



• 科研简报 •

经颅直流电刺激用于术后镇痛：基于随机对照研究的系统评价与荟萃分析 *

王 佳 宋柯雨 李良文 张学广 宋 莉[△]

(四川大学华西医院疼痛科, 成都 610041)

据统计, 超过 60% 的手术病人经历了中至重度的术后疼痛, 且其中 20% 在术后 24 h 内遭受剧烈疼痛^[1]。术后疼痛控制欠佳将对病人生活质量、功能恢复等造成负面影响^[2]。国内外专家一致认为术后应采取多模式镇痛, 包括药物和非药物手段。全球范围内阿片类药物滥用逐年增加, 因此用于术后镇痛的的非药物手段备受关注, 并被证明是有效的^[3,4]。非侵入性脑刺激 (non-invasive brain stimulation, NIBS) 技术是一类应用于神经精神疾病领域的无创神经调节方式, 在改善情绪障碍、促进认知及功能恢复、减轻急慢性疼痛等方面有确切疗效^[5]。经颅直流电刺激 (transcranial direct current stimulation, tDCS) 是常见的 NIBS 技术, 它可通过调节皮质神经元的兴奋性和自发神经活动, 刺激中枢性内啡肽及脑源性神经营养因子 (brain-derived neurotrophic factor, BDNF) 产生、减少中枢炎症因子释放而达到镇痛效果^[6-8]。既往研究显示, tDCS 对慢性纤维肌痛症、慢性神经病理性疼痛等疾病有治疗作用^[9-11]。近年来, 有学者探索 tDCS 用于术后镇痛的效果, 但结果不一。因此, 本研究旨在全面搜集已发表的关于 tDCS 用于术后镇痛的随机对照研究, 系统评价其有效性和安全性。

方 法

1. 写作原则和注册

本研究全程遵循系统评价和荟萃分析优先报告条目 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, PRISMA) 报告规范, 并在 PROSPERO (<https://www.crd.york.ac.uk/PROSPERO/>) 完成注册, 注册号为: CRD42023454617。

2. 检索策略

检索范围: PubMed、Web of Science、Embase、Cochrane 图书馆、中国生物医学文献服务系统 (Sinomed)、中国知网 (CNKI)、万方数据库、维普数据库等 8 个数据库, 时限至 2023 年 7 月, 语言限制为中文和英文。中文检索词包括: “经颅直流电刺激” “术后镇痛” “术后疼痛” “随机对照试验” 等。英文检索词包括: “Transcranial Direct Current Stimulation” “Electrical Stimulation, Transcranial” “Postoperative Analgesic” “Postoperative Pain” “Postsurgical Pain” “Randomized Controlled Trial” 等。采用布尔逻辑运算符将主题词与自由词组合进行检索, 同时查找相关综述中的参考文献进行补充。

纳入标准: ①研究类型为随机对照试验; ②研究对象为手术病人 (性别、年龄、人种、手术类型、随访时间不限); ③干预措施: 试验组为围手术期使用 tDCS 真实刺激 (刺激脑区、电极、电流、时长、次数不限) 用于术后镇痛, 对照组为 tDCS 假刺激组或空白对照; ④结果测量应至少包含以下指标中的 1 种: 术后静脉吗啡消耗量 (指术后吗啡累积消耗量, 不同阿片类药物按照镇痛效能进行等效剂量换算成静脉吗啡剂量^[12])、术后疼痛评分包括静息和活动疼痛评分, 使用视觉模拟评分法 (visual analogue scale, VAS) 或数字分级评分法 (numerical rating scale, NRS) 评分、tDCS 相关不良事件 (包括局部皮肤瘙痒、疼痛、刺痛、癫痫发作、耳鸣等)。

排除标准: ①非中、英文文献; ②研究类型为非随机对照试验、回顾性研究、动物研究; ③文献类型为 Meta 分析、综述、个案报道、述评、会议纪要、经验介绍、信件和护理性文献等; ④试验组的干预措施同时包含 tDCS 和其他非药物镇痛方案; ⑤同一研究数据重复发表的文献; ⑥结局指标中无上述目标结局; ⑦无法获取全文或不能提取任何有效数

* 基金项目: 四川省科技计划资助项目 (2020YFS0188); 中国老年保健医学研究会资助项目 (A-WS-2022-KY-0010)

[△] 通信作者 宋莉 song_li76@163.com

据的文献；⑧研究设计、统计学方法明显不合理的临床研究。

3. 文献筛选和资料提取

去除重复文献后，由2位研究者独立阅读题目、摘要、全文，按照纳入和排除标准进行文献筛选后再交叉核对，若存在分歧则由第3位研究者决定。2位研究者独立使用自制的表格进行数据提取后再交叉核对，提取内容包括：纳入研究发表时间、作者、国家或地区；研究对象基线特征；试验组和对照组具体实施方案；结局指标和测量数据；研究偏倚风险评价关键要素等。若原文中的结果仅使用图片呈现，未提供原始数据，使用 WebPlotDigitizer (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>) 进行数据提取。若对纳入研究中的关键数据或资料存疑，必要时使用邮件或电话等方式联系原作者。若对提取的数据存在意见分歧，则再次讨论至意见统一，若仍存在分歧则由第3位研究者决定。

4. 文章质量评价

据 Cochrane 手册 (5.1.0) 推荐，采用 Cochrane 协作网偏倚危险度评估工具，评估包含随机分配方法、分配隐藏方案、盲法实施、结果数据的完整性、选择性报告结果、其他来源共6个方面的偏倚风险。评价结果包括：低偏倚风险 (low risk)、偏倚风险不清楚 (unclear risk) 和高偏倚风险 (high risk)。由2名研究者独立进行文献质量评价并交叉核对，若出现分歧则交由第3位研究者决定。

5. 统计学分析

使用 RevMan 5.4.1 软件进行数据分析，吗啡消耗量和疼痛评分为连续性变量，采用标准均数差 (standardized mean difference, SMD) 表示，tDCS 相关不良事件为二分类变量，采用相对危险度 (relative ratio, RR) 表示，以 95% 可信区间 (confidence interval, CI) 表示总体参数的估计区间， $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。研究间异质性采用卡方检验，检验水准为 $P = 0.1$ ，结合 I^2 定量分析纳入文献异质性的。当 $P \geq 0.1$ ， $I^2 \leq 50\%$ 时认为研究间异质性差异无统计学意义，采用固定效应模型进行合并分析；当 $P < 0.1$ ， $I^2 > 50\%$ 时，则认为研究间存在异质性，采用随机效应模型，并分析异质性来源。发表偏倚采用漏斗图表示。

6. 亚组分析和敏感性分析

按照 tDCS 电极放置于初级运动皮质区 (primary motor cortex, M1 区) 或额叶皮质区 (prefrontal 区) 和 tDCS 治疗次数 (单次或多次) 进行亚组分析，以期寻找 tDCS 减少术后吗啡消耗量的影响因素。

并进一步分析 tDCS 对术后不同时间 (术后 1、2、3 或 5 天) 的吗啡消耗量影响。敏感性分析使用逐一排除法进行，排除相关研究后，若合并结果的方向发生改变，则说明被排除研究的偏倚较大，结果需要谨慎解释。

结 果

1. 文献检索结果

根据检索策略，初步检索到文献共 179 篇，经过剔除重复文献，根据纳入和排除标准阅读题目、摘要及全文后，最终纳入包括共 413 例病人的 10 项 RCT 进行系统评价及荟萃分析，文献筛选流程图见图 1。

2. 纳入研究基本特征及文献质量评价

10 项 RCT^[13-22] 共纳入 413 例病人，覆盖脊柱手术、膝关节手术、拇外翻手术、胸科手术及内镜逆行胆胰管造影术 (endoscopic retrograde cholangiopancreatography, ERCP) 等多种手术类型，涉及以 M1 区和额叶皮质区为靶皮层行 tDCS，3 项研究行单次 tDCS 治疗^[16,17,19]，其余研究均采用多次治疗，纳入研究的随访时间波动于术后 1~5 天。结局指标分别涉及术后吗啡消耗量、术后静息疼痛评分 (rVAS)、活动疼痛评分 (dVAS)、tDCS 相关不良事件、术后焦虑抑郁评估等。2 项研究未作具体随机方法描述^[16,20]，3 项研究未提及是否进行分配隐藏^[15-17]，所有研究均对研究者及病人实施盲

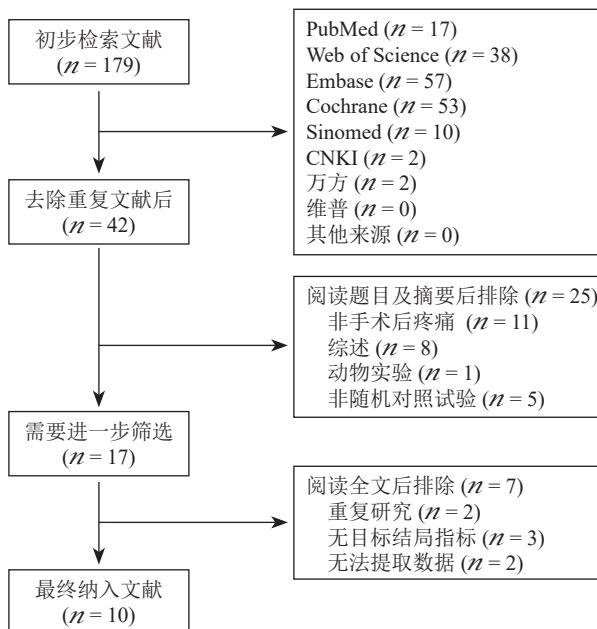


图 1 文献筛选流程图

法，纳入文献的基本特征见表 1，偏倚风险评价结果见图 2。

3. 荟萃分析结果

(1) 吗啡消耗量：共 8 项研究^[13-18,20,22] 报告了术后 1 天至 5 天吗啡消耗量，各研究间无明显异质性 ($P = 0.15$, $I^2 = 43.5\%$)，固定效应模型分析显示试验组较对照组术后吗啡消耗量减少 [$SMD = -0.39$, 95% $CI (-0.56, -0.23)$, $P < 0.00001$]，见图 3。根据 tDCS 电极放置皮层进行亚组分析，M1 区 tDCS 组较对照组术后吗啡消耗量减少 [$SMD = -0.40$, 95% $CI (-0.60, -0.20)$, $P < 0.0001$]，而前额叶 tDCS 组与对照组术后吗啡消耗量差异无统计学意义 [$SMD = -0.36$,

95% $CI (-0.79, 0.07)$, $P = 0.1$]，见表 2。根据 tDCS 治疗次数行亚组分析显示，不论是单次 tDCS 或多次 tDCS 治疗，对术后吗啡消耗量均无明显影响 [$SMD = -0.17$, 95% $CI (-0.64, 0.30)$, $P = 0.48$; $SMD = -0.16$, 95% $CI (-0.48, 0.15)$, $P = 0.31$]，见表 2。根据术后不同时间点进行分析结果显示，两组术后 1 天吗啡消耗量差异无统计学意义 [$SMD = -0.17$, 95% $CI (-0.43, 0.10)$, $P = 0.21$]，术后 2 天、3 天及 5 天试验组吗啡消耗量较对照组均减少 [$SMD = -0.47$, 95% $CI (-0.80, -0.14)$, $P = 0.005$; $SMD = -0.64$, 95% $CI (-0.98, -0.30)$, $P = 0.0002$; $SMD = -0.49$, 95% $CI (-0.93, -0.05)$, $P = 0.03$]，见图 3。

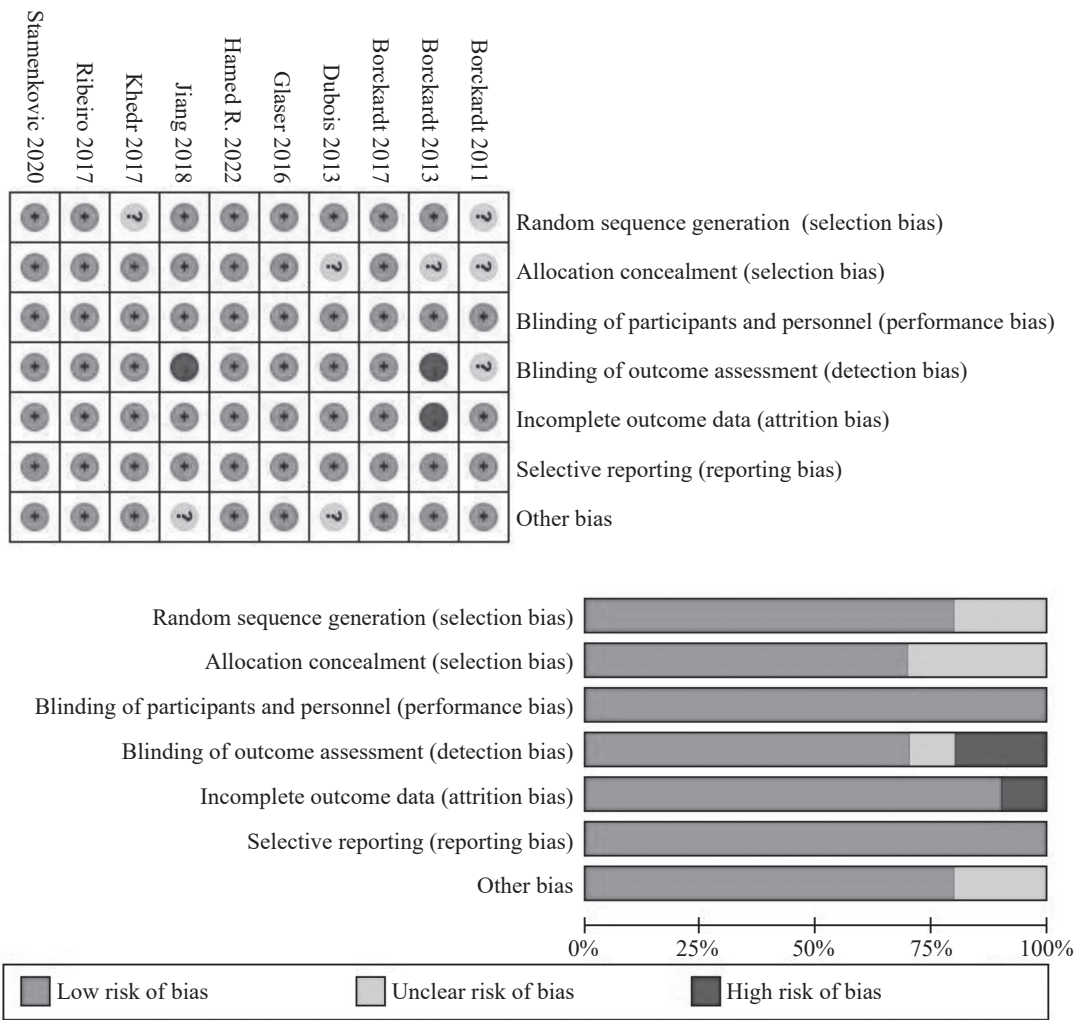


图 2 纳入研究的偏倚风险评价
Random sequence generation (selection bias): 随机序列生成 (选择偏倚)；Allocation concealment (selection bias): 分配隐藏 (选择偏倚)；Blinding of participants and personnel (performance bias): 对病人、试验人员实施盲法 (实施偏倚)；Blinding of outcome assessment (detection bias): 对结局评估者实施盲法 (测量偏倚)；Incomplete outcome data (attrition bias): 结果数据不完整 (随访偏倚)；Selective reporting (reporting bias): 选择性报告 (报告偏倚)；Other bias: 其他偏倚；Low risk of bias (低偏倚风险)；Unclear risk of bias (偏倚风险不清楚)；High risk of bias (高偏倚风险)

表 1 纳入文献基本特征

纳入研究	地区	分组	样本量	男/女	年龄 (岁)	手术 类型	术后镇痛 方案	刺激部位	刺激参数	首次 治疗	治疗 次数	结局 指标
Hamed 2022 ^[18]	埃及	M1 组	20	11/9	45±12	脊柱 手术	tDCS、PCA 吗啡泵、 对乙酰氨基酚	M1	2 mA, 20 min	术后	3	①②
		额叶组	20	8/12	42±12			左背外侧前 额叶	2 mA, 20 min			
		对照组	20	14/6	41±11			M1	2 mA, 60 s			
Borckardt 2011 ^[16]	美国	试验组	10	-	37.78±10.81	ERCP	tDCS、PCA 吗啡泵	左前额叶	2 mA, 20 min	术后	1	①②③
		对照组	9	-	37.00±13.18				2 mA, 30 s			
Borckardt 2013 ^[15]	美国	试验组	20	-	-	膝关节 置换	tDCS、PCA 吗啡泵、 股神经阻滞、坐骨 神经阻滞	右背外侧额叶	2 mA, 20 min	术后	4	①②
		对照组	20	-	-				2 mA, 30 s			
Borckardt 2017 ^[14]	美国	M1 组	14	-	-	膝关节 置换	tDCS、PCA 吗啡泵、 股神经阻滞、坐骨 神经阻滞	M1	2 mA, 20 min	术后	4	①②
		额叶组	16	-	-			左前额叶	2 mA, 20 min			
		对照组	13	-	-			M1 或左前额叶	0 mA, 20 min			
Dubois 2013 ^[17]	比利 时	试验组	40	-	-	腰椎 手术	tDCS、PCA 吗啡泵	左背外侧额叶	1 mA, 20 min	术后	1	①②③
		对照组	19	-	-				1 mA, 30 s			
Glaser 2016 ^[13]	美国	试验组	14	-	58.00±9.30	脊柱 手术	tDCS、PCA 吗啡泵	M1	2 mA, 20 min	术后	4	①②③
		对照组	13	-	61.00±12.50				2 mA, 45 s			
Jiang 2018 ^[19]	中国	试验组	11	3/8	47.90±10.00	腰椎 手术	tDCS、地佐辛	M1	2 mA, 20 min	术后	1	②③
		对照组	11	5/6	50.50±11.70				2 mA, 10 s			
Khedr 2017 ^[20]	埃及	试验组	24	11/13	55.20±5.90	膝关节 手术	tDCS、酮咯酸、对 乙酰氨基酚、纳布菲	M1	2 mA, 20 min	术后	4	①②③
		对照组	24	10/14	54.60±6.10				2 mA, 30 s			
Ribeiro 2017 ^[21]	巴西	试验组	20	-	48.36±10.97	拇外翻 手术	tDCS 安乃近、吗 啡针	M1	2 mA, 20 min	术前	2	②③
		对照组	20	-	46.00±13.55							
Stamenkovic 2020 ^[22]	塞尔 维亚	试验组	27	16/11	61.44±7.98	胸科 手术	tDCS、PCA 吗啡泵、 肋间神经阻滞	左 M1	1.2 mA, 20 min	术后	3~5	①②
		对照组	28	23/5	61.89±5.79				1.2 mA, 60 s			

Endoscopic retrograde cholangio pancreatography (ERCP): 内窥镜逆行胰胆管造影术; Patient-controlled analgesia (PCA): 病人自控镇痛;
① 吗啡消耗量; ② 疼痛评分; ③ tDCS 相关不良事件

表 2 不同部位及次数 tDCS 对术后吗啡消耗量影响的荟萃分析结果

结局指标	纳入研究	异质性检验		效应模型	荟萃分析结果	
		<i>I</i> ² (%)	<i>P</i>		效应量 (SMD, 95% <i>CI</i>)	<i>P</i>
不同部位						
M1 vs. 对照组	5	0	0.5	固定	-0.40 (-0.60, -0.20)	< 0.0001
前额叶 vs. 对照组	5	64	0.01	随机	-0.36 (-0.79, 0.07)	0.10
不同次数						
单次 tDCS vs. 对照组	2	0	0.45	固定	-0.17 (-0.64, 0.3)	0.48
多次 tDCS vs. 对照组	3	0	0.61	固定	-0.16 (-0.48, 0.15)	0.31

(2) 疼痛评分: 10 项研究均报告了术后疼痛评分, 其中 3 项研究^[13-15]无法从原文提取疼痛评分数据, 除 2 项研究^[13,19]使用 NRS 评分外, 其余均使用 VAS 进行评分。固定效应模型分析显示, tDCS 可降低术后静息疼痛评分 [SMD = -0.47, 95% *CI* (-0.66, -0.28), *P* < 0.0001], 但对术后活动痛无明显优势 [SMD = -0.15, 95% *CI* (-0.38, 0.08), *P* = 0.19], 见表 3。

(3) 安全性评价: 6 项研究^[13,16,17,19-21]报告了 tDCS 相关不良反应, 主要为电极放置部位头皮发红、瘙痒、刺痛等轻度不适, 无癫痫、精神疾病等重大不

良事件发生的报告, 各研究中均无因不能承受 tDCS 不良反应而退出的病人。但因无法获取具体数据, 仅进行系统评价, 总体而言, tDCS 用于术后镇痛是安全的。

4. 发表偏倚

采用漏斗图分析术后吗啡消耗量为结局指标的文献发表情况, 结果显示两侧散点基本呈对称性分布, 提示发表偏倚相对较小 (见图 4)。

5. 敏感性分析

针对术后吗啡消耗量这一指标, 将纳入的有该指标数据的 8 项研究采用逐一排除法, 荟萃分析结

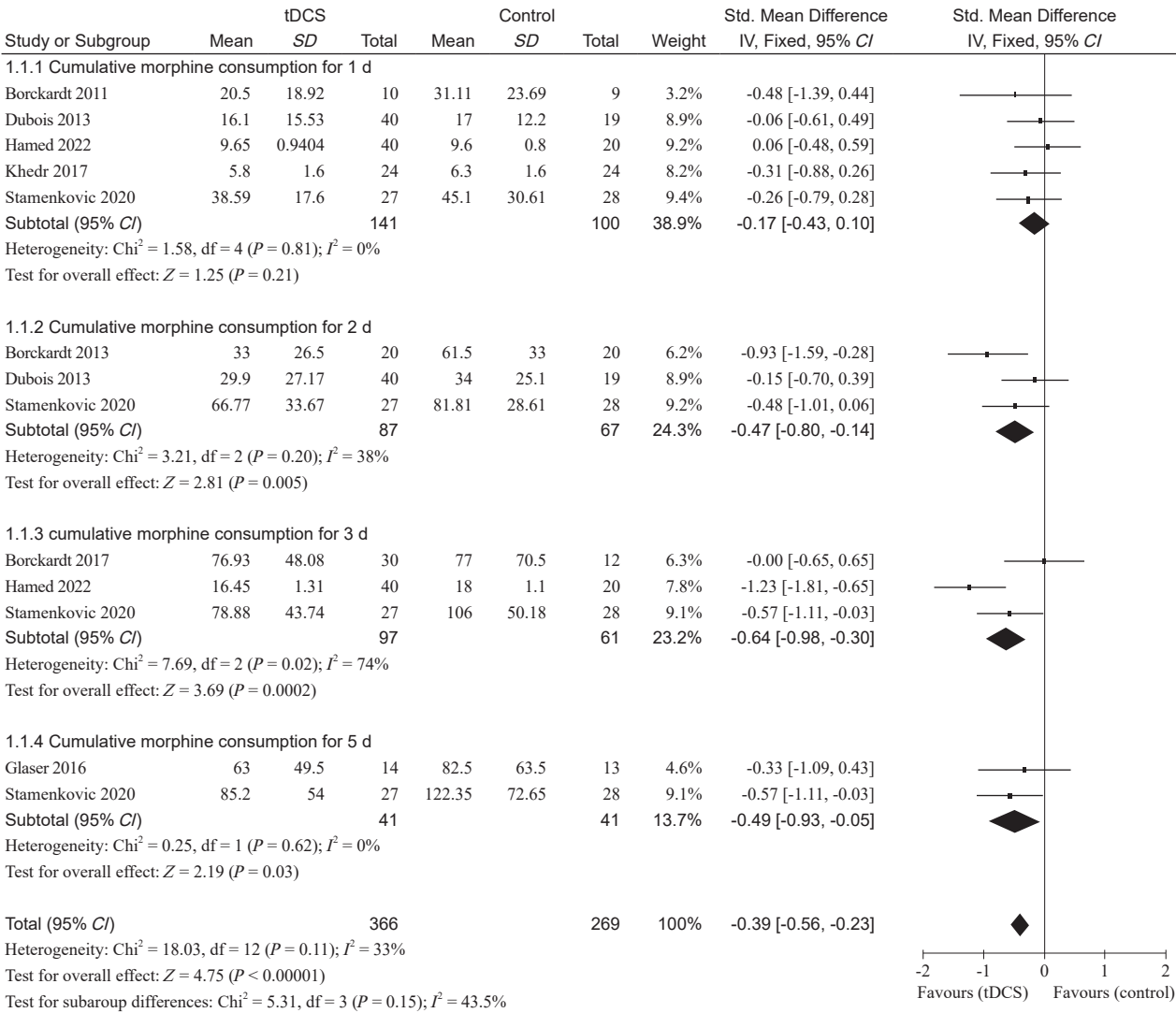


图 3 tDCS 组与对照组术后吗啡消耗量比较的荟萃分析
Cumulative morphine consumption for 1 d: 术后 1 日吗啡累计消耗量; Cumulative morphine consumption for 2 d: 术后 2 日吗啡累计消耗量; Cumulative morphine consumption for 3 d: 术后 3 日吗啡累计消耗量; Cumulative morphine consumption for 5 d: 术后 5 日吗啡累计消耗量; Transcranial direct current stimulation (tDCS): 经颅直流电刺激; Primary motor cortex (M1): 初级运动皮质

表 3 tDCS 对疼痛评分影响的荟萃分析结果

结局指标	纳入研究	异质性检验		效应模型	荟萃分析结果	
		I^2 (%)	P		效应量 (SMD, 95% CI)	P
静息 rVAS 评分				固定		
tDCS 组 vs. 对照组	7	0	0.57		-0.47 (-0.66, -0.28)	< 0.0001
M1 组 vs. 对照组	5	49	0.12		-0.49 (-0.77, -0.22)	0.0004
前额叶 vs. 对照组	3	0	0.95		-0.52 (-0.82, -0.22)	0.0007
活动 dVAS 评分				固定		
tDCS 组 vs. 对照组	3	0	0.69		-0.15 (-0.38, 0.08)	0.19
M1 组 vs. 对照组	2	0	0.99		-0.10 (-0.38, 0.19)	0.51
前额叶 vs. 对照组	3	0	0.80		-0.16 (-0.43, 0.11)	0.25

果方向一致，均为 tDCS 可减少术后吗啡消耗量，表明该统计结论稳定（见表 4）。

讨 论

全球手术量日益增多，良好的术后疼痛管理可促进病人康复，改善预后。阿片类药物作为术后镇痛最常用药物，其不合理使用导致的严重社会问题已引起国内外学者的高度重视^[23]，临床上应积极使用多模式镇痛方案以降低其滥用的风险。国内外多

个术后镇痛专家共识指出非药物手段用于术后镇痛的巨大潜力，尤其是对肝肾功能损伤，一般情况较差的病人，非药物镇痛手段尤为重要，然而相关研究较少，至今仍缺乏有力证据^[3,4]。

近年来，tDCS 在治疗急慢性疼痛方面展现出巨大潜力，tDCS 的镇痛作用机制目前包括以下学说：① tDCS 以不同的电流极性引起神经元膜电位变化，改变大脑皮质的兴奋性，调节大脑功能^[24]；② tDCS 刺激皮质及皮质下疼痛相关区域内源性阿片肽的释放增加，达到中枢性镇痛作用^[7,25]；③ tDCS 诱导神经元膜电位变化，增加 M1 区内 BDNF 和原肌球蛋白受体激酶 B (tropomyosin receptor kinase, TrkB)，促进神经重塑^[26]；④ tDCS 通过调节中枢系统氧化-抗氧化水平，影响中枢炎症细胞因子（IL- α 、IL- β 、IL-6、IL-10 等）水平，减轻神经炎症，从而减轻疼痛^[8,27]。其镇痛作用涉及中枢及外周神经系统，机制尚在进一步探索完善中。

本研究结果显示，tDCS 不仅可减少术后 2~5 天的吗啡消耗量，与对照组相比，还可改善术后静息疼痛评分，且无严重 tDCS 相关不良事件发生。亚组分析显示，tDCS 作用于 M1 区可较对照组减少术后吗啡消耗量，而作用于通常认为与疼痛控制及情绪调控相关的前额叶皮质区，未发现显著效果，此结果与 Wen 等^[28]对 tDCS 用于治疗慢性疼痛的系统评价结果一致。

既往研究认为，tDCS 的治疗效果及持续时长与治疗次数呈正相关^[29]，有学者提出，tDCS 针对慢性疼痛的最佳治疗次数应在 5~10 次之间^[28,30]，本研究未发现单次或多次 tDCS 治疗对术后吗啡消耗量有影响，但鉴于目前针对急性疼痛的最佳 tDCS 治疗次数的研究较少，本研究纳入的研究有限，且纳入研究中报告的治疗次数波动于 1~5 次，整体重复治疗次数偏少，亦缺乏大样本、多中心的高质量研究，该结果需要谨慎解释。

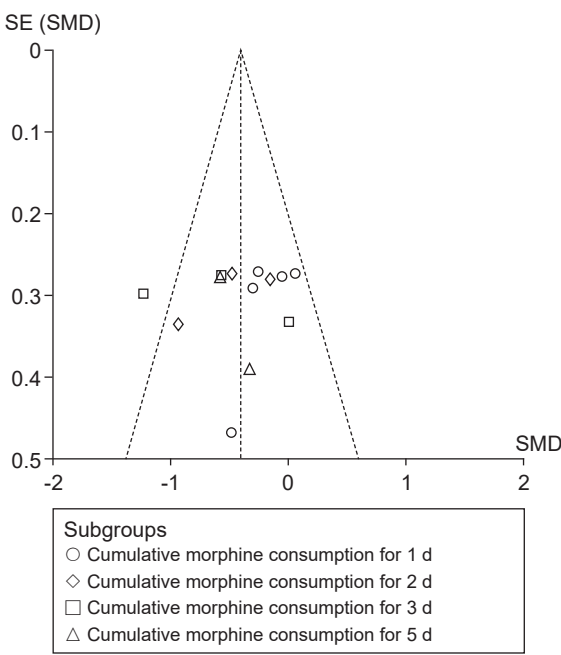


图 4 tDCS 组与对照组术后吗啡消耗量的漏斗图
Subgroups: 亚组; Cumulative morphine consumption for 1 d: 术后 1 日吗啡累计消耗量; Cumulative morphine consumption for 2 d: 术后 2 日吗啡累计消耗量; Cumulative morphine consumption for 3 d: 术后 3 日吗啡累计消耗量; Cumulative morphine consumption for 5 d: 术后 5 日吗啡累计消耗量

表 4 敏感性分析结果

排除研究	异质性检验		效应模型	分析结果	
	I^2 (%)	P		效应量 (SMD, 95% CI)	P
Stamenkovic 2020 ^[22]	52	0.03	随机	-0.37 (-0.67, -0.07)	0.02
Khedr 2017 ^[20]	39	0.08	随机	-0.41 (-0.63, -0.19)	0.0003
Hamed 2022 ^[18]	0	0.69	固定	-0.37 (-0.54, -0.19)	< 0.0001
Dubois 2013 ^[17]	35	0.12	固定	-0.46 (-0.64, -0.28)	< 0.0001
Borckardt 2011 ^[16]	0	0.62	固定	-0.39 (-0.56, -0.23)	< 0.0001
Borckardt 2013 ^[15]	28	0.17	固定	-0.36 (-0.53, -0.19)	< 0.0001
Borckardt 2017 ^[14]	33	0.12	固定	-0.42 (-0.59, 0.25)	< 0.0001
Glaser 2016 ^[13]	39	0.08	随机	-0.4 (-0.62, 0.19)	0.0002

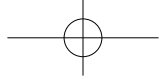
本研究存在的局限性：①由于语言限制为中文和英文，且纳入研究文献数量较少，可能存在发表偏倚；②纳入研究多为小样本 RCT，并且在 tDCS 电极位置、治疗时长、治疗次数、首次治疗开始时间（术前或术后）、治疗模式等方面，尚无统一论，对照组在研究中也有所不同，可能存在临床异质性；③本研究主要关注 tDCS 对减少术后吗啡消耗量的效果，多项研究报告 tDCS 对于缓解病人焦虑、抑郁、术后认知功能障碍等围手术期常见不良结果亦有改善作用^[31,32]，但由于纳入研究可用数据较少，且研究间采用不同评估方法，故无法进一步进行分析；④纳入的文献覆盖手术类型较多，但总体研究量偏少，无法评估 tDCS 对何种类型手术的术后镇痛效果更好，针对 tDCS 在围手术期的镇痛作用，仍缺乏大样本、多中心的高质量文献。

综上所述，现有证据表明，tDCS 可辅助术后镇痛，减少术后吗啡消耗量，且安全性较好。鉴于纳入研究的样本量较小，治疗参数各异，仍需大样本、多中心、高质量研究以指导 tDCS 的围手术期使用。未来的研究可针对术后急性疼痛 tDCS 的最佳靶皮质和治疗参数进行进一步探究，同时关注 tDCS 用于围手术期治疗对病人情绪障碍、认知功能及远期恢复等方面的作用进一步评估。

利益冲突声明：作者声明本文无利益冲突。

参 考 文 献

- [1] Small C, Laycock H. Acute postoperative pain management[J]. Br J Surg, 2020, 107(2):e70-e80.
- [2] Glare P, Aubrey KR, Myles PS. Transition from acute to chronic pain after surgery[J]. Lancet, 2019, 393(10180):1537-1546.
- [3] Pirie K, Traer E, Finnis D, *et al.* Current approaches to acute postoperative pain management after major abdominal surgery: a narrative review and future directions[J]. Br J Anaesth, 2022, 129(3):378-393.
- [4] 徐建国. 成人日间手术后镇痛专家共识 (2017)[J]. 临床麻醉学杂志, 2017, 33(8):812-815.
- [5] Camacho-Conde JA, Gonzalez-Bermudez MDR, Carretero-Rey M, *et al.* Brain stimulation: a therapeutic approach for the treatment of neurological disorders[J]. CNS Neurosci Ther, 2022, 28(1):5-18.
- [6] Lefaucheur JP, Antal A, Ayache SS, *et al.* Evidence-based guidelines on the therapeutic use of transcranial direct current stimulation(tDCS)[J]. Clin Neurophysiol, 2017, 128(1):56-92.
- [7] Santos DS, Lopes BC, Medeiros LF, *et al.* Transcranial direct current stimulation (tDCS) induces analgesia in rats with neuropathic pain and alcohol abstinence[J]. Neurochem Res, 2020, 45(11):2653-2663.
- [8] Chase HW, Boudewyn MA, Carter CS, *et al.* Transcranial direct current stimulation: a roadmap for research, from mechanism of action to clinical implementation[J]. Mol Psychiatry, 2020, 25(2):397-407.
- [9] Knotkova H, Hamani C, Sivanesan E, *et al.* Neuromodulation for chronic pain[J]. Lancet, 2021, 397(10289):2111-2124.
- [10] 高鑫, 黄运健, 倪兵, 等. 双靶点经颅直流电刺激治疗头面部带状疱疹后神经痛的临床研究 [J]. 中国疼痛医学杂志, 2024, 30(12):928-933.
- [11] Lloyd DM, Wittkopf PG, Arendsen LJ, *et al.* Is transcranial direct current stimulation (tDCS) effective for the treatment of pain in fibromyalgia? A systematic review and meta-analysis[J]. J Pain, 2020, 21(11-12): 1085-1100.
- [12] 曾宪政, 郑碧鑫, 樊宇超, 等. 阿片药物耐受病人疼痛阈值变化的临床研究 [J]. 中国疼痛医学杂志, 2019, 25(1):35-39.
- [13] Glaser J, Reeves ST, Stoll WD, *et al.* Motor/prefrontal transcranial direct current stimulation (tDCS) following lumbar surgery reduces postoperative analgesia use[J]. Spine, 2016, 41(10):835-839.
- [14] Borckardt JJ, Reeves ST, Milliken C, *et al.* Prefrontal versus motor cortex transcranial direct current stimulation (tDCS) effects on post-surgical opioid use[J]. Brain Stimul, 2017, 10(6):1096-1101.
- [15] Borckardt JJ, Reeves ST, Robinson SM, *et al.* Transcranial direct current stimulation (tDCS) reduces post-surgical opioid consumption in total knee arthroplasty (TKA)[J]. Clin J Pain, 2013, 29(11):925-928.
- [16] Borckardt JJ, Romagnuolo J, Reeves ST, *et al.* Feasibility, safety, and effectiveness of transcranial direct current stimulation for decreasing post-ERCP pain: a randomized, sham-controlled, pilot study[J]. Gastrointest Endosc, 2011, 73(6):1158-1164.
- [17] Dubois PE, Osseman M, de Fays K, *et al.* Postoperative analgesic effect of transcranial direct current stimulation in lumbar spine surgery: a randomized control trial[J]. Clin J Pain, 2013, 29(8):696-701.
- [18] Hamed R, Khedr EM, Haridy NA, *et al.* Effects of transcranial direct current stimulation in pain and opioid consumption after spine surgery[J]. Eur J Pain, 2022, 26(7):1594-1604.
- [19] Jiang NF, Li GS, Wei JS, *et al.* Transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex on postoperative pain and spontaneous oscillatory electroencephalographic activity following lumbar spine surgery: a pilot study[J]. Restor Neurol Neurosci, 2018, 36(5):605-620.
- [20] Khedr EM, Sharkawy ESA, Attia AMA, *et al.* Role of transcranial direct current stimulation on reduction of



- postsurgical opioid consumption and pain in total knee arthroplasty: double randomized clinical trial[J]. *Eur J Pain*, 2017, 21(8):1355-1365.
- [21] Ribeiro H, Sesterhenn RB, Souza A, *et al.* Preoperative transcranial direct current stimulation: exploration of a novel strategy to enhance neuroplasticity before surgery to control postoperative pain. A randomized sham-controlled study[J]. *PLoS One*, 2017, 12(11):e0187013.
- [22] Stamenkovic DM, Mladenovic K, Rancic N, *et al.* Effect of transcranial direct current stimulation combined with patient-controlled intravenous morphine analgesia on analgesic use and post-thoracotomy pain. a prospective, randomized, double-blind, sham-controlled, proof-of-concept clinical trial[J]. *Front Pharmacol*, 2020, 11:125.
- [23] Beloeil H. Opioid-free anesthesia[J]. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*, 2019, 33(3):353-360.
- [24] Rizzo V, Terranova C, Crupi D, *et al.* Increased transcranial direct current stimulation after effects during concurrent peripheral electrical nerve stimulation[J]. *Brain Stimul*, 2014, 7(1):113-121.
- [25] DosSantos MF, Love TM, Martikainen IK, *et al.* Immediate effects of tDCS on the μ -opioid system of a chronic pain patient[J]. *Front Psychiatry*, 2012, 3:93.
- [26] Fritsch B, Reis J, Martinowich K, *et al.* Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning[J]. *Neuron*, 2010, 66(2):198-204.
- [27] Akcay G, Nemutlu Samur D, Derin N. Transcranial direct current stimulation alleviates nociceptive behavior in male rats with neuropathic pain by regulating oxidative stress and reducing neuroinflammation[J]. *J Neurosci Res*, 2023, 101(9):1457-1470.
- [28] Wen YR, Shi J, Hu ZY, *et al.* Is transcranial direct current stimulation beneficial for treating pain, depression, and anxiety symptoms in patients with chronic pain? A systematic review and meta-analysis[J]. *Front Mol Neurosci*, 2022, 15:1056966.
- [29] Navarro-López V, Del-Valle-Gratacós M, Fernández-Vázquez D, *et al.* Transcranial direct current stimulation in the management of phantom limb pain: a systematic review of randomized controlled trials[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2022, 58(5):738-748.
- [30] Cheng YC, Hsiao CY, Su MI, *et al.* Treating fibromyalgia with electrical neuromodulation: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Neurophysiol*, 2023, 148:17-28.
- [31] Stein DJ, Fernandes Medeiros L, Caumo W, *et al.* Transcranial direct current stimulation in patients with anxiety: current perspectives[J]. *Neuropsychiatr Dis Treat*, 2020, 14:16:161-169.
- [32] Tao M, Zhang S, Han Y, *et al.* Efficacy of transcranial direct current stimulation on postoperative delirium in elderly patients undergoing lower limb major arthroplasty: a randomized controlled trial[J]. *Brain Stimul*, 2023, 16(1):88-96.

(上接第 213 页)

- [33] Kim MJ, Lindsey DP, Hannibal M, *et al.* Vertebroplasty versus kyphoplasty: biomechanical behavior under repetitive loading conditions[J]. *Spine*, 2006, 31(18):2079-2084.
- [34] 霍柱根, 丘青中, 李剑, 等. 经皮椎弓根钉内固定治疗骨质疏松性椎体压缩骨折 [J]. *医药与保健*, 2014, 22(2):28, 31.
- [35] Wen Z, Mo X, Zhao S, *et al.* Comparison of percutaneous kyphoplasty and pedicle screw fixation for treatment of thoracolumbar severe osteoporotic vertebral compression fracture with kyphosis[J]. *World Neurosurg*, 2021, 152(Suppl C):e589-e596.
- [36] Li Z, Wang Y, Xu Y, *et al.* Efficacy analysis of percutaneous pedicle screw fixation combined with percutaneous vertebroplasty in the treatment of osteoporotic vertebral compression fractures with kyphosis[J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1):53.
- [37] 聂锦平. 脊神经后支射频消融联合神经阻滞治疗骨质疏松椎体压缩性骨折的疗效观察 [D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [38] Park KD, Jee H, Nam HS, *et al.* Effect of medial branch block in chronic facet joint pain for osteoporotic compression fracture: one year retrospective study[J]. *Ann Rehabil Med*, 2013, 37(2):191-201.
- [39] Zhou L, Zhou J. Spinal dorsal rami injection and radiofrequency neurolysis for low back pain caused by osteoporosis-induced thoracolumbar vertebral compression fractures[J]. *J Rehabil Med Clin Commun*, 2021, 4:1000056.