复治疗,2次/周	假刺激+常规康复治疗,2次/周	60	5	①②
KIM等2016 ^[11]	AOT-BCI-FES+常规康复治疗,5次/周	假刺激+常规康复治疗,5次/周	30	4	①②③
LEE等2022 ^[12]	AOT-BCI-FES+常规康复治疗,5次/周	假刺激+常规康复治疗,5次/周	30	4	①②③
LI等2014 ^[13]	BCI-FES+常规康复治疗,3次/周	FES+常规康复治疗,3次/周	60~90	8	①②
MIAO等2020 ^[14]	BCI-MI-FES+常规康复治疗,3次/周	常规康复治疗,3次/周	16	4	①②
REMSIK等2018 ^[15]	EEG-BCI-FES+常规康复治疗,2~3次/周	常规康复治疗,2~3次/周	120	4~7	②
WANG等2024 ^[16]	BCI-MI-FES+VR+常规康复治疗,5次/周	常规康复治疗,5次/周	30	4	②
ZHAN等2022 ^[17]	BCI-FES+常规康复治疗,3次/周	FES+常规康复治疗,3次/周	40	4	①②③
唐千千等2021 ^[18]	BCI-FES+常规康复治疗,5次/周	FES+常规康复治疗,5次/周	30	4	①③
徐英等2018 ^[19]	BCI-FES+常规康复治疗,3次/周	FES+常规康复训练,3次/周	30	8	①③
汪丽丽等2022 ^[20]	BCI-FES+常规康复治疗,5次/周	常规康复治疗,5次/周	20	4	①③

注:① FMA-UE评分;② FMA-UE评分差值;③ MBI评分。

Note: ① FMA-UE score; ② FMA-UE score difference; ③ MBI score.

表2 纳入研究偏倚风险评价

Table 2 Bias risk assessment of included studies

纳入研究	随机方法	分配隐藏	盲法	结果数据的完整性	选择性报告结果	其他偏倚来源	评级
BIASIUCCI等2018 ^[10]	简单随机	不清楚	双盲	完整	无	无	B
KIM等2016 ^[11]	计算机随机	密封信封法	单盲	完整	无	无	A
LEE等2022 ^[12]	计算机随机	密封信封法	单盲	完整	无	无	A
LI等2014 ^[13]	随机数字表	密封信封法	不清楚	完整	无	无	B
MIAO等2020 ^[14]	简单随机	不清楚	不清楚	完整	无	无	B
REMSIK等2018 ^[15]	简单随机	不清楚	不清楚	完整	无	不清楚	B
WANG等2024 ^[16]	计算机随机	中央随机分配系统	单盲	完整	无	无	A
ZHAN等2022 ^[17]	简单随机	不清楚	不清楚	完整	无	无	B
唐千千等2021 ^[18]	随机数字表	不清楚	不清楚	完整	无	无	B
徐英等2018 ^[19]	随机数字表	不清楚	不清楚	完整	无	无	B
汪丽丽等2022 ^[20]	随机数字表	不清楚	不清楚	完整	无	无	B

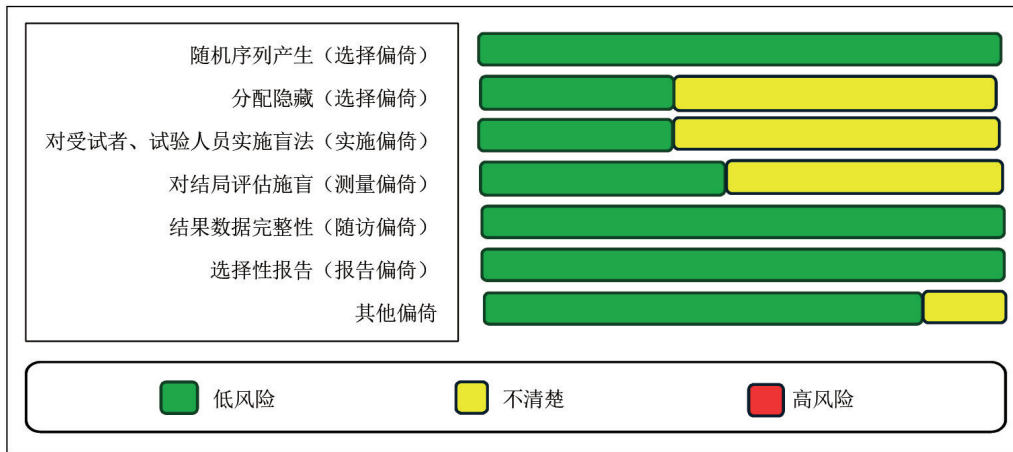


图2 文献偏倚风险评估图

Figure 2 Bias risk assessment of included studies

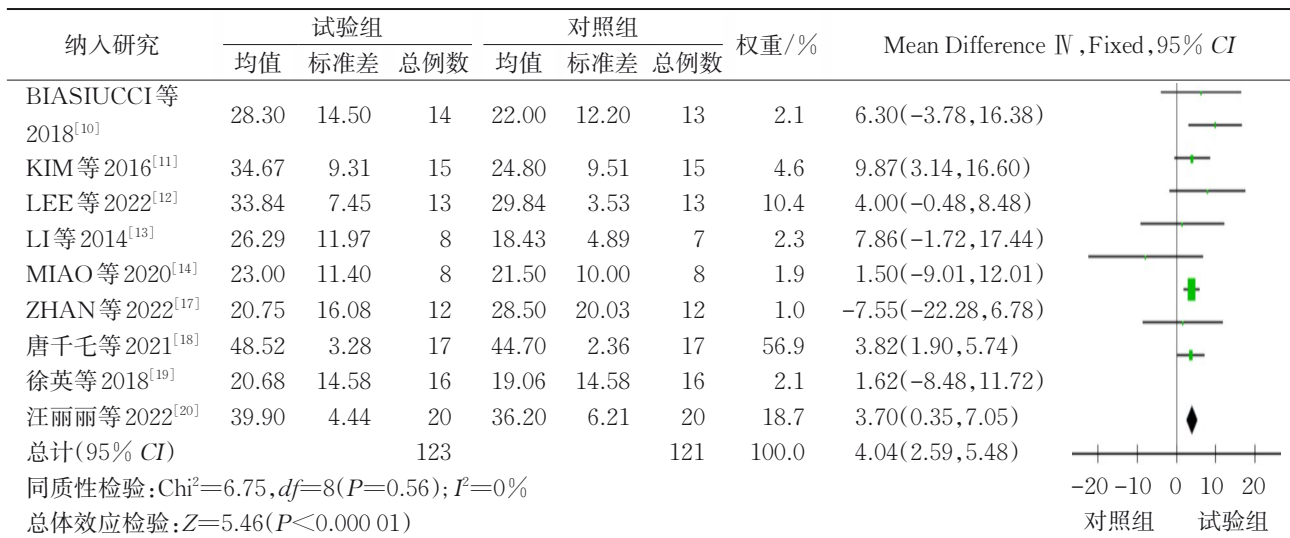


图3 2组FMA-UE评分比较

Figure 3 Comparison of FMA-UE score between two groups

2.4.2 FMA-UE评分差值 共8项RCTs^[10-17]报道了FMA-UE评分差值,其中试验组229例,对照组226例。各研究异质性较大($I^2=67%, P=0.003$),故采用随机效应模型进行分析。Meta分析结果显示,试验组治疗后FMA-UE差值明显高于对照组,差异具有统计学意义[$MD=2.77, 95\% CI(1.27, 4.28), Z=3.61, P=0.0003$]。见图4。

2.4.3 MBI评分 共5项RCTs^[11-12, 18-20]报道了MBI评分,其中试验组和对照组各81例。各研究异质性较大($I^2=80%, P=0.0005$),故采用随机效应模型进行分析。Meta分析结果显示,试验组治疗后MBI评分明显高于对照组,差异具有统计学意义[$MD=$

$7.41, 95\% CI(2.47, 12.36), Z=2.94, P=0.003$]。见图5。

2.4.4 FMA-UE评分、FMA-UE评分差值和MBI评分亚组分析结果 亚组分析结果显示,针对疾病分期、首次发生脑卒中的亚组以及BCI-FES+其他措施等亚组,试验组治疗后FMA-UE评分均高于对照组,差异均具有统计学意义($P<0.05$);针对疾病分期、首次发生脑卒中、BCI-FES+其他措施等亚组,试验组治疗后FMA-UE评分差值均高于对照组,差异均具有统计学意义($P<0.05$);针对BCI-FES+其他措施亚组,试验组治疗后MBI评分均高于对照组,差异均具有统计学意义($P<0.05$)。见表3。

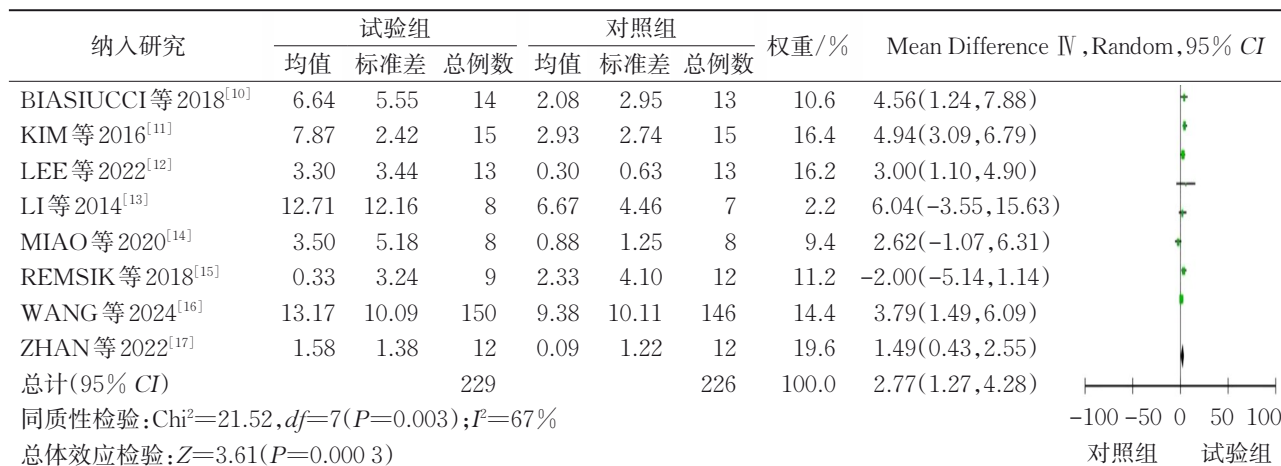


图4 2组FMA-UE评分差值比较

Figure 4 Comparison of FMA-UE score difference between two groups

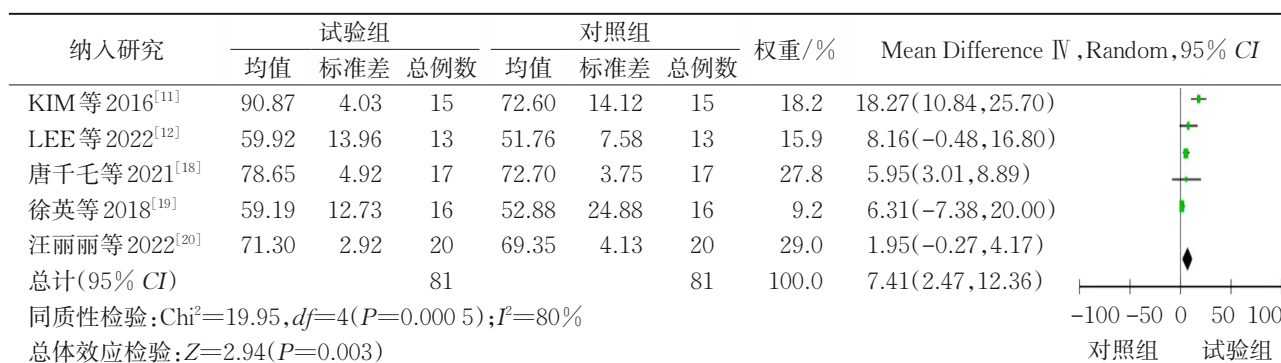


图5 2组MBI评分比较

Figure 5 Comparison of MBI score between two groups

表3 亚组分析结果

Table 3 Subgroup Analysis Results

结局指标	纳入研究数	异质性检验		效应模型	Meta分析	
		P值	I ² /%		MD(95% CI)	P值
FMA-UE评分	9	0.56	0	固定效应模型	4.04(2.59,5.48)	<0.001
首次发生脑卒中						
是	5	0.50	0	固定效应模型	4.13(2.56,5.71)	<0.001
否	4	0.35	9	固定效应模型	3.51(-0.15,7.18)	0.060
疾病分期						
亚急性期	3	0.71	0	固定效应模型	3.89(2.49,5.28)	<0.001
慢性期	6	0.31	16	固定效应模型	4.48(1.40,7.56)	0.004
治疗措施						
BCI-FES+常规康复治疗	5	0.59	0	固定效应模型	3.66(2.04,5.27)	<0.001
BCI-FES+其他措施	4	0.42	0	固定效应模型	5.62(2.32,8.92)	<0.001
疗程/周						
4	6	0.34	12	固定效应模型	3.95(2.45,5.44)	<0.001
>4	3	0.66	0	固定效应模型	5.36(-0.37,11.08)	0.070
单次治疗时长/min						
≤30	6	0.64	0	固定效应模型	4.02(2.53,5.51)	<0.001
>30	3	0.19	40	固定效应模型	4.36(-1.91,10.62)	0.170
FMA-UE评分差值	8	0.00	67	随机效应模型	2.77(1.27,4.28)	<0.001

续表3

结局指标	纳入研究数	异质性检验		效应模型	Meta分析	
		P值	I ² /%		MD(95% CI)	P值
首次发生卒中						
是	2	0.84	0	固定效应模型	4.85(3.23,6.47)	<0.001
否	6	0.05	55	随机效应模型	2.03(0.50,3.55)	0.009
疾病分期						
亚急性期	2	0.65	0	固定效应模型	3.91(1.67,6.15)	<0.001
慢性期	6	0.00	74	随机效应模型	2.50(0.74,4.27)	<0.001
治疗措施						
BCI-FES+常规康复治疗	2	0.08	66	随机效应模型	2.61(-0.29,5.50)	0.080
BCI-FES+其他治疗措施	6	0.01	66	随机效应模型	2.84(0.88,4.80)	0.005
疗程/周						
4	5	0.02	65	随机效应模型	3.10(1.63,4.57)	0.001
>4	5	0.01	77	随机效应模型	2.16(-3.25,7.57)	0.430
单次治疗时长/min						
≤30	4	0.47	0	固定效应模型	3.83(2.73,4.93)	<0.001
>30	4	0.03	66	随机效应模型	1.64(-1.04,4.33)	0.230
MBI评分	5	0.00	80	随机效应模型	7.41(2.47,12.36)	0.003
治疗措施						
BCI-FES+常规康复治疗	3	0.10	57	随机效应模型	3.93(0.57,7.30)	0.020
BCI-FES+其他治疗措施	2	0.08	67	随机效应模型	13.46(3.57,23.36)	0.008

3 讨论

3.1 BCI-FES技术可促进脑卒中患者上肢运动功能恢复

本研究 Meta 分析结果显示, 试验组治疗后 FMA-UE 评分、FMA-UE 评分差值和 MBI 评分均明显高于对照组, 这提示 BCI-FES 技术可提高脑卒中患者上肢运动功能和日常生活活动能力, 这与既往研究结果一致^[21-22]。可能与以下原因有关: ① 基于“中枢-外周-中枢”的闭环康复理论, 中枢、外周联合治疗比单一的中枢或外周刺激更有效^[23-25]。中枢干预可以直接对大脑的兴奋性进行调控, 为外周的训练提供中枢准备; 而外周训练可强化对中枢的正性反馈和输入。将中枢和外周结合形成“闭环”, 能更好地促进患者大脑皮质感觉运动区的激活, 提高神经可塑性, 加速神经功能恢复^[26-28]。通过 BCI-FES 技术结合, BCI 系统可捕捉患者运动意图, FES 可以在适当的时机提供电刺激, 实现闭环控制, 增强上肢运动康复的效果^[29]。② BCI-FES 通过实时反馈进一步促进神经可塑性, 提高脑卒中患者康复训练的主动性^[23]。在治疗过程中, BCI 系统检测到事件相关去同步化的突触前输入, 经 FES 激活类似突触后激活, 强化突触连接, 可促进神经可塑性与受损肢体功能恢复^[30]。BCI-FES 优势不仅可有效

促进神经可塑性、增强神经连接和修复神经通路, 还可有效提升患者注意力和主动参与康复的积极性^[31]。

3.2 首次发生脑卒中患者接受 BCI-FES 治疗上肢运动功能改善更明显

亚组分析结果显示, 首次发生脑卒中患者治疗后 FMA-UE 评分明显高于非首次发生脑卒中患者, 这提示首次发生脑卒中患者接受 BCI-FES 治疗上肢运动功能改善更明显。可能与以下原因有关: 首次脑卒中后, 皮质脊髓束神经元、感觉运动皮质神经元、神经干细胞及病灶周围神经元等可塑性较高, 且部分细胞未完全丧失功能。这些神经细胞通过神经纤维芽生、突触形成、活动增强及分泌神经营养因子等方式, 代偿受损区域功能, 促进神经再生和功能恢复, 为脑卒中患者康复提供有利基础^[32]。在 BCI-FES 治疗下, 通过多感官反馈和神经活动触发的功能电刺激, 激活大脑神经可塑性机制, 增强感觉运动整合与神经网络连接性, 重塑受损运动功能, 提升患者运动能力^[33]。未来可深入研究 BCI-FES 治疗的最佳时机与个性化方案, 充分利用其神经可塑性优势, 促进功能恢复。

3.3 脑卒中患者亚急性期接受 BCI-FES 治疗上肢运动功能恢复更明显

亚组分析结果显示, 亚急性期脑卒中患者治疗

后FMA-UE评分、FMA-UE评分差值均明显更高,这提示脑卒中患者亚急性期接受BCI-FES治疗上肢运动功能恢复更明显。可能与以下因素有关:脑卒中后第1个月是神经可塑性的高峰期,此时进行早期、高强度的康复干预可明显促进神经功能恢复。亚急性期脑卒中患者神经可塑性处于高峰期,短时高强度干预可充分利用这一窗口期,通过强化“意图-刺激-反馈”闭环机制,促进突触重塑与功能重组。这与KRAKAUER等^[34]研究观点相似。慢性期脑卒中患者神经可塑性降低,长时程训练可能面临收益递减效应。这与KWAKKEL等^[35]研究显示脑卒中后6个月内进行康复治疗的效果更明显的观点相似。因此,未来可进一步研究在不同阶段脑卒中患者BCI-FES技术的应用策略及作用机制,以提升临床康复效果。

3.4 BCI-FES联合其他措施可更有效改善脑卒中患者上肢运动功能

亚组分析结果显示,BCI-FES联合其他措施FMA-UE评分、FMA-UE评分差值和MBI评分均明显高于BCI-FES+常规康复治疗,这提示BCI-FES联合其他措施可更有效改善脑卒中患者上肢运动功能。可能与BCI-FES联合其他措施可有效改善脑卒中患者大脑皮质激活情况、提升注意力水平有关^[12,36]。这与王月莹等^[37]研究结果相似。BCI-FES与VR技术相结合可为康复训练营造沉浸式环境,给脑卒中患者带来更丰富的感官反馈与互动体验,进而提升康复效果。

4 小 结

BCI-FES技术可有效改善脑卒中患者上肢运动功能和日常生活活动能力,首次发生脑卒中、脑卒中恢复早期进行BCI-FES治疗或联合其他措施效果更好。但本研究存在以下不足之处,如纳入RCTs较少、各研究样本量偏小、研究对象主要集中在亚洲国家等,下一步研究应开展多中心、大样本临床随机对照研究,加强长期随访,以期为BCI-FES技术治疗脑卒中上肢运动功能障碍患者提供参考。

注:本文为第二十七届中国科协年会学术论文。

参考文献

- [1] SCHWARZ A, KANZLER C M, LAMBERCY O, et al. Systematic review on kinematic assessments of upper limb movements after stroke [J]. *Stroke*, 2019, 50(3): 718-727.
- [2] 郑婵娟, 华强, 李思成, 等. 脑卒中中西医结合康复诊疗方案湖北专家共识[J]. *湖北中医杂志*, 2023, 45(4): 60-66.
- [3] 任惠明, 崔志慧, 郭旭. 任务导向性训练在脑卒中患者运动功能恢复中的应用进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2018, 40(3): 227-229.
- [4] 胡义茜, 白玉龙. 强制性运动疗法的作用机制与临床应用研究进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2020, 42(10): 956-960.
- [5] HU Y Q, BAI Y L. Research progress on the mechanism and clinical application of compulsory exercise therapy [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2020, 42(10): 956-960.
- [6] NOJIMA I, SUGATA H, TAKEUCHI H, et al. Brain-computer interface training based on brain activity can induce motor recovery in patients with stroke: a meta-analysis [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2022, 36(2): 83-96.
- [7] YANG W W, ZHANG X Y, LI Z J, et al. The effect of brain-computer interface training on rehabilitation of upper limb dysfunction after stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Front Neurosci*, 2022, 15: 766879.
- [8] 王瑶, 李雨涵, 崔红岩, 等. 基于脑机接口的功能性电刺激研究综述[J]. *生物医学工程学杂志*, 2024, 41(4): 650-655.
- [9] WANG Y, LI Y H, CUI H Y, et al. A review of functional electrical stimulation based on brain-computer interface [J]. *J Biomed Eng*, 2024, 41(4): 650-655.
- [10] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J]. *中华神经科杂志*, 2019, 52(9): 710-715.
- [11] Chinese Society of Neurology, Chinese Stroke Society. Diagnostic criteria of cerebrovascular diseases in China (version 2019) [J]. *Chin J Neurol*, 2019, 52(9): 710-715.
- [12] CUMPTON M S, MCKENZIE J E, WELCH V A, et al. Strengthening systematic reviews in public health: guidance in the Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions, 2nd edition [J]. *J Public Health (Oxf)*, 2022, 44(4): e588-e592.
- [13] BIASIUCCI A, LEEB R, ITURRATE I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke [J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1): 2421.
- [14] KIM T, KIM S, LEE B. Effects of action observational training plus brain-computer interface-based functional electrical stimulation on paretic arm motor recovery in patient with stroke: a randomized controlled trial [J]. *Occup Ther Int*, 2016, 23(1): 39-47.
- [15] LEE S H, KIM S S, LEE B H. Action observation training and brain-computer interface controlled functional electrical stimulation enhance upper extremity performance and cortical activation in patients with stroke: a randomized controlled trial [J]. *Physiother Theory Pract*, 2022, 38(9): 1126-1134.
- [16] LI M F, LIU Y, WU Y, et al. Neurophysiological substrates of

- stroke patients with motor imagery-based Brain-Computer Interface training [J]. *Int J Neurosci*, 2014, 124(6): 403-415.
- [14] MIAO Y Y, CHEN S G, ZHANG X R, et al. BCI-based rehabilitation on the stroke in sequela stage [J]. *Neural Plast*, 2020, 2020: 8882764.
- [15] REMSIK A B, DODD K, WILLIAMS L JR, et al. Behavioral outcomes following brain-computer interface intervention for upper extremity rehabilitation in stroke: a randomized controlled trial [J]. *Front Neurosci*, 2018, 12: 752.
- [16] WANG A X, TIAN X, JIANG D, et al. Rehabilitation with brain-computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: a randomized controlled trial [J]. *Med*, 2024, 5(6): 559-569.e4.
- [17] ZHAN G G, CHEN S G, JI Y Y, et al. EEG-based brain network analysis of chronic stroke patients after BCI rehabilitation training [J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 909610.
- [18] 唐千毛, 张通. 脑机接口控制的功能性电刺激对脑卒中患者上肢功能障碍的康复效果[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(7): 802-806.
- TANG Q T, ZHANG T. Effects of functional electrical stimulation controlled by brain-computer interface on upper limb dysfunction in stroke patients [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2021, 27(7): 802-806.
- [19] 徐英, 吉艳云, 贾杰, 等. 脑-计算机接口结合功能性电刺激训练对老年脑卒中患者上肢功能和认知的疗效观察[J]. *中华老年心脑血管病杂志*, 2018, 20(9): 988-990.
- XU Y, JI Y Y, JIA J, et al. Effect of brain-computer interface combined with functional electrical stimulation training on upper limb function and cognition of elderly stroke patients [J]. *Chin J Geriatr Heart Brain Vessel Dis*, 2018, 20(9): 988-990.
- [20] 汪丽丽, 张颖, 王春方, 等. 基于脑机接口的电刺激训练对脑卒中患者上肢功能障碍康复的临床研究[J]. *生物医学工程与临床*, 2022, 26(2): 163-168.
- WANG L L, ZHANG Y, WANG C F, et al. Clinical study of brain-computer interface based electrical stimulation training in improving upper limb dysfunction of patients with stroke [J]. *Biomed Eng Clin Med*, 2022, 26(2): 163-168.
- [21] REMSIK A B, WILLIAMS L JR, GJINI K, et al. Ipsilesional mu rhythm desynchronization and changes in motor behavior following post stroke BCI intervention for motor rehabilitation [J]. *Front Neurosci*, 2019, 13: 53.
- [22] REN C L, LI X M, GAO Q, et al. The effect of brain-computer interface controlled functional electrical stimulation training on rehabilitation of upper limb after stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18: 1438095.
- [23] 王陶陶, 古剑雄. 脑卒中后手运动功能障碍的康复治疗进展[J]. *中西医结合心脑血管病杂志*, 2021, 19(22): 3920-3922.
- WANG T T, GU J X. Advances in rehabilitation treatment of hand motor dysfunction after stroke [J]. *Chin J Integr Med Cardio Cerebrovasc Dis*, 2021, 19(22): 3920-3922.
- [24] 樊东, 许文强, 余秋华, 等. 基于“中枢-外周-中枢”闭环干预系
统在脑卒中后手功能康复的研究进展[J]. *中国医学创新*, 2022, 19(15): 160-165.
- FAN D, XU W Q, YU Q H, et al. Research progress of hand function rehabilitation based on "central-peripheral-central" closed-loop intervention system after stroke [J]. *Med Innov China*, 2022, 19(15): 160-165.
- [25] 李冲, 涂舒婷, 林嘉滢, 等. 基于闭环理论的卒中后上肢感觉障碍康复研究进展[J]. *中国卒中杂志*, 2022, 17(10): 1058-1064.
- LI C, TU S T, LIN J Y, et al. Progress on upper limb sensory impairment rehabilitation after stroke based on closed-loop theory [J]. *Chin J Stroke*, 2022, 17(10): 1058-1064.
- [26] SATTLER V, ACKET B, RAPOSO N, et al. Anodal tDCS combined with radial nerve stimulation promotes hand motor recovery in the acute phase after ischemic stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2015, 29(8): 743-754.
- [27] 蒋尚融, 文明明, 毛小亮, 等. 基于“中枢-外周-中枢”闭环康复理念使用重复经颅磁刺激对早期大脑中动脉卒中患者上肢功能的影响研究[J]. *中国医药指南*, 2022, 20(13): 53-55.
- JIANG S R, WEN M M, MAO X L, et al. The effect of repetitive transcranial magnetic stimulation on upper limb function in patients with early middle cerebral artery stroke combine with central-periphery-center in treatment [J]. *Guide China Med*, 2022, 20(13): 53-55.
- [28] 王渊. 基于“中枢-外周-中枢”闭环康复理论观察磁刺激M1区联合内关、三阴交穴对卒中后肢体运动功能障碍的影响[D]. 咸阳: 陕西中医药大学, 2021: 3-5.
- WANG Y. Effects of magnetic stimulation on M1 area combined with Neiguan (PC6) and Sanyinjiao (SP6) acupoints on limb motor dysfunction after stroke based on the "central-peripheral-central" closed-loop rehabilitation theory [D]. Xianyang: Shaanxi University of Chinese Medicine, 2021: 3-5.
- [29] GANGADHARAN S K, RAMAKRISHNAN S, PAEK A, et al. Characterization of event related desynchronization in chronic stroke using motor imagery based brain computer interface for upper limb rehabilitation [J]. *Ann Indian Acad Neurol*, 2024, 27(3): 297-306.
- [30] 秦汉, 李学平, 田千慧, 等. 脑机接口控制的功能性电刺激在中枢神经损伤康复中的应用进展[J]. *神经损伤与功能重建*, 2024, 19(10): 584-588.
- QIN H, BO X P, TIAN Q H, et al. Advances in the application of brain-computer interface controlled functional electrical stimulation in central nervous system injury rehabilitation [J]. *Neural Inj Funct Reconstr*, 2024, 19(10): 584-588.
- [31] KHAN M A, FARES H, GHAYVAT H, et al. A systematic review on functional electrical stimulation based rehabilitation systems for upper limb post-stroke recovery [J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1272992.
- [32] CRAMER S C. Repairing the human brain after stroke: I. mechanisms of spontaneous recovery [J]. *Ann Neurol*, 2008, 63(3): 272-287.
- [33] REMSIK A B, VAN KAN P L E, GLOE S, et al. BCI-FES with

- multimodal feedback for motor recovery poststroke [J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 725715.
- [34] KRAKAUER J W, CARMICHAEL S T, CORBETT D, et al. Getting neurorehabilitation right: what can be learned from animal models? [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2012, 26(8): 923–931.
- [35] KWAKKEL G, VAN PEPPEN R, WAGENAAR R C, et al. Effects of augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis [J]. *Stroke*, 2004, 35(11): 2529–2539.
- [36] LIU X L, ZHANG W D, LI W B, et al. Effects of motor imagery based brain-computer interface on upper limb function and attention in stroke patients with hemiplegia: a randomized controlled trial [J]. *BMC Neurol*, 2023, 23(1): 136.
- [37] 王月莹, 徐宁, 王润芳, 等. 脑机接口技术在神经系统疾病康复中的应用进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2023, 45(11): 1031–1034.
- WANG Y Y, XU N, WANG R F, et al. Advances in application of brain-computer interface technology for neurological rehabilitation [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2023, 45(11): 1031–1034.

Effects of Brain-Computer Interface Combined with Functional Electrical Stimulation on Upper Limb Motor Function of Stroke Patients: A Meta-analysis

CHEN Songmei¹, GAO Jiajia¹, ZHANG Xiaolin¹, LI Zhaoyuan¹, SHAN Chunlei^{2*}

¹ Shanghai No.3 Rehabilitation Hospital, Shanghai 200436, China;

² Rehabilitation Institute, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China;

³ Tongren Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200336, China

*Correspondence: SHAN Chunlei, E-mail: shancl@shsmu.edu.cn

ABSTRACT Objective To evaluate the effect of brain-computer interface (BCI) combined with functional electrical stimulation (FES) technology on upper limb motor function in stroke patients using a Meta-analysis method. **Methods** Data were searched and retrieved from the databases of the China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Wanfang Data, VIP Chinese Science and Technology Periodical Database (VIP), PubMed, Embase, Web of Science, The Cochrane Library, ClinicalTrials.gov for randomized controlled trials (RCTs) on BCI-FES improving upper limb motor function in stroke patients from the database inception to February 2025. The primary outcome measures included the Fugl-Meyer Assessment of the Upper Extremity (FMA-UE), FMA-UE score differences, and the Modified Barthel Index (MBI) score. Literature screening, data extraction, and risk of bias assessment were independently performed by two researchers, followed by a meta-analysis using RevMan 5.4 software. Heterogeneity among the included RCTs was assessed using the χ^2 test and quantified with I^2 to determine the magnitude of heterogeneity. A fixed-effects model was applied when heterogeneity was low ($I^2 \leq 50\%$, $P \geq 0.1$); a random-effects model was used when heterogeneity was high ($I^2 > 50\%$, $P < 0.1$). **Results** A total of 11 RCTs were included, involving 561 participants. Meta-analysis results indicated that compared with the control group, the FMA-UE score in the experimental group after treatment was significantly higher [$MD=4.04$, 95% $CI(2.59, 5.48)$, $Z=5.46$, $P<0.000\ 01$]; and the FMA-UE score difference was significantly higher than that of the control group [$MD=2.77$, 95% $CI(1.27, 4.28)$, $Z=3.61$, $P=0.000\ 3$]; and the MBI score was significantly higher than that of the control group [$MD=7.41$, 95% $CI(2.47, 12.36)$, $Z=2.94$, $P=0.003$]. Subgroup analysis results indicated that the post-treatment FMA-UE scores in the experimental group were significantly higher than those in the control group for subgroups stratified by disease stage, first stroke occurrence, and BCI-FES combined with other therapeutic measures after treatment ($P<0.05$). The subgroup FMA-UE score differences in the experimental group were all significantly greater than the control group for disease stage, first stroke occurrence, and BCI-FES combined with other therapeutic measures after treatment ($P<0.05$). The MBI scores in the experimental group were significantly higher than those of the control group for the BCI-FES combined with other therapeutic measures subgroup ($P<0.05$). **Conclusion** BCI-FES technology can effectively improve upper limb motor function and activities of daily living of stroke patients. Better outcomes are achieved when BCI-FES treatment is administered in patients with first-ever stroke, in the early recovery stage of stroke, or combined with other rehabilitation measures.

KEY WORDS stroke; brain-computer interface; functional electrical stimulation; upper limb motor function; meta-analysis

DOI:10.3724/SP.J.1329.2025.06006