

改良健侧颈七神经转位治疗上肢痉挛性偏瘫的临床研究

杨 忠, 黄启顺*

华中科技大学同济医学院附属协和医院手外科, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月3日; 发布日期: 2026年4月13日

摘 要

背景: 中枢神经系统损伤后上肢痉挛性偏瘫是导致患者长期功能障碍和生活能力下降的重要原因, 传统康复治疗对慢性期患者的功能改善有限。健侧颈七神经转位术为中枢性偏瘫的治疗提供了新的外科思路, 但传统术式在手内部肌功能恢复方面仍存在一定局限。本研究旨在探讨改良健侧颈七神经转位术在治疗中枢神经系统损伤后上肢痉挛性偏瘫中的临床疗效与安全性。方法: 回顾性分析2023年9月至2026年1月华中科技大学同济医学院附属协和医院收治的47例中枢神经损伤后上肢痉挛性偏瘫患者。根据治疗方式不同分为三组: 改良健侧C7神经转位组11例、传统健侧C7神经转位组15例、康复治疗组21例。分别在治疗后1、3、6及12个月采用Fugl-Meyer上肢运动功能量表(FMA-UE)、改良Ashworth量表(MAS)、关节活动度(ROM)及Barthel指数(BI)评估疗效, 并记录术后不良反应。结果: 两种手术组在FMA-UE评分、ROM及Barthel指数改善方面均显著优于康复组($P < 0.05$)。MAS评分显示手术组肌张力在术后1个月显著下降, 3个月轻度回升, 随后在6-12个月再次下降并趋于稳定。在屈伸肘、前臂旋转及腕关节相关肌群痉挛改善方面, 两种术式差异无统计学意义($P > 0.05$); 但在拇指对掌及2~5指分/并指等反映手内部肌功能的指标中, 改良术式改善程度明显优于传统术式($P < 0.05$)。两组手术患者均出现短期疼痛、感觉减退及健侧肌力下降等不良反应, 但多在术后6个月内逐渐恢复。结论: 改良健侧C7神经转位术可显著改善中枢神经损伤后上肢痉挛性偏瘫患者的运动功能和肌张力, 并在手内部肌痉挛缓解及精细运动恢复方面优于传统术式, 且具有良好的安全性。

关键词

中枢神经系统损伤, 痉挛性偏瘫, 改良神经转位手术

Clinical Study of Modified Contralateral Seventh Cervical Nerve Transposition for Upper Limb Spastic Hemiplegia

Zhong Yang, Qishun Huang*

*通讯作者。

Department of Hand Surgery, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: March 9, 2026; accepted: April 3, 2026; published: April 13, 2026

Abstract

Background: Spastic hemiplegia of the upper limb caused by central nervous system injury is a major factor leading to long-term disability, and conventional rehabilitation often shows limited effectiveness in patients with chronic motor impairment. Contralateral C7 nerve transfer has emerged as a promising surgical approach for improving upper-limb function; however, the conventional procedure has limited effects on intrinsic hand muscle recovery. This study aimed to investigate the clinical efficacy and safety of a modified contralateral C7 nerve transfer in the treatment of spastic hemiplegia following central nervous system injury. **Methods:** A retrospective analysis was conducted on 47 patients with spastic upper-limb hemiplegia secondary to central nervous system injury who were treated at Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, from September 2023 to January 2026. According to treatment modality, patients were divided into three groups: modified contralateral C7 nerve transfer group (n = 11), conventional contralateral C7 nerve transfer group (n = 15), and rehabilitation group (n = 21). Clinical outcomes were evaluated at 1, 3, 6, and 12 months after treatment using the Fugl-Meyer Assessment of Upper Extremity (FMA-UE), Modified Ashworth Scale (MAS), Range Of Motion (ROM), and Barthel Index (BI). Postoperative adverse events were also recorded. **Results:** Both surgical groups showed significantly greater improvements in FMA-UE score, ROM, and BI than the rehabilitation group ($P < 0.05$). MAS scores showed that muscle tone in the surgical groups decreased markedly at 1 month after surgery, rebounded slightly at 3 months, and then decreased again and gradually stabilized during months 6 to 12. No statistically significant difference was found between the two surgical procedures in the improvement of spasticity involving elbow flexion-extension, forearm rotation, and wrist-related muscle groups ($P > 0.05$). However, in indicators reflecting intrinsic hand muscle function, including thumb opposition and separation/approximation of the second to fifth fingers, the modified procedure showed significantly greater improvement than the conventional procedure ($P < 0.05$). Short-term adverse events, including pain, sensory decline, and reduced muscle strength of the contralateral limb, were observed in both surgical groups, but most gradually resolved within 6 months after surgery. **Conclusion:** Modified contralateral C7 nerve transfer can significantly improve motor function and muscle tone in patients with spastic upper-limb hemiplegia after central nervous system injury. It is superior to the conventional procedure in relieving intrinsic hand muscle spasticity and restoring fine motor function, while maintaining a favorable safety profile.

Keywords

Central Nervous System Injury, Spastic Hemiplegia, Modified Nerve Transposition Operation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

中枢神经系统损伤是全球重大健康挑战, 影响数百万人[1], 其高发病率和致残率严重威胁人类健康与生活质量。中枢神经系统损伤后引发的肢体痉挛性瘫痪是其导致患者长期功能障碍和残疾的主要原因之

一[2]。卒中、脑肿瘤、脑瘫和颅脑外伤等疾病损伤中枢神经系统,造成肢体运动功能障碍,严重影响患者的日常生活活动能力(ADL)[3],导致生活自理困难,并对患者、家庭及社会带来沉重负担[4][5]。传统康复干预主要依赖功能性训练、物理治疗和作业治疗等手段,以改善肌力、协调性和功能活动能力[6][7]。尽管早期康复训练在一定程度上能改善肌力和运动范围,但许多患者仍面临功能恢复的“平台期”,尤其在协调性、灵活性、精细动作及力量方面难以获得显著提升[8][9]。虚拟现实训练、机器人辅助训练、电刺激等边缘技术虽能使得患者上肢功能有所改善,但在长期、全面恢复神经功能和运动方面仍存在局限[10]。因此,亟需探索更有效的治疗策略,突破现有康复模式瓶颈,提高患者功能预后,最终改善生活质量[11]。

中枢性上肢痉挛性偏瘫通常由上运动神经元(UMN)损伤引起,损伤可能发生在大脑皮层、内囊、脑干或其他中枢神经结构[12]。这种损伤会导致锥体束及脑干下行运动通路受损或中断,从而使下位运动神经元失去正常的抑制调控[13],表现为痉挛性肌张力增高、反射亢进和运动失控。UMN损伤后,抑制性与兴奋性下行输入的失衡是引发痉挛的核心病理机制[14],主要表现为脊髓牵张反射弧抑制减少和促动输入增强,导致脊髓运动神经元的易化及牵张反射的过度激活,肌张力随速度增加而升高,这与Lance的经典定义相符[15]。研究表明,皮质脊髓束与网状脊髓束等通路的功能失衡与痉挛程度密切相关,这种重塑反映了中枢神经系统的代偿性改变,但却对功能恢复产生负面影响[16]。中枢神经系统受损后,大脑具有一定的结构和功能重塑能力,即神经可塑性[17]。然而,由于胼胝体中连接神经纤维数量有限且大脑皮层特定功能区较为复杂,导致对侧大脑半球的代偿潜力受到一定制约[18][19]。因此,通过外周神经系统干预来增强中枢代偿能力显得尤为重要。

顾玉东院士在对侧第七颈椎(cC7)神经根转位术治疗臂丛神经根性撕脱伤的基础上[20],将cC7神经根转位至患侧,以治疗中枢性上肢痉挛性偏瘫[21],该手术将cC7神经根与患侧相应的第七颈椎(C7)神经根连接,在对侧大脑半球和同侧受累肢体之间建立直接的神经联系通路,很大程度上增强了对侧大脑半球的代偿能力,成功实现了对侧大脑半球对双侧肢体运动的共同控制与影响[22]。相关临床研究数据表明,与单纯康复治疗相比,cC7神经转位术可以显著改善患者上肢肌力、肌张力,提高运动功能及肢体协调性,这都得益于术后的神经再生与大脑重塑[23]-[25]。

在供体神经的选择方面,颈七(C7)脊神经根因其在臂丛神经中的关键位置,被誉为“神经交换枢纽”,具有显著且独特的解剖学优势。定量解剖学研究显示,C7是臂丛中直径和纤维数量最大的神经根,双侧共含约18,000至45,000根(平均约30,000根)有髓神经纤维,其轴突总数明显多于C5或C6[26]。这种高容量的神经纤维储备为转位术后远端多个靶肌的再支配提供了充足的轴突来源,使其在跨中线再生过程中即便发生一定程度的轴突损耗,仍可保留足够数量的有效纤维以诱发功能性肌肉收缩,从而为术后功能重建提供可靠的动力基础[27]。受体神经方面,现有研究表明,在臂丛神经损伤的功能重建中,与单一受体神经相比,将对侧颈7(cC7)神经转位至两根受体神经并不会降低临床效果[28][29],这一现象提示cC7具有同时支持多重神经再生的潜能,这与其丰富的轴突来源密切相关[30]。受体神经的选择直接决定术后上肢功能恢复的效能。由于C7神经根在臂丛中并不参与内侧束的主要构成[31],其传统转位后无法为尺神经及正中神经内侧头提供来自健侧C7的纤维输入,这也解释了为何经典方法术后常见手内在肌感觉及运动功能恢复局限的问题。在上干型臂丛神经撕脱伤的功能重建中,Oberlin型神经移位术仍然是恢复肘屈功能的核心策略之一。该术式通过将尺神经及/或正中神经的运动束支选择性转移至肌皮神经(尤其是肱二头肌及肱肌的运动神经分支),实现对屈肘肌群的再支配,从而重建主动屈肘运动,即使在术中切断受体神经的少量高位神经纤维束为供体用于桥接移位[32],其短期内并不会显著损害原有神经的主要功能,说明切断少量高位尺神经和正中神经纤维是可行的[33][34]。

基于上述理论支持,在传统健侧C7神经转位手术的基础上,本研究创新性提出一种改良术式,即在cC7神经转位至患侧C7神经的同时,部分转位至臂丛神经下干,以更好地实现手内部肌肉肌张力及手指

精细运动的改善, 并为中枢系统带来更多的外周反馈从而达到脑功能的良好重塑。研究共纳入 47 例患者进行对照, 在华中科技大学同济医学院附属协和医院手外科共招募了 11 例因中枢神经系统损伤导致上肢痉挛性偏瘫的患者, 进行改良健侧 C7 神经转位手术, 并与同时期行传统手术及康复的患者进行对照, 分析改良手术的安全性及有效性, 为治疗中枢神经损伤性上肢瘫痪提供新的思路和方法。

2. 资料与方法

2.1. 研究对象

纳入 2023 年 9 月至 2026 年 1 月在华中科技大学同济医学院附属协和医院治疗的中枢神经系统损伤后上肢痉挛性偏瘫患者 47 例。根据治疗方式分为三组: 改良手术组: 11 例; 传统手术组: 15 例; 康复治疗组: 21 例。

三组患者在年龄、性别、病因、病程及治疗前功能评分等方面差异均无统计学意义($P > 0.05$), 具有可比性。

纳入标准: 卒中、脑外伤或脑瘫等中枢神经损伤导致的上肢痉挛性偏瘫; 接受其他治疗 2 年且功能恢复进入平台期; 年龄 14~65 岁; 患者及家属知情同意。

排除标准: 严重心肺或全身系统疾病; 严重关节挛缩或固定畸形; 精神或认知障碍影响配合治疗。

2.2. 治疗方法

传统手术组采用经典健侧 C7 神经转位术, 通过椎前通路将健侧 C7 神经转位至患侧 C7 神经并行端端吻合。

改良手术组在传统术式基础上, 将健侧 C7 神经分为两束, 其中一束与患侧 C7 神经端端吻合, 另一束桥接至患侧臂丛下干, 以增加内侧束神经输入。

康复治疗: 根据患者具体病情特点及功能评估结果, 由康复医学科制定个体化、分阶段的康复治疗方

2.3. 评价指标

Fugl-Meyer 上肢运动功能评分(FMA-UE)、改良 Ashworth 量表(MAS)、关节活动度(ROM) (图 1)、Barthel 指数(BI), 分别于治疗后 1、3、6 及 12 个月进行随访评估。

2.3. 统计学方法

采用 GraphPad Prism 软件进行统计分析。计量资料以均数 \pm 标准差表示, 组间比较采用方差分析, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

3. 研究结果

3.1. 传统健侧颈七神经转位手术

研究纳入 15 例进行传统健侧颈七转位手术的患者, 完成术前相关检查及准备工作, 严格排除手术禁忌症后, 择期行手术治疗(部分手术操作见图 2)。

3.2. 改良健侧颈七神经转位手术

研究纳入 11 例因中枢神经损伤所致单侧肢体瘫痪患者, 所有患者均完成术前相关检查及准备工作, 严格排除手术禁忌症后, 均择期行改良健侧颈七神经转位术(部分手术操作见图 3)。

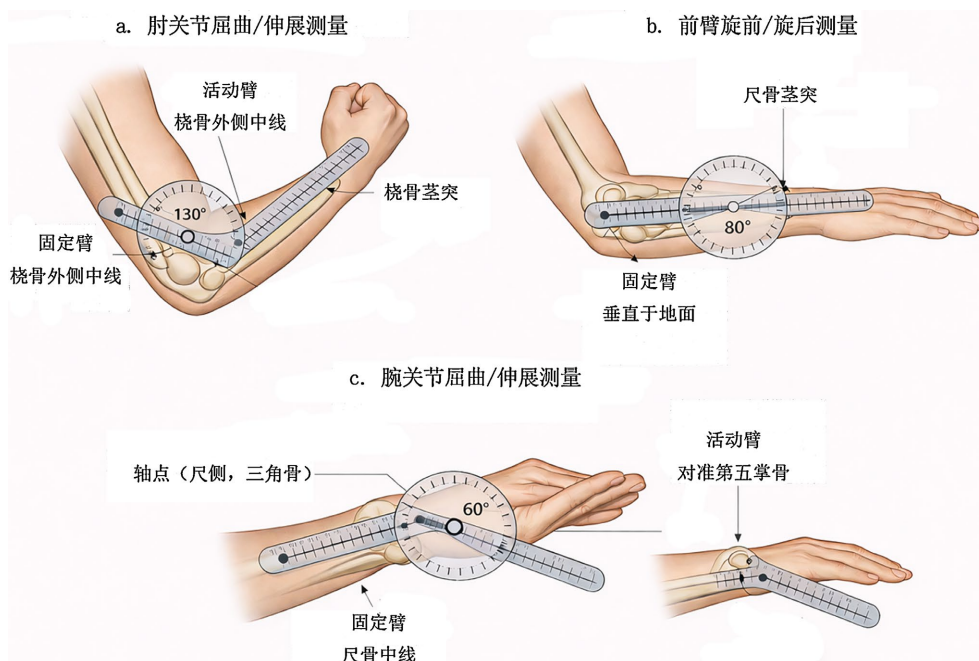
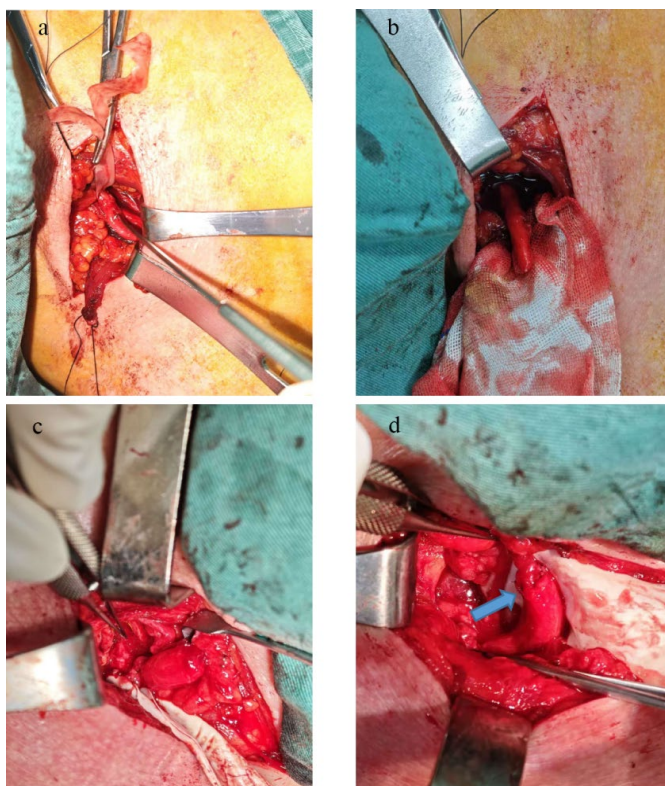
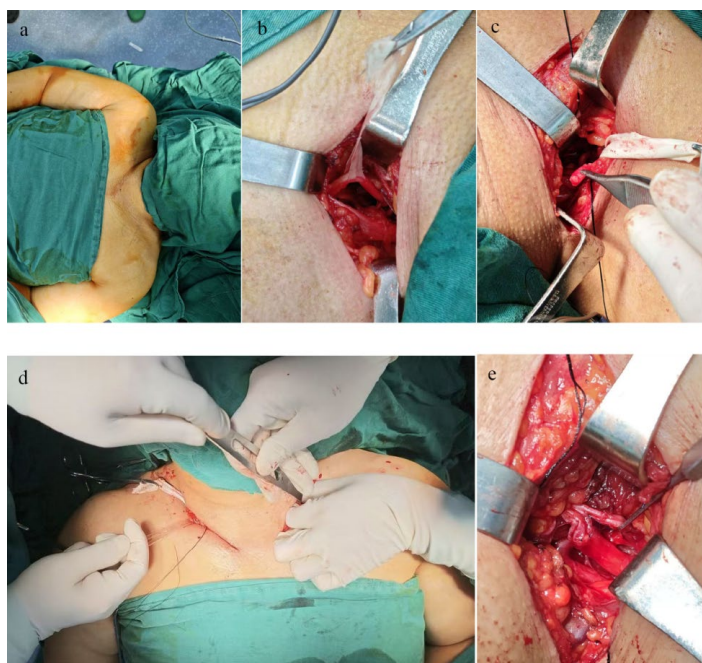


Figure 1. Schematic diagram of joint motion measurement
图 1. 关节活动度测量示意图



a. 暴露健侧臂丛神经; b. 自根部切断健侧 C7 神经; c. 暴露对侧臂丛神经并沿根部切断; d. 将健侧颈七神经远端与对侧断端相吻合(箭头所示为吻合口)。

Figure 2. Traditional contralateral cervical seventh nerve transposition
图 2. 传统健侧颈七神经转位术



a. 麻醉后仰卧颈伸位常规消毒铺巾; b. 暴露健侧臂丛神经(橡皮条牵拉为 C7 神经); c. 自根部切断健侧 C7 神经; d. 利用橡皮条将健侧 C7 神经穿过椎前通路至对侧; e. 将健侧 C7 分为两束, 一束与患侧 C7 神经吻合, 另一束端端吻合桥接至患侧下干外膜缺口处。

Figure 3. Modified contralateral cervical seventh nerve transposition

图 3. 改良健侧颈七神经转位术

3.3. 三组患者基本信息比较

本研究共纳入 47 例患者, 根据不同治疗方式分为三组: 改良健侧颈七神经转位术组 11 例, 传统健侧颈七神经转位术组 15 例, 康复治疗组 21 例。三组患者的基本人口学资料及临床特征, 包括性别、年龄、偏瘫侧别、偏瘫病因、病程以及相关功能评估指标等, 具体情况详见表 1。

为确保各组研究对象在研究开始时具有良好的可比性, 本研究对三组患者术前的基线资料进行了系统的统计学比较分析。比较内容主要包括一般临床资料(如年龄、性别构成等)、疾病相关因素(如偏瘫病因、病程长短等)以及治疗前的各项功能评估指标。统计分析结果显示, 三组患者在上述各项基线指标上的分布情况基本一致, 各组之间差异均无统计学意义($P > 0.05$)。结果提示, 三组患者在研究开始前的基本特征及功能状态处于相似水平, 未发现显著差异, 研究对象的基线资料均衡, 组间具有良好的可比性。

Table 1. Comparison of basic information of three groups of patients

表 1. 三组患者基本信息比较

临床资料	改良手术组(n = 11)	传统手术组(n = 15)	康复组(n = 21)
年龄(岁)	40.27 ± 16.09	39.85 ± 15.72	40.53 ± 16.31
性别			
男	7	9	9
女	4	6	12
患侧			
左	6	8	13

续表

右	5	7	8
偏瘫病因(例数)			
中风	3	4	6
脑瘫	2	3	4
创伤性损伤	3	4	5
脑出血	2	2	3
其他	1	2	3
病程(年)	6.19 ± 2.87	6.32 ± 2.79	5.98 ± 2.93
治疗前各指标评分			
Fugl-Meyer 评分	28.8 ± 3.2	29.2 ± 3.4	28.9 ± 3.3
Ashworth 量表			
屈伸肘	3.06 ± 0.42	3.03 ± 0.41	3.04 ± 0.43
前臂旋转	3.12 ± 0.40	3.15 ± 0.42	3.16 ± 0.44
屈伸腕	3.02 ± 0.43	3.06 ± 0.40	3.05 ± 0.42
拇指屈伸	3.08 ± 0.41	3.07 ± 0.41	3.06 ± 0.43
2~5 指屈伸	3.04 ± 0.44	3.05 ± 0.43	3.03 ± 0.45
拇指内收	3.10 ± 0.43	3.11 ± 0.42	3.07 ± 0.44
2~5 指分/并指	3.05 ± 0.45	3.06 ± 0.44	3.02 ± 0.46
关节活动度			
肘关节	101 ± 26	103 ± 11	98 ± 28
前臂旋转	26 ± 32	10 ± 15	29 ± 33
腕关节	30 ± 26	33 ± 8	32 ± 27
Barthel 指数	68.5 ± 4.3	69.2 ± 4.1	68.8 ± 4.2

3.4. 三组患者上肢运动功能改善比较

3.4.1. Fugl-Meyer 评分

分别在患者接受对应手术或正规康复治疗 1 个月、3 个月、6 个月及 12 个月后进行随访并记录 Fugl-Meyer 运动功能评分, 详见表 2。

Table 2. Fugl-Meyer scores at different time periods from baseline to 12 months in the three groups of patients
表 2. 三组患者自基线至 12 个月不同时间段的 Fugl-Meyer 评分

组别	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月
改良手术组(n = 11)	33.8 ± 3.6	40.5 ± 4.2	48.2 ± 4.7	49.5 ± 5.3
传统手术组(n = 15)	34.1 ± 3.6	39.8 ± 4.3	47.5 ± 4.9	46.9 ± 5.5
康复组(n = 21)	30.2 ± 3.3	31.5 ± 3.4	32.8 ± 3.5	31.5 ± 3.6

三组研究对象自基线至治疗后 12 个月的随访过程中, Fugl-Meyer 运动功能评分均呈现不同程度的变

化趋势(见图 4)。总体来看, 两种手术治疗组患者的上肢运动功能均表现出较为明显且持续的改善, 而单纯康复治疗组的功能提升幅度相对有限, 且随访后期存在一定程度的波动。

在改良健侧颈七神经移位术组中, 患者术后上肢运动功能恢复明显, 且随时间呈持续改善趋势。术后 1、3、6 及 12 个月 Fugl-Meyer 评分分别较基线提高 5.0 ± 1.8 、 11.7 ± 2.5 、 19.4 ± 3.1 及 20.7 ± 5.7 分, 组内比较均较基线显著改善($P < 0.05$)。传统健侧颈七神经移位术组亦表现出类似的恢复趋势。术后 1、3、6 及 12 个月评分分别提高 4.9 ± 1.7 、 10.6 ± 2.4 、 18.3 ± 3.3 及 17.7 ± 5.6 分, 组内比较同样均具有统计学意义($P < 0.05$), 提示传统术式亦能有效促进上肢运动功能恢复。组间比较显示, 各时间点传统手术组改善幅度整体略低于改良手术组, 提示改良术式在功能恢复方面可能具有一定优势。

相比之下, 康复治疗组 Fugl-Meyer 评分虽有一定提升, 但改善幅度较小。术后 1、3、6 及 12 个月分别提高 1.3 ± 1.5 、 2.6 ± 1.6 、 3.9 ± 1.7 及 2.6 ± 2.0 分, 仅 6 个月时较基线差异具有统计学意义($P < 0.05$)。其变化趋势显示 6 个月达到峰值, 随后略有回落。进一步组间比较表明, 在各随访时间点, 康复治疗组的改善幅度均显著低于两种手术组($P < 0.05$), 提示单纯康复治疗对慢性期偏瘫患者上肢功能改善的效果相对有限。

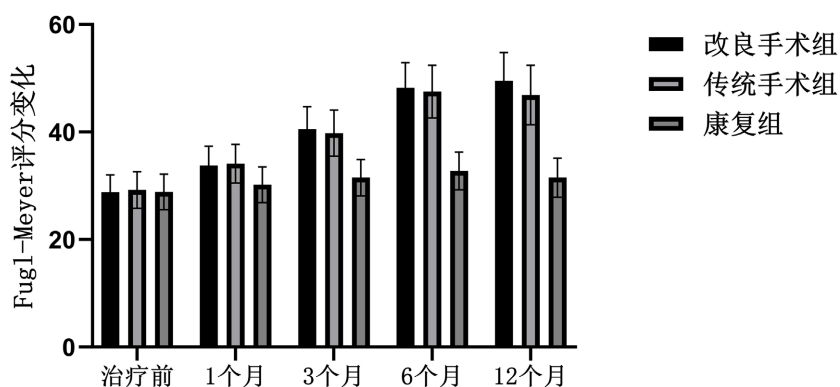


Figure 4. Changes of Fugl-Meyer scores from baseline to 12 months after treatment
图 4. 三组患者自基线至治疗后 12 个月各时间点 Fugl-Meyer 评分变化

3.4.2. Ashworth 量表

于治疗 1、3、6 及 12 个月对患者肌张力进行随访评估, 采用改良 Ashworth 量表评分(见表 3~5)。总体来看, 两手术组术后早期均出现明显肌张力下降, 而康复治疗组亦呈缓慢下降趋势, 但改善幅度相对有限。

Table 3. Ashworth scale scores from baseline to 12 months after operation in modified surgery group
表 3. 改良手术组自基线至术后 12 个月 Ashworth 量表评分

	治疗前	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月
屈伸肘	3.06 ± 0.42	1.10 ± 0.28	1.35 ± 0.30	1.22 ± 0.29	1.15 ± 0.28
前臂旋转	3.12 ± 0.40	1.15 ± 0.29	1.42 ± 0.31	1.30 ± 0.30	1.22 ± 0.29
屈伸腕	3.02 ± 0.43	1.08 ± 0.27	1.33 ± 0.30	1.20 ± 0.29	1.12 ± 0.28
拇指屈伸	3.08 ± 0.41	1.12 ± 0.28	1.40 ± 0.31	1.28 ± 0.30	1.20 ± 0.29
2~5 指屈伸	3.04 ± 0.44	1.10 ± 0.28	1.38 ± 0.31	1.25 ± 0.30	1.18 ± 0.29
拇指对掌	3.10 ± 0.43	1.00 ± 0.25	1.22 ± 0.28	1.12 ± 0.27	1.05 ± 0.26
2~5 指分/并指	3.05 ± 0.45	1.02 ± 0.26	1.25 ± 0.29	1.15 ± 0.28	1.08 ± 0.27

Table 4. Ashworth scale score from baseline to 12 months postoperatively in traditional surgery group
表 4. 传统手术组自基线至术后 12 个月

	治疗前	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月
屈伸肘	3.03 ± 0.41	1.12 ± 0.29	1.36 ± 0.31	1.24 ± 0.30	1.16 ± 0.29
前臂旋转	3.15 ± 0.42	1.18 ± 0.30	1.44 ± 0.32	1.32 ± 0.31	1.24 ± 0.30
屈伸腕	3.06 ± 0.40	1.10 ± 0.28	1.34 ± 0.31	1.22 ± 0.30	1.14 ± 0.29
拇指屈伸	3.07 ± 0.41	1.14 ± 0.29	1.42 ± 0.32	1.30 ± 0.31	1.22 ± 0.30
2~5 指屈伸	3.05 ± 0.43	1.12 ± 0.29	1.40 ± 0.32	1.27 ± 0.31	1.20 ± 0.30
拇指对掌	3.11 ± 0.42	2.70 ± 0.40	2.55 ± 0.39	2.40 ± 0.38	2.30 ± 0.37
2~5 指分/并指	3.06 ± 0.44	2.72 ± 0.41	2.58 ± 0.40	2.43 ± 0.39	2.33 ± 0.38

Table 5. Ashworth scale scores from baseline to 12 months after treatment in rehabilitation group
表 5. 康复组自基线至治疗后 12 个月 Ashworth 量表评分

	治疗前	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月
屈伸肘	3.04 ± 0.43	2.98 ± 0.42	2.92 ± 0.41	2.86 ± 0.40	2.80 ± 0.39
前臂旋转	3.16 ± 0.44	3.10 ± 0.43	3.02 ± 0.42	2.95 ± 0.41	2.88 ± 0.40
屈伸腕	3.05 ± 0.42	2.99 ± 0.41	2.93 ± 0.40	2.87 ± 0.39	2.81 ± 0.38
拇指屈伸	3.06 ± 0.43	3.00 ± 0.42	2.94 ± 0.41	2.88 ± 0.40	2.82 ± 0.39
2~5 指屈伸	3.03 ± 0.45	2.97 ± 0.44	2.91 ± 0.43	2.85 ± 0.42	2.79 ± 0.41
拇指对掌	3.07 ± 0.44	3.01 ± 0.43	2.95 ± 0.42	2.89 ± 0.41	2.83 ± 0.40
2~5 指分/并指	3.02 ± 0.46	2.96 ± 0.45	2.90 ± 0.44	2.84 ± 0.43	2.78 ± 0.42

具体而言, 改良组与传统组在术后 1 个月时各分项 Ashworth 评分均降至最低水平, 提示手术干预可在短期内有效缓解上肢痉挛。至术后 3 个月, 两组评分较 1 个月出现一定回升; 随后在 6 及 12 个月再次逐渐下降, 但 12 个月时评分仍高于或接近术后 1 个月最低值。整体呈现“早期显著下降 - 短期回升 - 中后期缓慢下降并趋于稳定”的变化模式。该趋势在屈伸肘、前臂旋转、屈伸腕、拇指及 2~5 指屈伸等分项中表现一致, 提示手术对痉挛的改善以术后早期最为显著, 随后进入相对平台期。

康复治疗组 Ashworth 评分虽随时间逐渐下降, 但幅度较小, 且整体维持在较高水平, 提示单纯康复治疗对痉挛改善作用有限。组间比较显示, 各随访时间点康复组评分均高于两手术组, 差异具有统计学意义($P < 0.05$), 进一步表明神经转位手术在降低肌张力、缓解痉挛方面优于单纯康复治疗。

进一步按相同时间点对不同治疗分组进行分项比较可见, 在屈伸肘、前臂旋转、屈伸腕、拇指屈伸及 2~5 指屈伸等分项中, 改良手术组与传统手术组在各时间点评分接近, 改善趋势一致, 组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。

在 3 个月时, 随访发现改良手术组手内部肌痉挛改善优于传统手术组(图 5, 图 6)。

为进一步明确两种术式在手内部肌相关痉挛改善方面的差异, 对拇指对掌及第 2~5 指分指/并指两个分项进行了重点比较。结果显示, 改良手术组在上述两项指标上均显著优于传统手术组, 且差异在各随访时间点保持稳定并具有统计学意义($P < 0.05$)。上述结果提示, 相较于传统术式, 改良术式在降低手内部肌痉挛、改善拇指对掌及手指分离相关运动模式方面具有更明显的优势(见图 7)。



a. 患者 1 术前手部痉挛情况; b. 患者 1 术后 3 月手部痉挛情况; c. 患者 2 术前手部痉挛情况; d. 患者 2 术后 3 月手部痉挛情况。

Figure 5. The improvement of hand spasticity before and 3 months after treatment in the modified operation group

图 5. 改良手术组患者治疗前与治疗后 3 个月手部痉挛改善情况



a. 患者 1 术前手部痉挛情况; b. 患者 1 术后 3 月手部痉挛情况; c. 患者 2 术前手部痉挛情况; d. 患者 2 术后 3 月手部痉挛情况。

Figure 6. The improvement of hand spasticity before and 3 months after treatment in the traditional operation group

图 6. 传统手术组患者治疗前与治疗后 3 个月手部痉挛改善情况

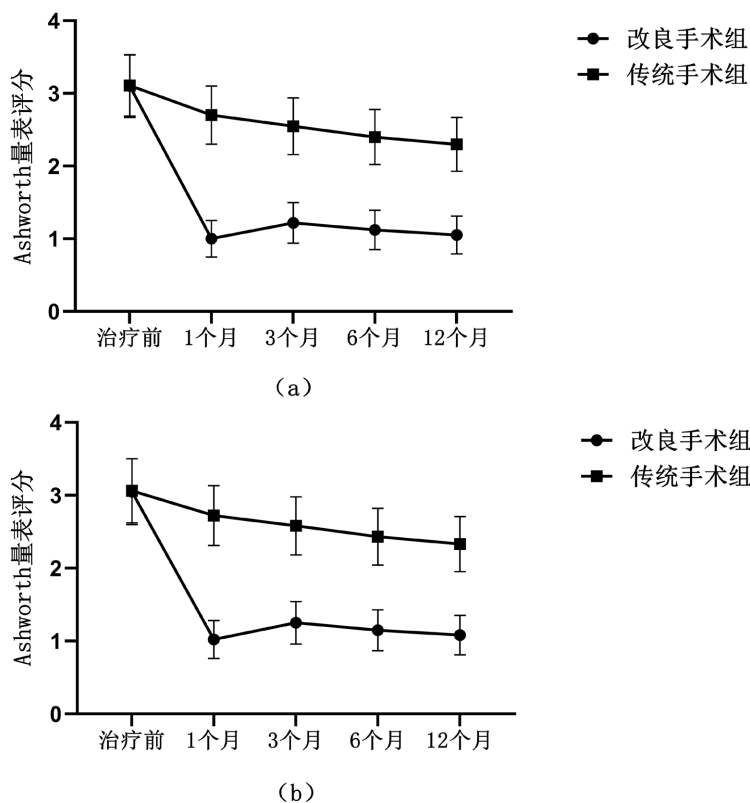


Figure 7. Ashworth scale scores of opposing thumb (a), 2~5 fractional/syndactyly thumb (b) in the modified and traditional surgery groups from baseline to 12 months after treatment

图 7. 改良手术组与传统手术组患者自基线至治疗后 12 个月各时间点拇指对掌(a)、2~5 指分/并指(b) Ashworth 量表评分

综合来看, 两种手术方式均可显著降低中枢神经损伤后上肢痉挛水平, 且效果优于单纯康复治疗; 其中, 改良术式在手内部肌相关痉挛改善方面表现更为突出, 且优势在术后随访过程中具有一定的持续性与稳定性。

3.4.3. 关节活动度

于治疗后 1、3、6 及 12 个月对患者上肢主要关节活动度进行随访评估, 包括肘关节、前臂旋转及腕关节活动度(见表 6)。总体结果显示, 至 12 个月时三组患者关节活动度均较基线有所改善, 两手术组提升更为显著, 而康复治疗组改善相对有限。

Table 6. Increasing degrees of joint range of motion from baseline to 12 months in the three groups of patients

表 6. 三组患者自基线至 12 个月的关节活动度增加度数

	改良手术组	传统手术组	康复组
肘关节	27 ± 17°	25 ± 19°	10 ± 7°
前臂旋转	39 ± 18°	37 ± 19°	21 ± 9°
腕关节	52 ± 20°	50 ± 20°	26 ± 11°

在改良侧颈七神经移位术组与传统手术组中, 各关节活动度均明显增加, 且两组改善幅度整体接近(见图 8), 提示两种术式在改善上肢关节活动范围方面疗效相当, 未见明显组间差异。相比之下, 康复治疗组虽亦有一定改善, 但幅度明显低于手术组, 提示单纯康复治疗在改善中枢神经损伤后关节活动范

围方面效果有限。

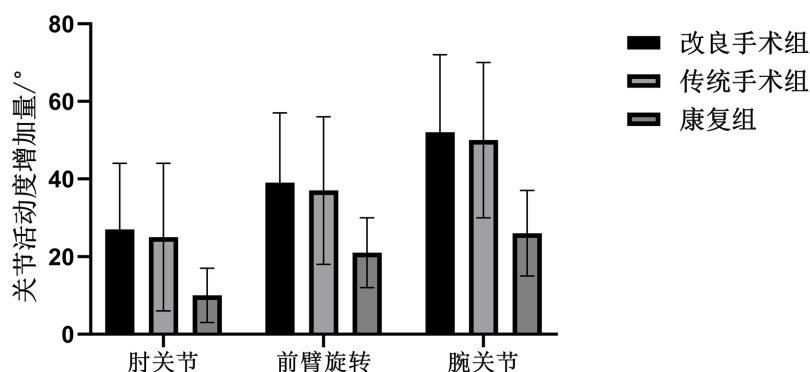


Figure 8. Increases in joint mobility from baseline to 12 months after treatment in three groups

图 8. 三组患者自基线至治疗后 12 个月各关节活动度增加量

此外,两手术组各指标标准差相对较大,提示个体间差异较为明显,部分患者可获得较大幅度改善;而康复组标准差较小,说明其改善幅度整体较低且个体差异相对有限。

3.4.4. Barthel 指数

于治疗后 1、3、6 及 12 个月对患者日常生活活动能力进行随访评估,采用 Barthel 指数进行量化(见表 7)。结果显示,两手术组患者在各随访时间点的 Barthel 指数评分均较基线显著提高($P < 0.05$),提示改良健侧颈七神经移位术与传统术式均可在一定程度上改善患者日常生活自理能力。相比之下,康复治疗组虽亦有一定改善,但整体提升幅度较小,功能恢复相对缓慢。

组间比较显示,在各随访时间点,两手术组的 Barthel 指数评分及改善百分比均显著高于康复组($P < 0.05$),提示神经转位手术在改善日常生活能力方面优于单纯康复治疗(见图 9)。

Table 7. Barthel index of three groups of patients at different time periods from baseline to 12 months

表 7. 三组患者自基线至 12 个月不同时间段的 Barthel 指数

组别	治疗前	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月
改良手术组(n = 11)	68.5 ± 4.3	73.2 ± 4.5	79.8 ± 4.8	85.6 ± 5.1	87.3 ± 5.2
传统手术组(n = 15)	69.2 ± 4.1	73.5 ± 4.4	78.6 ± 4.7	84.2 ± 5.0	85.7 ± 5.1
康复组(n = 21)	68.8 ± 4.2	70.1 ± 4.2	71.5 ± 4.3	72.8 ± 4.4	75.6 ± 4.3

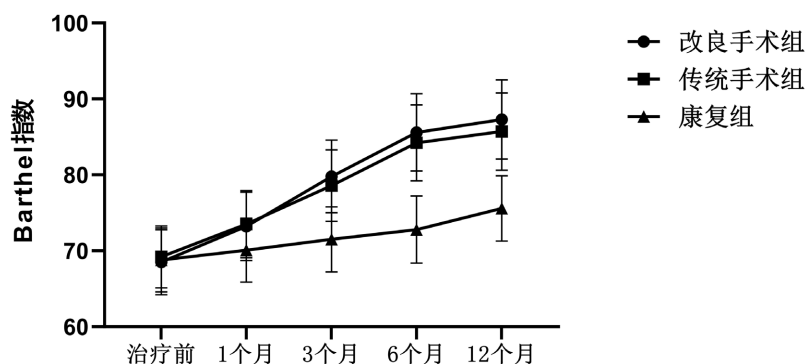


Figure 9. Change of Barthel Index from baseline to 12 months after treatment

图 9. 三组患者自基线至治疗后 12 个月各时间点 Barthel 指数变化

进一步比较两种手术方式发现, 改良手术组与传统手术组在各时间点的 Barthel 指数评分及改善百分比差异均未达到统计学意义($P > 0.05$), 表明两者在总体疗效上相当。但从数值趋势来看, 改良手术组在术后 3~12 个月的评分略高于传统手术组。该差异虽无统计学意义, 但可能与改良术式在缓解手内肌痉挛及改善拇指对掌、手指分离等精细运动功能方面的潜在优势有关, 从而在一定程度上促进日常生活活动能力的提升。

3.4.5. 术后不良反应分析

在术后不良反应的随访观察中, 对接受改良健侧颈七神经转位术及传统健侧颈七神经转位术的患者进行了系统记录与统计分析。改良手术组共纳入 11 例患者, 随访过程中未观察到术后感染病例。具体不良反应情况为: 2 例出现术后出血, 9 例出现不同程度的疼痛, 2 例出现吞咽异物感, 10 例出现健侧肢体肌力下降, 9 例出现肢体感觉减退。传统手术组共 15 例患者, 同样未发生感染病例, 其中 3 例出现术后出血, 12 例出现疼痛, 3 例出现吞咽异物感, 14 例出现健侧肢体肌力下降, 13 例出现肢体感觉减退。进一步随访发现, 各类不良反应大多具有一定的阶段性和可恢复性。其中, 吞咽异物感多出现在术后早期, 所有患者均在术后 1 周内自行缓解或消失。分析其原因, 可能与全身麻醉气管插管过程中对咽喉部的机械刺激, 以及手术过程中神经通过椎前通路时对食管周围组织的短暂刺激有关。术后疼痛主要集中在术后早期阶段, 多为手术创伤及局部组织牵拉所致, 大多数患者在术后 1 个月内逐渐缓解或基本消失。此外, 健侧肢体肌力下降及感觉减退为两组患者中较为常见的不良反应, 该类症状虽然持续时间相对较长, 但整体呈逐渐恢复趋势, 多数患者在术后 3~6 个月内逐步恢复至接近术前水平, 未见永久性功能障碍遗留。

统计学结果显示, 两组患者在各类不良反应发生率方面差异均无统计学意义($P > 0.05$)。具体发生率见图 10。上述结果可见, 改良健侧颈七神经转位术与传统健侧颈七神经转位术在术后不良反应发生情况方面总体相似, 各类不良事件的发生率差异均无统计学意义。改良术式在提高手部功能恢复效果的同时, 并未增加术后并发症或不良反应的发生风险, 与传统术式在临床安全性方面相当。这表明, 改良术式在临床应用中具有一定的安全性与可行性, 但仍需在更大样本量和长期随访中进一步验证。

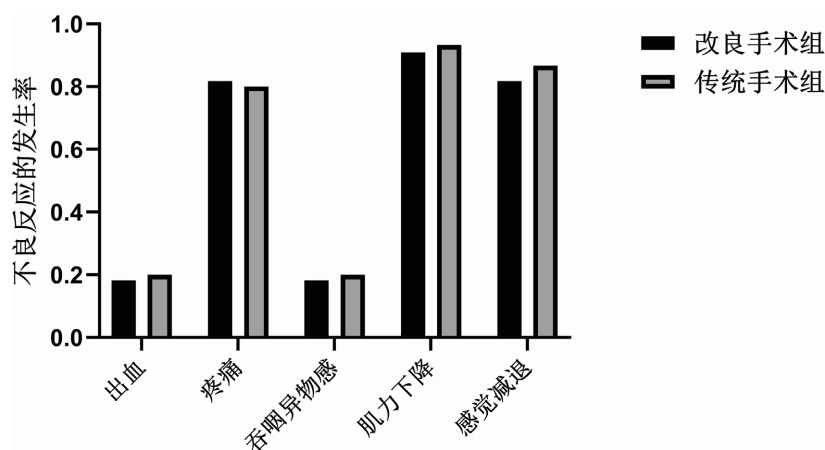


Figure 10. Comparison of the incidence of postoperative adverse reactions between the modified operation group ($n = 11$) and the traditional operation group ($n = 15$)

图 10. 改良手术组($n = 11$)与传统手术组($n = 15$)患者术后发生各项不良反应的发生率比较

4. 讨论

上肢痉挛性偏瘫是中枢神经系统损伤后的严重后遗症, 其高致残特征不仅是神经康复研究的焦点, 亦是导致患者社会功能丧失的关键驱动力。其核心病理生理机制在于下行投射纤维(尤其是锥体束)的结

构性离断[35], 导致脊髓下位运动神经元脱抑制, 触发节段性反射亢进[36], 临床表现为痉挛状态与协调运动丧失。与此同时, 中枢神经系统在损伤后的无序代偿性重塑, 诱发了运动调控网络的二次功能失衡, 这正是临床康复难以取得实质性突破的病理根源[37]。

现有的外周驱动型康复模式虽然利用了神经可塑性原理, 但在逆转中枢调控失衡方面显得力有不逮[38]。这种基于外周干预的局限性, 使得中重度患者难以获得满意的长期预后[39] [40]。针对这一挑战, 本研究在前期动物实验研究的基础上, 将改良健侧 C7 神经转位术应用于临床, 对比不同干预策略的临床转归, 力求为 upper limb 偏瘫的康复治疗提供新的循证医学依据。

研究共纳入 47 例患者进行对照, 在华中科技大学同济医学院附属协和医院手外科共招募了 11 例因中枢神经系统损伤导致 upper limb 痉挛性偏瘫的患者, 进行改良健侧 C7 神经转位手术, 并与同时期行传统手术及康复的患者进行对照。在具体方面, 与传统 C7 神经转位手术的观察一致, 本研究中两组患者均出现了术后疼痛、健侧肢体肌力短期下降及感觉减退等不良反应, 但这些反应均在术后 6 个月内逐渐恢复, 且两组间差异无统计学意义。这可能反映出 C7 神经本身对主要运动与感觉功能的分布较为分散与补偿性强的特征[41], 单纯切断健侧的 C7 神经会导致健肢感觉和运动功能减退, 但不会永久丧失[42]。此外, 改良健侧 C7 神经转位手术需切断部分臂丛下干, 术后随访发现, 这并没有增加术后不良反应发生的概率, 结合 Oberlin 手术, 即在治疗臂丛神经上干根性撕脱伤时, 常常采用尺神经及正中神经部分肌支转至肱二头肌颈肌支以重建屈肘功能, 但对手部功能影响甚微, 说明切断少量高位尺神经和正中神经纤维是可行的[43], 这也与研究结果相符合。

术后 upper limb 功能运动改善的结果显示, 所有接受手术干预的患者(包括改良术式组与传统术式组)在 upper limb 运动能力方面均较单纯康复组表现出显著改善。这一总体趋势与既往大型临床研究报道一致, 即颈 7 神经转位术能够在慢性中枢性痉挛性偏瘫患者中显著提高 upper limb 运动功能评分并降低痉挛程度(例如 Fugl-Meyer 运动评分、改良 Ashworth 评分等)相比于仅康复治疗具有临床优势[44]。

在改良 Ashworth 量表评估结果中, 本研究观察到相关肌群肌张力变化呈现出较为一致的时间动态规律: 术后 1 个月评分明显下降并达到最低水平, 3 个月时出现一定程度回升, 而在术后 6~12 个月期间, 评分再次逐渐下降并趋于稳定。这种“早期下降-短期回升-中后期再次下降并趋于稳定”的肌张力变化趋势, 可能反映了神经转位术后不同阶段的神经生理过程。神经转位术后肌张力的变化并非单一方向的持续下降, 而是受到多种神经生理因素共同作用的动态过程。术后早期肌张力的明显下降, 可能与外周神经暂时性失神经支配有关。在传统术式中, 切断患侧 C7 神经根, 而在改良术式中, 除了 C7 神经根外, 还涉及部分下干神经纤维。这些操作可能使部分肌群在术后早期出现暂时性失神经支配或异常传入输入减少, 从而减弱脊髓牵张反射弧的兴奋性, 导致肌张力在短期内明显下降[45]。然而, 在术后中期, 肌张力的回升可能与神经系统的早期适应性变化及脊髓反射的调节重建相关。中枢神经损伤后的痉挛并非单纯由神经支配减少所致, 而是与脊髓水平兴奋性增强及异常神经可塑性密切相关[46]。上运动神经元损伤后, 由于抑制性下行通路减少, 脊髓牵张反射弧易化、运动神经元兴奋性增强, 从而逐渐恢复或增强肌张力[47]。这一过程反映了神经系统的重塑和对损伤的适应, 短暂失神经支配状态逐渐被周围神经及脊髓反射系统的代偿性调节所部分替代时, 肌张力出现一定程度回升。随着术后时间延长, 肌张力再次逐渐下降, 则可能与神经再生及中枢神经重塑过程密切相关。研究表明, 在对侧 C7 神经转位术后, 移位神经纤维可逐渐向远端生长并重新建立对患侧肌肉的神经支配, 同时中枢神经系统会发生功能性重组, 从而形成新的运动控制通路[21][48]。这一过程中, 对侧大脑半球通过新的神经通路参与患侧肢体运动控制, 有助于改善肌张力异常和运动控制能力。对于改良术式而言, 其在神经重塑过程中的潜在优势可能体现在以下几个方面: 首先, 改良术式通过同时涉及 C7 神经根和部分下干神经纤维, 可能为受损肌群提供更多的神经支配来源, 这有助于弥补术后初期暂时性失神经支配带来的影响, 进而促进肌张力的恢复。

其次, 改良术式可能更有利于中枢神经系统的功能重组, 尤其是在脊髓层面的反射调节重建。随着术后时间的延长, 改良术式可能为患者提供更加稳定的神经重塑支持, 进而有助于肌张力的长期改善。

值得注意的是, 在本研究中改良手术组在影响拇指对掌、2~5 指并指等功能的手内部肌的肌张力(改良 Ashworth 量表)方面的改善程度优于传统手术组。这一结果提示改良术式在降低手部肌肉痉挛程度及促进精细运动恢复方面具有更明显的优势, 而这可能与其对患肢运动神经通路重构的特点相关。从神经解剖与生理机制角度分析, 改良术式通过同时利用来自桡神经路径(主要受 C7 神经贡献)和尺神经路径(臂丛神经下干的部分纤维)两条主要运动支配通路, 有望在患侧上肢建立更为复杂、协同的外周运动输入, 使运动皮层能够同时接收多源反馈信号, 从而促进运动控制模式的整合与再学习。这样的机制符合神经可塑性理论, 即多通路运动反馈可增强大脑的运动重建与皮层参与[49]。此外, 改良术式导致的手部肌张力显著下降(即改良 Ashworth 评分降低)也提示可能存在对脊髓水平抑制性中间神经环路的影响。近年来的研究表明, 中枢痉挛性的主要病理是上位运动神经元对下位脊髓回路的抑制丧失, 导致 Ia 类传入纤维对 α/γ 运动神经元的反射激活增强[50][51]。因此, 通过改变传入运动信号的模式, 改良术式可能对痉挛反射弧产生更有效的调控, 从而减少异常反射环路的激活, 进而降低肌张力。相比之下, 传统术式仅切断患侧 C7 神经能够暂时降低 γ 运动神经元的兴奋性[52], 但因邻近神经(如臂丛神经下干)部分功能的代偿性增强, 可能通过 Ia 类传入纤维重新激活痉挛环路而限制了对肌张力的持续抑制效果[53][54]。因此, 传统术式对精细手部运动功能的改善可能不如改良术式明显, 尤其是在反射调控和运动协调性重建方面。

虽然手术组在术后早期上肢相关肌群的肌张力明显下降, 但上肢运动功能评分及日常生活活动能力并未立即出现同步改善。这一现象提示, 肌张力的改善并不必然立即转化为功能恢复, 其原因可能与肌力不足及神经肌肉控制尚未恢复有关。实际上, 在中枢神经系统损伤后, 患者常同时存在痉挛与肌力下降, 两者共同构成所谓的“痉挛性瘫痪”, 而其中肌力下降往往是影响运动功能的主要因素[55]。研究表明, 在慢性卒中患者中, 肌力不足对运动功能受限的贡献往往大于肌张力异常本身, 因此即使痉挛得到一定程度缓解, 若肌力及主动运动控制能力尚未恢复, 患者的功能改善仍可能较为有限。这种肌张力下降而功能恢复滞后现象, 可能反映了中枢性偏瘫患者在恢复过程中的典型神经生理特征, 即痉挛缓解、肌力恢复和运动控制重建并非同步发生[56]。肌张力改善为后续功能恢复创造了有利条件, 但真正的运动能力提升仍依赖于肌力恢复、神经再支配以及长期康复训练的共同作用。

在术后随访过程中, 患者的上肢运动功能均出现不同程度的改善。然而中枢神经损伤往往不仅限于上肢功能障碍, 也可能累及下肢运动系统, 研究观察到部分患者出现了下肢功能的轻微改善, 表现为跛行程度的减轻。这一现象提示, 神经转位不仅促进了患肢局部功能的恢复, 还可能引发更广泛的中枢运动控制系统的可塑性重组[57]。这种内外结合的可塑性机制, 为术后运动功能的整体改善提供了神经生理学基础。然而, 这一机制仍需要通过更多基于功能磁共振成像(fMRI)、扩散张量成像(DTI)等影像技术的前瞻性研究进行进一步探索与实证验证[58]。

5. 结论

本研究通过临床对照实验, 探讨了改良健侧 C7 神经转位手术在治疗中枢神经损伤后上肢痉挛性偏瘫中的安全性和有效性。研究结果表明, 改良手术显著提高了患者患肢运动功能, 尤其在手内部肌肉肌张力的改善及手指精细运动的恢复方面, 改良手术显示出优于传统干预方式的效果。这些发现为中枢神经损伤患者的治疗提供了新的循证医学依据, 并为临床实践中治疗痉挛性偏瘫提供了更多的选择。

6. 局限

本研究为单中心、小样本的回顾性研究, 结果解读需谨慎。有限的样本量可能降低统计效能并影响

结果的外推性; 单中心来源亦可能受特定诊疗模式及患者选择影响, 从而限制结论的普适性。此外, 回顾性设计依赖既往资料, 存在数据缺失、选择偏倚及混杂因素控制不足等问题, 因而本研究结果主要反映相关性。另一方面, 随访时间较短, 尚不足以全面评估远期疗效及长期安全性。未来研究应开展多中心、大样本的前瞻性研究, 必要时采用随机对照试验设计, 以提高证据强度; 同时结合不同临床分型及损伤特征进行分层分析, 并延长随访时间, 从而更全面评估疗效与安全性, 进一步优化手术及康复策略, 实现个体化治疗。

参考文献

- [1] Finch-Edmondson, M., Morgan, C., Hunt, R.W. and Novak, I. (2019) Emergent Prophylactic, Reparative and Restorative Brain Interventions for Infants Born Preterm with Cerebral Palsy. *Frontiers in Physiology*, **10**, Article 15. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00015>
- [2] Dodd, K.C., Nair, V.A. and Prabhakaran, V. (2017) Role of the Contralateral vs. Ipsilateral Hemisphere in Stroke Recovery. *Frontiers in Human Neuroscience*, **11**, Article 469. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00469>
- [3] O'Flaherty, D. and Ali, K. (2024) Recommendations for Upper Limb Motor Recovery: An Overview of the UK and European Rehabilitation after Stroke Guidelines (2023). *Healthcare*, **12**, Article 1433. <https://doi.org/10.3390/healthcare12141433>
- [4] Kelly Serqueira Macedo, A., Brandão Amorim, P., Pinheiro Denardi, I., Bertolácio Fernandes, J. and Storari Mourão, R. (2023) Study of the Performance of Activities of Daily Living (ADLs) by Patients with Stroke Sequelae. *International Seven Journal of Health Research*, **2**, 692-705. <https://doi.org/10.56238/isevjhv2n4-020>
- [5] Maggio, M.G., Corallo, F., De Francesco, M., De Cola, M.C., De Luca, R., Manuli, A., et al. (2024) Understanding the Family Burden and Caregiver Role in Stroke Rehabilitation: Insights from a Retrospective Study. *Neurological Sciences*, **45**, 5347-5353. <https://doi.org/10.1007/s10072-024-07668-5>
- [6] Kolmos, M., Munoz-Novoa, M., Sunnerhagen, K., Alt Murphy, M. and Kruuse, C. (2025) Upper-Extremity Motor Recovery after Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis of Usual Care in Trials and Observational Studies. *Journal of the Neurological Sciences*, **468**, Article ID: 123341. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2024.123341>
- [7] Chen, B., Yang, T., Liao, Z., Sun, F., Mei, Z. and Zhang, W. (2025) Pathophysiology and Management Strategies for Post-Stroke Spasticity: An Update Review. *International Journal of Molecular Sciences*, **26**, Article 406. <https://doi.org/10.3390/ijms26010406>
- [8] Marek, K., Redlicka, J., Miller, E. and Zubrycki, I. (2023) Objectivizing Measures of Post-Stroke Hand Rehabilitation through Multi-Disciplinary Scales. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 7497. <https://doi.org/10.3390/jcm12237497>
- [9] Huang, J., Ji, J., Liang, C., Zhang, Y., Sun, H., Yan, Y., et al. (2022) Effects of Physical Therapy-Based Rehabilitation on Recovery of Upper Limb Motor Function after Stroke in Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Annals of Palliative Medicine*, **11**, 521-531. <https://doi.org/10.21037/apm-21-3710>
- [10] Boardsworth, K., Rashid, U., Olsen, S., Rodriguez-Ramirez, E., Browne, W., Alder, G., et al. (2025) Upper Limb Robotic Rehabilitation Following Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis Investigating Efficacy and the Influence of Device Features and Program Parameters. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **22**, Article No. 164. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01662-4>
- [11] Verschure, P.F.M.J., Páscoa dos Santos, F. and Sharma, V. (2023) Redefining Stroke Rehabilitation: Mobilizing the Embodied Goal-Oriented Brain. *Current Opinion in Neurobiology*, **83**, Article ID: 102807. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2023.102807>
- [12] Lance, J.W. (1980) The Control of Muscle Tone, Reflexes, and Movement: Robert Wartenberg Lecture. *Neurology*, **30**, 1303-1303. <https://doi.org/10.1212/wnl.30.12.1303>
- [13] Mukherjee, A. and Chakravarty, A. (2010) Spasticity Mechanisms—For the Clinician. *Frontiers in Neurology*, **1**, Article 149. <https://doi.org/10.3389/fneur.2010.00149>
- [14] Kheder, A. and Nair, K.P.S. (2012) Spasticity: Pathophysiology, Evaluation and Management. *Practical Neurology*, **12**, 289-298. <https://doi.org/10.1136/practneurol-2011-000155>
- [15] Pandyan, A., Gregoric, M., Barnes, M., Wood, D., Wijck, F.V., Burridge, J., et al. (2005) Spasticity: Clinical Perceptions, Neurological Realities and Meaningful Measurement. *Disability and Rehabilitation*, **27**, 2-6. <https://doi.org/10.1080/09638280400014576>
- [16] Sangari, S. and Perez, M.A. (2019) Imbalanced Corticospinal and Reticulospinal Contributions to Spasticity in Humans with Spinal Cord Injury. *The Journal of Neuroscience*, **39**, 7872-7881. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1106-19.2019>

- [17] Gao, Z., Pang, Z., Chen, Y., Lei, G., Zhu, S., Li, G., *et al.* (2022) Restoring after Central Nervous System Injuries: Neural Mechanisms and Translational Applications of Motor Recovery. *Neuroscience Bulletin*, **38**, 1569-1587. <https://doi.org/10.1007/s12264-022-00959-x>
- [18] Ziemann, U., Ishii, K., Borgheresi, A., Yaseen, Z., Battaglia, F., Hallett, M., *et al.* (1999) Dissociation of the Pathways Mediating Ipsilateral and Contralateral Motor-Evoked Potentials in Human Hand and Arm Muscles. *The Journal of Physiology*, **518**, 895-906. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1999.0895p.x>
- [19] Jankowska, E. and Edgley, S.A. (2006) How Can Corticospinal Tract Neurons Contribute to Ipsilateral Movements? A Question with Implications for Recovery of Motor Functions. *The Neuroscientist*, **12**, 67-79. <https://doi.org/10.1177/1073858405283392>
- [20] Gu, Y., Zhang, G., Chen, D., Yan, J., Cheng, X. and Chen, L. (1992) Seventh Cervical Nerve Root Transfer from the Contralateral Healthy Side for Treatment of Brachial Plexus Root Avulsion. *Journal of Hand Surgery*, **17**, 518-521. [https://doi.org/10.1016/s0266-7681\(05\)80235-9](https://doi.org/10.1016/s0266-7681(05)80235-9)
- [21] Zheng, M., Hua, X., Feng, J., Li, T., Lu, Y., Shen, Y., *et al.* (2018) Trial of Contralateral Seventh Cervical Nerve Transfer for Spastic Arm Paralysis. *New England Journal of Medicine*, **378**, 22-34. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1615208>
- [22] Lotze, M., Markert, J., Sauseng, P., Hoppe, J., Plewnia, C. and Gerloff, C. (2006) The Role of Multiple Contralesional Motor Areas for Complex Hand Movements after Internal Capsular Lesion. *The Journal of Neuroscience*, **26**, 6096-6102. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4564-05.2006>
- [23] Xu, W., Hua, X., Zheng, M., Xu, J. and Gu, Y. (2011) Contralateral C7 Nerve Root Transfer in Treatment of Cerebral Palsy in a Child: Case Report. *Microsurgery*, **31**, 404-408. <https://doi.org/10.1002/micr.20877>
- [24] Hua, X., Qiu, Y., Li, T., Zheng, M., Shen, Y., Jiang, S., *et al.* (2015) Contralateral Peripheral Neurotization for Hemiplegic Upper Extremity after Central Neurologic Injury. *Neurosurgery*, **76**, 187-195. <https://doi.org/10.1227/neu.0000000000000590>
- [25] 王启东, 符梅, 刘明冲, 等. 健侧 C7 神经移位术治疗臂丛神经损伤的临床应用和研究进展[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2022, 37(9): 967-970.
- [26] Gilbert, A., Pivato, G. and Kheiralla, T. (2006) Long-term Results of Primary Repair of Brachial Plexus Lesions in Children. *Microsurgery*, **26**, 334-342. <https://doi.org/10.1002/micr.20248>
- [27] Gu, Y., Xu, J., Chen, L., Wang, H. and Hu, S. (2002) Long Term Outcome of Contralateral C7 Transfer: A Report of 32 Cases. *Chinese Medical Journal*, **115**, 866-868.
- [28] Liu, Y., Yu, H., Liu, J. and Lao, J. (2025) Outcome of CC7 Transfer to Median Nerve and Deep Branch of Ulnar Nerve for Patients with Global Brachial Plexus Avulsion. *Frontiers in Medicine*, **12**, Article 1604280. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1604280>
- [29] Guo, J., Zhao, X., Lao, J. and Gao, K. (2025) Contralateral C7 Nerve Transfer to Three Recipient Nerves—An Optional Surgical Method in Total Brachial Plexus Avulsion Combined with Accessory and Phrenic Nerve Injury. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, **102**, 355-362. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2025.01.077>
- [30] Zhu, S., Ye, X., Feng, J.-T., *et al.* (2024) Cadaveric Feasibility Study on Modified Contralateral C7 Nerve Transfer for Targeted Recovery in Hemiplegic Arms. *Plastic and Reconstructive Surgery*, **154**, 802-810. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000001178>
- [31] Gu, Y. and Shen, L. (1994) Electrophysiological Changes after Severance of the C7 Nerve Root. *Journal of Hand Surgery*, **19**, 69-71. [https://doi.org/10.1016/0266-7681\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0266-7681(94)90053-1)
- [32] Li, H., Chen, J., Wang, J., Zhang, T. and Chen, Z. (2023) Review of Rehabilitation Protocols for Brachial Plexus Injury. *Frontiers in Neurology*, **14**, Article 1084223. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1084223>
- [33] Acharya, A.M., Hegde, N. and Bhat, A.K. (2025) The Recovery and Independence of Elbow Flexion and Forearm Supination after Oberlin II Transfer in Brachial Plexus Injuries: A Long Term Follows up Study. *Musculoskeletal Surgery*, **109**, 97-106. <https://doi.org/10.1007/s12306-024-00863-9>
- [34] Vernon Lee, C.Y., Cochrane, E., Chew, M., Bains, R.D., Bourke, G. and Wade, R.G. (2023) The Effectiveness of Different Nerve Transfers in the Restoration of Elbow Flexion in Adults Following Brachial Plexus Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis. *The Journal of Hand Surgery*, **48**, 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2022.11.013>
- [35] Huang, L., Yi, L., Huang, H., Zhan, S., Chen, R. and Yue, Z. (2024) Corticospinal Tract: A New Hope for the Treatment of Post-Stroke Spasticity. *Acta Neurologica Belgica*, **124**, 25-36. <https://doi.org/10.1007/s13760-023-02377-w>
- [36] Wissel, J. and Hernandez Franco, J. (2024) Changing the View on Spastic Movement Disorder Management to Improve Active Movement Competence in the Upper Motor Neuron Syndrome: A Clinical Perspective. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article 1463292. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1463292>
- [37] Tranchida, G.V. and Van Heest, A. (2020) Preferred Options and Evidence for Upper Limb Surgery for Spasticity in Cerebral Palsy, Stroke, and Brain Injury. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, **45**, 34-42.

- <https://doi.org/10.1177/1753193419878973>
- [38] Jia, J. (2022) Exploration on Neurobiological Mechanisms of the Central-Peripheral-Central Closed-Loop Rehabilitation. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, **16**, Article 982881. <https://doi.org/10.3389/fncel.2022.982881>
- [39] 徐硕, 贾杰. “中枢-外周-中枢”闭环康复[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(10): 1537-1541.
- [40] Raffin, E. and Hummel, F.C. (2018) Restoring Motor Functions after Stroke: Multiple Approaches and Opportunities. *The Neuroscientist*, **24**, 400-416. <https://doi.org/10.1177/1073858417737486>
- [41] Li, R., Machol, J.A., Liu, X., Hettinger, P.C., Flugstad, N.A., Yan, J., et al. (2014) C7 Nerve Root Sensory Distribution in Peripheral Nerves: A Bold Functional Magnetic Resonance Imaging Investigation at 9.4 T. *Muscle & Nerve*, **49**, 40-46. <https://doi.org/10.1002/mus.23864>
- [42] Luo, W., Yan, Z., Guo, Y., Xu, J. and Zhang, H. (2023) Contralateral Seventh Cervical Nerve Transfer for Central Spastic Arm Paralysis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Neurology*, **14**, Article 1113254. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1113254>
- [43] Siqueira, M.G., Socolovsky, M., Heise, C.O., Martins, R.S. and Di Masi, G. (2012) Efficacy and Safety of Oberlin's Procedure in the Treatment of Brachial Plexus Birth Palsy. *Neurosurgery*, **71**, 1156-1161. <https://doi.org/10.1227/neu.0b013e318271ee4a>
- [44] 杜洪澎, 李明远, 高晓宁. 健侧颈7神经移位术治疗中枢性上肢痉挛性偏瘫的初步临床观察[J]. 中华神经外科杂志, 2021, 37(2): 164-168.
- [45] Sheean, G. (2002) The Pathophysiology of Spasticity. *European Journal of Neurology*, **9**, 3-9. <https://doi.org/10.1046/j.1468-1331.2002.0090s1003.x>
- [46] Trompetto, C., Marinelli, L., Mori, L., Pelosin, E., Currà, A., Molfetta, L., et al. (2014) Pathophysiology of Spasticity: Implications for Neurorehabilitation. *BioMed Research International*, **2014**, Article ID: 354906. <https://doi.org/10.1155/2014/354906>
- [47] Li, S. and Francisco, G.E. (2015) New Insights into the Pathophysiology of Post-Stroke Spasticity. *Frontiers in Human Neuroscience*, **9**, Article 192. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00192>
- [48] Beaulieu, J., Blustajn, J., Teboul, F., Baud, P., De Schonen, S., Thiebaud, J., et al. (2006) Cerebral Plasticity in Crossed C7 Grafts of the Brachial Plexus: An fMRI Study. *Microsurgery*, **26**, 303-310. <https://doi.org/10.1002/micr.20243>
- [49] Bai, Y., Han, S., Guan, J., Lin, J., Zhao, M. and Liang, G. (2022) Contralateral C7 Nerve Transfer in the Treatment of Upper-Extremity Paralysis: A Review of Anatomical Basis, Surgical Approaches, and Neurobiological Mechanisms. *Reviews in the Neurosciences*, **33**, 491-514. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2021-0122>
- [50] Agarwal, P., Jana, S., Sharma, D., Parihar, V., Bajaj, J., Yadav, Y.R., et al. (2023) Seventh Cervical Nerve (C7) Transection for Spastic Arm Paralysis after Cerebral Injury. *Operative Neurosurgery*, **24**, 256-261. <https://doi.org/10.1227/ons.0000000000000521>
- [51] Jiang, A., Yan, L., Li, Z., Zhao, C., Fang, J., Fan, J., et al. (2026) Contralateral C7 Nerve Transfer Combined with Human Acellular Nerve Allograft as a Viable Strategy for Spastic Upper Limb Paralysis. *European Journal of Medical Research*, **31**, Article No. 310. <https://doi.org/10.1186/s40001-025-03770-2>
- [52] Feng, J., Li, T., Lv, M., Kim, S., Shin, J., Zhao, N., et al. (2022) Reconstruction of Paralyzed Arm Function in Patients with Hemiplegia through Contralateral Seventh Cervical Nerve Cross Transfer: A Multicenter Study and Real-World Practice Guidance. *eClinicalMedicine*, **43**, Article ID: 101258. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.101258>
- [53] 李欢欢, 武亮, 范维娇, 等. 卒中后痉挛神经电生理改变的研究进展[J]. 中国老年保健医学, 2023, 21(5): 14-17.
- [54] Guan, J., Lin, J., Guan, X., Jin, Q. and Zhang, W. (2021) Contralateral C7 Nerve Transfer through Posterior Vertebral Approach Combined with Selective Posterior Rhizotomy of the Affected Cervical Nerve in the Treatment of Central Upper Limb Spastic Paralysis: A Case Report. *Medicine*, **100**, e25061. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000025061>
- [55] Dietz, V. and Sinkjaer, T. (2007) Spastic Movement Disorder: Impaired Reflex Function and Altered Muscle Mechanics. *The Lancet Neurology*, **6**, 725-733. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(07\)70193-x](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(07)70193-x)
- [56] Gracies, J., Alter, K.E., Biering-Sørensen, B., Dewald, J.P.A., Dressler, D., Esquenazi, A., et al. (2025) Spastic Paresis: A Treatable Movement Disorder. *Movement Disorders*, **40**, 44-50. <https://doi.org/10.1002/mds.30038>
- [57] Zhang, Y., Liu, H., Wang, L., Yang, J., Yan, R., Zhang, J., et al. (2016) Relationship between Functional Connectivity and Motor Function Assessment in Stroke Patients with Hemiplegia: A Resting-State Functional MRI Study. *Neuroradiology*, **58**, 503-511. <https://doi.org/10.1007/s00234-016-1646-5>
- [58] Yang, Y., Li, T., Deng, Y., Wang, J., Li, Y., Liu, H., et al. (2024) Dynamic Alternations of Interhemispheric Functional Connectivity in Brachial Plexus Avulsion Injury Patients with Nerve Transfer: A Resting State fMRI Study. *Cerebral Cortex*, **34**, bhad415. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad415>