

• 临床论著 •

基于无标记运动捕捉技术探讨太极拳联合上肢康复训练对脑卒中后患者双手协调运动学特征的影响

谢秋蓉^{1,2}, 张琪^{1,2}, 盛博³, 王晓玲^{1,2}, 罗佳^{1,2}, 张彦新⁴, 黄佳^{1,2*}

1 福建中医药大学康复医学院, 福建 福州 350122;

2 福建中医药大学康复产业研究院, 福建 福州 350122;

3 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;

4 奥克兰大学运动科学系, 新西兰 奥克兰 1142

* 通信作者: 黄佳, E-mail: jasmine1874@163.com

收稿日期: 2025-01-20; 接受日期: 2025-07-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(82305357); 福建省自然科学基金项目(2025J01948)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.07002

摘要 **目的** 基于无标记运动捕捉技术探讨太极拳联合上肢康复训练对脑卒中后患者双手协调运动学特征的影响。**方法** 选取2022年3月—2024年1月在福建中医药大学附属康复医院就诊的脑卒中患者84例。采用随机数字表法分为对照组和太极拳组, 每组42例。研究过程中对照组脱落6例, 太极拳组脱落8例, 最终对照组和太极拳组分别纳入36例和34例。2组均接受上肢康复训练, 每天1次, 每次持续60 min, 每周5 d, 持续干预4周; 太极拳组在上肢康复训练的基础上, 进行太极拳训练, 每天1次, 每次60 min, 每周5 d, 持续干预4周。本研究采用2套 Microsoft Azure Kinect 深度传感器硬件设备以及 iPi Soft Motion Capture 软件, 基于深度学习骨架追踪算法以 30 Hz 的采样率收集运动学数据, 最后依托定制化的系统进行数据管理和分析。采用双臂对称性协调任务从任务总运动时间(MT)、右手转移时间、左手转移时间、标准化“到达-拿起”时间系数(RTP)和转移协调系数(TC)这5个维度对2组双侧上肢协同运动能力进行评估。采用双臂不对称性协调任务从按压手运动时间、抽屈手运动时间、标准化开始同步系数(nOSc)和标准化拉压时间系数(nPT-Pc)这4个维度对2组双侧上肢执行非镜像运动能力进行评估。**结果** 与治疗前比较, 2组治疗后MT、右手转移时间均减少($P < 0.05$), RTP、TC值均减小($P < 0.05$), 太极拳组左手转移时间减少($P < 0.05$); 与对照组比较, 太极拳组治疗后MT减少($P < 0.05$), TC值减小($P < 0.05$), 右手转移时间、左手转移时间及RTP值差异均无统计学意义($P > 0.05$)。与治疗前比较, 2组治疗后按压手运动时间、抽屈手运动时间均减少($P < 0.05$), nOSc、nPT-Pc值均减小($P < 0.05$); 与对照组比较, 太极拳组按压手运动时间、抽屈手运动时间、nOSc、nPT-Pc值差异均无统计学意义($P > 0.05$)。**结论** 基于无标记运动捕捉技术观察发现, 太极拳联合上肢康复训练可改善脑卒中后双手协调性。

关键词 脑卒中; 太极拳; 无标记动作捕捉技术; 双手协调; 运动学分析

脑卒中常导致上肢偏瘫, 削弱患者患侧手臂的运动和感觉功能, 也影响健侧手臂的协调性, 严重妨碍日常活动及精细操作能力^[1]。即使是运动功能保留较好的患者, 在执行手动任务时, 其双手协调

和精细运动灵巧性仍存在较大挑战, 这种持续存在的功能缺陷凸显了恢复上述能力对提升功能独立性的关键作用^[2]。因此, 康复策略必须系统纳入双侧协调训练, 以促进更有效的上肢运动功能恢复。

引用格式: 谢秋蓉, 张琪, 盛博, 等. 基于无标记运动捕捉技术探讨太极拳联合上肢康复训练对脑卒中后患者双手协调运动学特征的影响[J]. 康复学报, 2026, 36(7): 473-482.

XIE Q R, ZHANG Q, SHENG B, et al. Effects of Tai Chi combined with upper limb rehabilitation training on bimanual coordination kinematic characteristics in post-stroke patients: a markerless motion capture-based analysis [J]. Rehabil Med, 2026, 36(7): 473-482.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.07002

©《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

双手协调在拍手、使用餐具或驾驶等日常任务中发挥关键作用。然而,由于运动控制障碍和习惯性废用,脑卒中患者往往表现出明显的双手使用的不对称模式^[3]。双侧训练通过同步强化患侧与健侧手臂的协调配合,在脑卒中后上肢功能障碍康复中展现出重要价值,并能有效改善运动功能恢复效果^[4]。相较于单侧训练,双侧训练在提升患者上肢运动功能恢复方面优势更为明显^[5]。治疗后双侧训练组Fugl-Meyer上肢运动功能评估量表(Fugl-Meyer Assessment for Upper Extremity, FMA-UE)和改良Barthel指数(modified Barthel index, MBI)评分均显著高于对照组,从而证实了其临床优越性^[6]。基于此,双侧上肢训练已成为脑卒中后上肢康复的研究热点,对改善患者日常生活活动能力和生活质量具有积极意义。

太极拳的运动模式涵盖单侧、双侧对称和不对称动作,其理念与双侧训练高度契合。该运动凭借缓慢而有控制的动作,使练习者细致感知肌肉紧张与放松变化,从而显著提升身体感知能力、协调性和稳定性。这种训练不仅能强化神经系统与肌肉之间的沟通,还能增强中枢神经系统的控制能力,并且对脑卒中患者的双手协调性障碍具有显著的改善作用,进而促进运动控制和日常功能恢复^[7]。然而,目前关于太极拳改善脑卒中患者双手协调能力的研究较为有限,这一领域亟待深入研究。

无标记运动捕捉技术近年来在康复评估领域得到广泛应用。该技术无需在受试者体表粘贴物理标记或佩戴外部传感器,即可通过深度摄像头与机器学习算法实时捕获人体运动学数据,有效避免了传统标记系统可能引发的标记脱落、皮肤伪迹及受试者不适等局限。相较于依赖主观报告的传统量表评估,无标记运动捕捉技术能够客观、定量地反映患者的运动模式特征,为脑卒中后上肢功能评估提供了更为精准的测量手段。

Microsoft Azure Kinect是常用的无标记运动捕捉设备之一,因此,本研究选用其用于数据采集。该设备作为一款便携式深度相机,依托内置的红外深度传感器与机器学习算法,可在无需物理标记及外部传感器的条件下精确分析日常动作特征,提供精度达10~15 mm的三维解剖骨骼地标位置信息,已广泛应用于脑卒中患者上肢运动功能的研究,助力于康复进程的评估。已有研究显示,Microsoft Azure Kinect所获数据与Vicon运动分析系统的一致

性达0.65~0.99,具有较高的可靠性^[8]。此外,该设备在精确测量动态手腕和前臂关节活动角度方面的有效性,也为客观评估患者上肢运动功能变化提供了数据支持^[9]。

基于以上背景,本研究旨在运用Microsoft Azure Kinect定量评估脑卒中患者的双手协调功能,并探讨太极拳结合常规康复训练对改善上述功能的效果,以期脑卒中后双手协调功能障碍的临床评估与康复干预提供科学依据,进而改善脑卒中患者的生活质量。同时,本研究通过Microsoft Azure Kinect分析太极拳干预对脑卒中患者上肢运动功能参数的影响,旨在填补当前关于太极拳训练能否提升脑卒中患者在双手协同任务中协调性的研究空白,为脑卒中康复领域提供新的视角和方法。

1 临床资料

1.1 病例选择标准

1.1.1 诊断标准 符合《中国各类主要脑血管病诊断要点2019》^[10]中关于脑卒中的诊断标准。

1.1.2 纳入标准 ① 年龄18~70岁;② 生命体征稳定,能够配合完成评估和治疗;③ 患侧上肢的Brunnstrom分期为Ⅲ~Ⅴ期;④ 可独立站立1 h;⑤ 简易精神状态检查(mini-mental state examination, MMSE)≥24分,患者能理解并跟随指令完成康复评估和训练;⑥ 患者自愿参与研究并已签署知情同意书。

1.1.3 排除标准 ① 合并其他神经系统疾病,如帕金森病、认知功能障碍等;② 合并严重器质性疾病(心功能Ⅲ~Ⅳ级、肝肾功能不全等);③ 存在运动禁忌证,如急性骨折未愈合、近期关节手术史、严重骨质疏松或未控制的关节急性炎症等;④ 近3个月内参与过其他干预性研究;⑤ 精神障碍或认知功能障碍无法配合完成康复评估和训练;⑥ 研究者判断不宜入组的其他情况。

1.2 一般资料

本研究样本量通过GPower 3.1软件计算确定。基于先前研究^[11],以FMA-UE评分作为主要结局指标。对照组和太极拳组干预后FMA-UE评分分别为(51.09±14.83)、(37.36±17.92)分,将上述2个指标输入样本量计算软件GPower 3.1,得出效应值为0.834 766。设定 $\alpha=0.05$ (双侧), $\beta=0.1$ (检验效能90%),效应量 $d=0.834 766$ 。计算得出每组最少需32例,考虑20%脱落率,最终确定每组纳入42例。

选取2022年3月—2024年1月在福建中医药大学附属康复医院就诊的脑卒中患者84例。采用随机数字表法分为对照组和太极拳组,每组42例。研究过程中对照组脱落6例(未完成干预1例,拒绝第二次评估5例);太极拳组脱落8例(未完成干预

5例,拒绝第二次评估3例)。最终对照组和太极拳组分别纳入36例和34例。2组一般资料比较,差异无统计学意义($P>0.05$),具有可比性。见表1。本研究经福建中医药大学附属康复医院伦理委员会批准通过(审批号:2021KY-005-03)。

表1 2组一般资料比较
Table 1 Comparison of general data between two groups

组别	例数	性别		年龄/($\bar{x}\pm s$,岁)	病程/[$M(P_{25},P_{75})$,月]	偏瘫侧		类型	
		男	女			左	右	脑出血	脑梗死
对照组	36	22	14	56.36 $\pm$ 13.18	6.00(1.25,11.00)	14	22	16	20
太极拳组	34	25	9	52.32 $\pm$ 15.11	2.50(1.00,6.00)	13	21	14	20

2 方 法

2.1 治疗方法

2组均接受上肢康复训练,每天1次,每次持续60 min,每周5 d,持续干预4周;太极拳组在上肢康复训练的基础上,进行太极拳训练,每天1次,每次60 min,每周5 d,持续干预4周。2组的上肢康复内容和强度保持一致,由相同治疗师团队执行。

太极拳训练由2名具有5年以上教学经验的资深教练实施。为保证干预过程的标准化,所有参与研究的教练在试验开始前均须完成为期2周的标准化管理培训,该培训涵盖统一学习本研究制定的八式简化太极拳教学方案、掌握标准化的口令指导及动作纠正方法,并熟悉整个研究流程和注意事项。此外,在每次正式课程实施前,教练必须进行集体备课,以进一步统一教学内容和规范,确保教学实施的高度一致性。

2.1.1 对照组 上肢康复训练遵循《常用康复治疗技术操作规范(2012年版)》^[12]。训练项目包括提升上肢肌力和关节活动范围,运用神经发育治疗和运动再学习等综合康复技术。训练遵循以下原则:根据患者上肢功能障碍的具体情况,制定个性化治疗方案,以实现具体任务为目标导向。所有康复训练均由具有5年以上专业经验的康复治疗师负责执行。

2.1.2 太极拳组 在对照组基础上增加太极拳训练,选取起势、野马分鬃、搂膝拗步、倒卷肱、左揽雀尾、右揽雀尾、云手、收势等八式太极拳。1次/d。每次训练60 min,包括5 min热身、50 min太极拳练习和5 min放松整理,每周5次,持续4周。训练注重动作缓慢、重复,根据学员能力适当调整难度,不

强求精确度和流畅性,可分步骤进行。

2.2 数据采集方法

2.2.1 实验设备 本研究采用2台 Microsoft Azure Kinect深度传感器硬件设备以及 iPi Soft Motion Capture软件,基于深度学习骨架追踪算法以30 Hz的采样率收集运动学数据。

2.2.2 实验流程与技术 受试者在治疗前后分别接受2次 Microsoft Azure Kinect上肢功能评估。实验中,2台 Microsoft Azure Kinect设备捕捉患者上肢运动数据,设备校准后置于70 cm高的桌子两侧,距离中心2.5 m,摄像头位置调整以覆盖地面一半区域。测试前,治疗师指导患者正确摆放体位并解释双侧任务动作要领,确保其理解。在 Microsoft Azure Kinect数据采集前,患者需以T形姿势开始每个动作以确保身体识别。在对称性任务中,患者需双手协同拿起杯子并模拟饮水,杯子放置在患侧手臂最大伸展长度80%处。在非对称性任务中,患者用健侧手拉开抽屉,用患侧手按压按钮,按钮位于受影响手臂最大伸展范围80%处,抽屉尺寸为35 cm $\times$ 28 cm $\times$ 11.5 cm,装有环形拉手。见图1。

2.2.3 数据分析 本研究的数据管理和分析依托一个定制化的系统。该系统通过 Microsoft Visual Studio 2016(C#)调用 iPi SDK,自主开发算法计算双手协调相关运动学指标^[13]。见图2。运动学数据经 Kinect Azure Kinect DK采集后,由定制化数据分析系统进行自动处理。该系统基于 Microsoft Visual Studio 2016(C#)平台开发,通过调用 iPi SDK获取骨骼点三维坐标,并由自主开发算法计算双手协调相关运动学指标^[13]。计算所得数据以.csv格式导出,导入 SPSS 26.0(IBM Corporation, Armonk, NY, USA)进行统计分析。

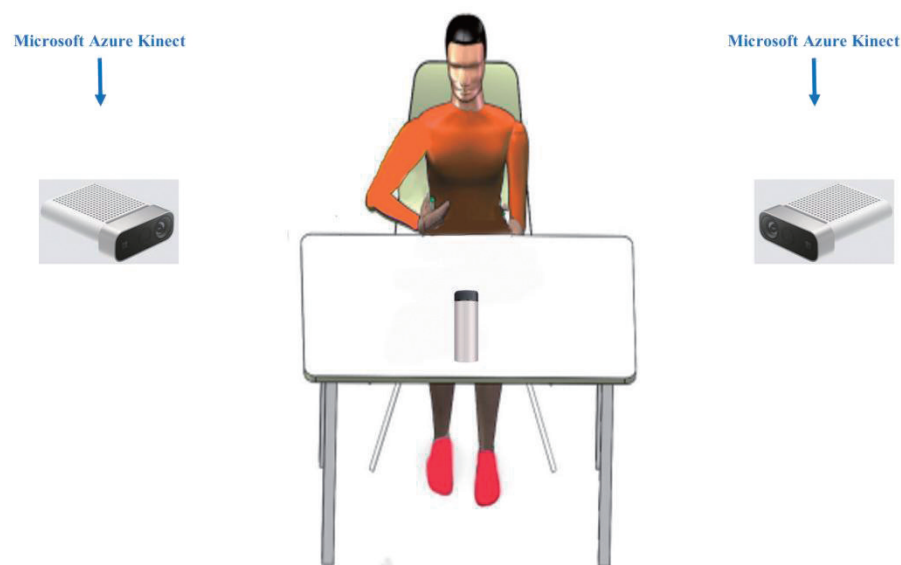
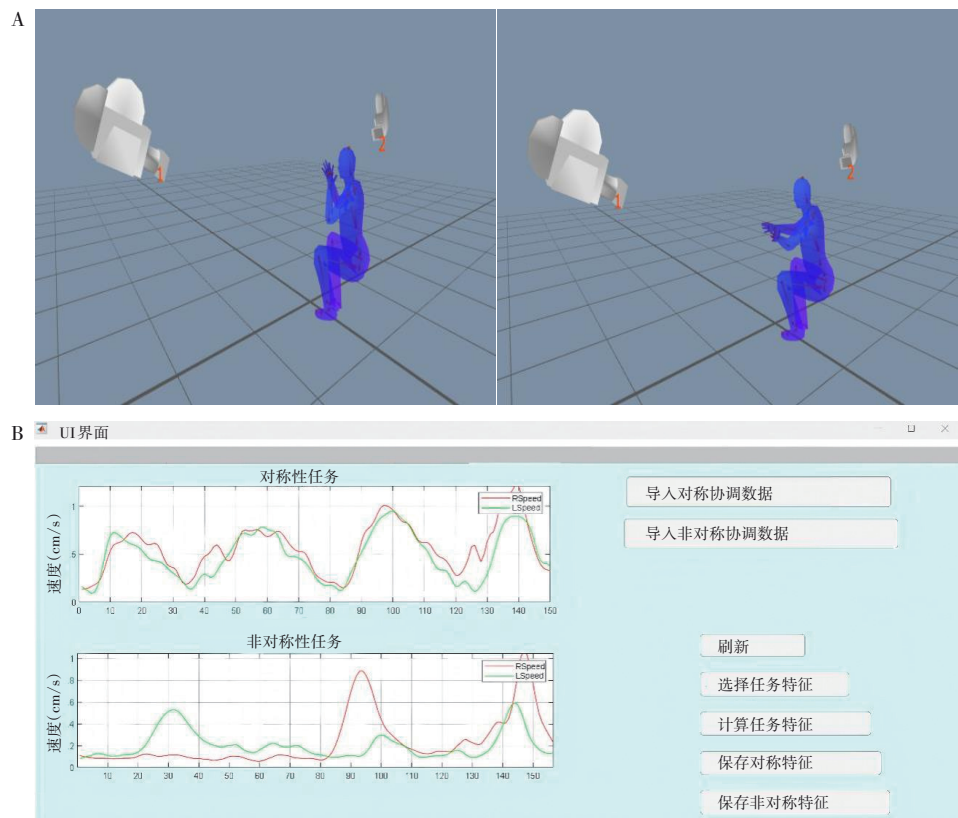


图1 双侧协调功能评估流程示意图

Figure 1 Schematic diagram of the bimanual coordination assessment protocol



注:图 A 为对称任务与非对称任务的数据采集场景,左侧为对称性任务,右侧为非对称性任务;图中编号 1 和 2 为 2 台 Microsoft Azure Kinect 摄像头。图 B 为定制化数据分析系统界面。

Note: Figure A is a data acquisition setup for symmetrical and asymmetrical tasks. The left panel shows the symmetrical task, and the right panel shows the asymmetrical task. Numbers 1 and 2 indicate the two Microsoft Azure Kinect cameras. Figure B is a screenshot of the custom-developed data analysis system interface.

图2 数据处理与分析

Figure 2 Data processing and analysis

2.3 观察指标

分别在治疗前和治疗4周后对2组相关指标进行评定。

2.3.1 对称性协调评估 采用对称性双臂协调任务对受试者双侧上肢协同运动能力进行评估。该任务要求受试者双手同时抓握并抬起置于身前桌面上的水杯,动作包含转移和拿起2个阶段。对称性协调评估共包含5个维度:任务总运动时间(move-ment time, MT)、右手转移时间、左手转移时间、标准化“到达-拿起”时间系数(reach-to-pickup time coefficient, RTP)和转移协调系数(transport coordination, TC)。
① MT是指从动作开始到结束的时间跨度,反映整体运动效率,MT值越小表示完成动作越快。运动开始时间为手部切线速度首次超过运输峰值速度的10%,结束时间为手部切线速度从杯子提起后降至第一个最低点的时间。转移阶段从动作起始至双手触碰杯子结束,若双手接触时间不一致,则以非优势臂达到峰值速度后切线速度最低的时间为结束。拿起阶段从运输阶段结束开始,直至动作结束。转移和拿起阶段的协调性参数独立评估。
② 采用右手转移时间对右侧上肢在转移阶段的运动效率进行评估,右手转移时间为右手从动作起始至触碰杯子结束的用时,右手转移时间越短表示右侧上肢在转移阶段的执行效率越高。
③ 采用左手转移时间对左侧上肢在转移阶段的运动效率进行评估,左手转移时间为左手从动作起始至触碰杯子结束的用时,左手转移时间越短表示左侧上肢在转移阶段的执行效率越高。
④ 采用RTP对拿起阶段同步性进行量化评估,RTP为从转移阶段结束到拿起速度达到峰值的时间与MT的比值,RTP值越小表示双臂在协同抓取、平衡提升及调整力量过程中的动作流畅性及协同效率越高。
⑤ 采用TC对转移阶段协调性进行量化评估,TC为双手达到速度峰值的时间差与MT的比值,TC值越接近0,表示双手并行运动协调性越好。

2.3.2 不对称性协调评估 采用不对称性双臂协调任务对受试者双侧上肢执行非镜像运动的能力进行评估。该任务要求受试者双手同时朝相反方向运动,一侧手向前按压按钮,另一侧手向后拉动抽屉。不对称性协调评估共包含4个维度:按压手运动时间、抽屉手运动时间、标准化开始同步系数(normalized onset synchronization coefficient, nOSc)和标准化拉压时间系数(normalized pull-to-press time

coefficient, nPTPc)。MT是指动作开始到结束的时间跨度。运动开始时间为抽屉手切线速度首次超过峰值速度的10%,结束时间为按压手切线速度降至峰值速度的10%以下。
① 采用按压手运动时间对按压手执行按压动作的效率进行评估,按压手运动时间为从启动至按压结束的时间,按压手运动时间越短表示按压手执行按压动作的效率越高。
② 采用抽屉手运动时间对抽屉手执行拉抽屉动作的效率进行评估,抽屉手运动时间为从启动至抽屉完全打开的时间,抽屉手运动时间越短表示抽屉手执行拉抽屉动作的效率越高。
③ 采用nOSc对双手启动同步性进行评估,nOSc为抽屉手与按压手启动时间差与MT的比值,nOSc值越小表示双手几乎同时开始动作,启动同步性越好。
④ 采用nPTPc对双手执行拉与压两个不同动作的时序匹配度进行评估,nPTPc为抽屉手与按压手达到峰值速度的时间差与MT的比值,nPTPc值越小表明双手执行各自动作的时间越接近,不对称性协调效率越高^[13]。

2.4 统计学方法

采用SPSS 25.0软件对数据进行统计分析。计数资料以[例(%)]表示,组间比较采用 χ^2 检验。计量资料服从正态分布者,以($\bar{x} \pm s$)表示,组内比较采用配对样本 t 检验,组间比较采用两样本 t 检验;计量资料不服从正态分布者,以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,组内比较使用Wilcoxon符号秩检验,组间比较使用Mann-Whitney U 检验。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

3 结 果

3.1 2组治疗前后MT、右手转移时间、左手转移时间、RTP和TC比较

与治疗前比较,2组治疗后MT、右手转移时间均减少($P < 0.05$),RTP、TC值均减小($P < 0.05$),太极拳组左手转移时间减少($P < 0.05$);与对照组比较,太极拳组治疗后MT减少($P < 0.05$),TC值减小($P < 0.05$),右手转移时间、左手转移时间及RTP值差异均无统计学意义($P > 0.05$)。见表3。

3.2 2组治疗前后按压手运动时间、抽屉手运动时间、nOSc和nPTPc比较

与治疗前比较,2组治疗后按压手运动时间、抽屉手运动时间均减少($P < 0.05$),nOSc、nPTPc值均减小($P < 0.05$);与对照组比较,太极拳组按压手运动时间、抽屉手运动时间、nOSc、nPTPc值差异均无统计学意义($P > 0.05$)。见表3。

表 2 2组治疗前后MT、右手转移时间、左手转移时间、RTP和TC比较[$M(P_{25}, P_{75})$]

Table 2 Comparison of kinematic characteristics between two groups before and after intervention [$M(P_{25}, P_{75})$]							
组别	例数	时间	MT/s	右手转移时间/s	左手转移时间/s	RTP	TC
对照组	36	治疗前	10.87(8.83, 11.18)	5.44(3.65, 6.52)	5.23(3.51, 5.72)	6.37(4.68, 7.31)	0.15(0.06, 0.22)
		治疗后	9.08(6.33, 9.95) ¹⁾	4.69(2.95, 4.92) ¹⁾	4.65(3.11, 5.29)	4.88(3.45, 5.35) ¹⁾	0.10(0.02, 0.15) ¹⁾
太极拳组	34	治疗前	11.33(7.28, 14.75)	6.02(2.97, 7.07)	6.20(3.46, 8.18)	6.11(4.14, 6.81)	0.15(0.04, 0.24)
		治疗后	7.59(4.79, 8.02) ¹⁾²⁾	4.12(2.80, 4.87) ¹⁾	3.80(2.80, 4.03) ¹⁾	4.21(2.34, 5.10) ¹⁾	0.03(0.01, 0.05) ¹⁾²⁾

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与对照组比较,2) $P<0.05$ 。
Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the control group, 2) $P<0.05$.

表 3 2组治疗前后按压手运动时间、抽屈手运动时间、nOSc和nPTPc比较
Table 3 Comparison of pressing hand movement time, drawer hand movement time, nOSc, and nPTPc between two groups before and after intervention

组别	例数	时间	按压手运动时间/ [$M(P_{25}, P_{75})$]/s]	抽屈手运动时间/ [$M(P_{25}, P_{75})$]/s]	nOSc/[$M(P_{25}, P_{75})$]	nPTPc/ [$M(P_{25}, P_{75}, \bar{x} \pm s)$]
对照组	36	治疗前	11.15(8.34, 11.58)	11.10(8.04, 11.63)	0.01(0.00, 0.02)	0.24(0.18, 0.31)
		治疗后	9.36(6.74, 9.58) ¹⁾	9.36(6.74, 9.58) ¹⁾	0.00(0.00, 0.01) ¹⁾	0.13(0.02, 0.15) ¹⁾
太极拳组	34	治疗前	11.11(7.66, 13.33)	11.16(7.64, 13.01)	0.02(0.00, 0.02)	0.25±0.09
		治疗后	9.17(5.92, 9.82) ¹⁾	9.13(6.85, 9.79) ¹⁾	0.00(0.00, 0.01) ¹⁾	0.14±0.10 ¹⁾

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$ 。
Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$.

4 讨 论

双手协调活动在日常功能中至关重要,其要求双手在时间与空间维度上实现精准的协同配合。脑卒中后,患侧手臂运动功能障碍显著,健侧手臂亦常受累,导致双手任务协调能力受损^[14]。研究证实,脑卒中患者在对称性与非对称性双手任务中均表现出协调障碍,患侧手存在显著的时间延迟,尤其在速度维度上受损更为突出^[15]。普渡钉板测试(Purdue pegboard test, PPT)结果亦显示其双手协调性和力量控制能力减弱,精细灵巧性亦明显下降^[16]。上述协调障碍严重限制患者的日常生活活动能力和功能独立性,故恢复双手协调功能对提升其生活质量具有重要意义。

本研究采用 Microsoft Azure Kinect 无标记运动捕捉系统,定量评估太极拳联合上肢康复训练对脑卒中患者双手协调功能的影响。治疗4周后,2组TC值均较治疗前减小,且太极拳组TC值小于对照组,表明2种干预均可有效改善双手协调功能,但太极拳组的改善程度优于对照组。这种改善可能与中枢神经系统可塑性有关。康复训练可促进神经可塑性,增加树突棘和突触数量,加速神经组织重塑,为运动技能重建奠定基础^[17]。反复任务导向性训练可促使大脑功能区神经细胞向病灶区域迁

移,促进受损神经元修复与再生,改善偏瘫肢体功能,并促进双手协调运动与同步化^[18]。

已有研究证实太极拳可改善脑卒中患者的双手协调功能^[19]。从运动功能评估维度,Wolf运动功能测试(Wolf motor function test, WMFT)可直接反映双手协调完成复杂动作的能力^[19]。太极云手联合机器人辅助训练的研究表明,太极拳组干预8周后WMFT评分较对照组改善显著,提示太极拳对协调功能的促进需要一定的训练周期积累^[20]。另一项太极云手训练研究亦显示,训练组WMFT评分显著高于对照组,其中伸手、抓握、放置等多步骤动作的评分提升,直接反映了双手在空间定位、力量控制及动作连贯性方面的协调进步^[21]。

双手协调功能的改善依赖于上肢肌力、关节活动度与神经控制的协同整合。坐式太极拳研究表明,干预组肩部伸展活动度及Lovett徒手肌力评定(Lovett manual muscle testing, Lovett MMT)评分优于对照组,太极云手训练组Lovett MMT评分亦显著提高,该训练所强调的“以腰带手”“上下相随”运动模式,可强化双手空间对称协调能力,弥补传统单侧康复训练的局限,为双手协调运动奠定生理基础^[21]。此外,MBI评分的提升间接反映了双手协调功能在日常生活中的实际应用改善。坐式太极拳干预后

患者日常生活活动评分提高,而太极云手中“云手式”等模拟真实场景的双手互动(如双手交替划弧、重心转移)可针对性地优化患者在进食、穿衣等功能性任务中的协调策略,与传统机器人辅助训练侧重单侧力量或关节活动的模式形成协同效应^[19-20]。综上,现有研究已从运动功能、肌力、日常生活能力等维度间接支持太极拳对双手协调功能的改善作用,但尚缺乏通过运动学分析技术直接量化双手协调参数的研究证据。

本研究发现,太极拳联合上肢康复训练在对称性双臂协调任务中,改善运动时间及同步协调系数的效果优于单纯上肢康复训练。这一优势可能与双手运动协调对复杂感觉运动整合过程的依赖有关,该过程涉及双侧神经网络及大脑半球间相互作用^[22]。脑卒中后胼胝体纤维受损可干扰半球间信息传递及双手协调能力,而恢复双手协调功能对改善偏瘫患者日常生活活动能力至关重要。“左右制衡”理论强调,康复应重视左右侧中枢与肢体的整体调控,建立正确的运动模式,以促进脑卒中后手功能恢复^[23]。

本研究的核心发现基于运动学指标,可从以下2个方面解读:① 对称性任务:与治疗前比较,2组治疗后MT、右手转移时间均减少,RTP、TC值均减小,说明单纯上肢康复训练和太极拳联合上肢康复训练均可有效提升双侧上肢的整体运动效率、单侧转移速度及拿起阶段的同步性。组间比较显示,太极拳组MT减少和TC值减小,且优于对照组,但右手转移时间、左手转移时间及RTP值的组间差异无统计学意义。这一结果提示,太极拳的优势具有任务特异性——其核心效应并非体现在单侧上肢的转移速度(右手转移时间、左手转移时间)或拿起阶段的单点时序同步,而在于整个转移过程中双侧肢体的持续协同控制。TC反映双手速度峰值的同步性,是衡量双侧协调的直接指标;太极拳强调的“以腰带手”“上下相随”运动模式,恰好强化了这种时空同步能力。② 不对称性任务:与治疗前比较,2组治疗后按压手运动时间、抽屈手运动时间均减少,nOSc、nPTPc值均减小,说明单纯上肢康复训练和太极拳联合上肢康复训练均可有效改善单侧上肢的分离运动速度及双手启动与执行的时序匹配度;但组间比较显示,太极拳组各项指标与对照组比较,差异均无统计学意义。该任务主要评估单侧拉压速度,对双侧时空协同要求较低,非太极拳的

优势所在;且2组均已具备一定的分离运动能力(Brunnstrom III~V期),常规康复亦可有效改善其单侧速度,加之4周干预对速度类指标的改善可能不足以产生组间差异。综上,太极拳对双手协调的改善具有任务特异性——其优势主要体现在需要双侧持续协同的对称性任务(尤其是转移阶段的协调控制,即TC),而非单侧速度类指标(如转移时间、拉压时间)。这为临床康复方案的选择提供了依据,对于以协调障碍为主的患者,可优先考虑太极拳训练;而对于以单侧运动速度缺陷为主的患者,常规任务导向性训练可能更为直接有效。太极拳涉及双侧肢体的交替与配合,要求双上肢同时执行不同任务以增加动作挑战性。其温和且需精细控制的运动特性可能促进大脑结构和功能的适应性重塑,增强神经可塑性。研究显示,太极拳锻炼可增加大脑灰质体积及关键脑区间的功能连接^[24]。此外,太极拳训练需高度注意力和意识集中,有助于提高患者的执行功能,包括动作的计划与执行能力,这些认知过程在双手协调运动中发挥重要作用^[25]。

研究表明,双侧运动训练可激活大脑两半球同源区域,增强胼胝体连接及感觉运动网络的半球内和半球间连接,改善脑卒中后上肢功能^[26]。其神经康复机制可能包括:① 调节双侧大脑半球间抑制平衡,重塑皮层抑制回路,促进四肢运动功能恢复^[27];② 强化躯干近端控制,双侧手臂训练可诱导躯干肌肉协同收缩,改善上肢近端稳定性^[28];③ 反馈依赖性适应,重复双侧运动训练以正常本体感觉为反馈,激活更广泛的神经通路,刺激受损区域并促进神经元重塑^[29]。太极拳同样强调双侧肢体的协同配合,是否通过上述类似机制发挥作用,尚需进一步研究加以验证。

脑卒中后双手功能评估的关键量表包括手臂运动能力测试、Chedoke手臂和手部活动量表(Chedoke Arm and Hand Activity Inventory, CAHAI)、综合协调量表及PPT,上述量表分别从运动能力、双手协调及日常生活活动能力等维度进行评估^[30-33]。先进的运动测量工具,如无线电磁跟踪系统G120可记录双臂运动学数据,加速度计可量化日常生活中的双手协调表现,红外距离传感器可评估手部振荡特征,KINARM上肢外骨骼系统(BKIN Technologies, 加拿大)可评估肢体控制与协调能力^[34-37]。这些量

表和测量工具为深入分析患者的双手协调动作模式提供了丰富的定量数据支持。

本研究用 Microsoft Azure Kinect 收集 2 项日常生活活动的运动学数据,即饮水动作及拉抽屉-按压组合动作。饮水动作涵盖抓握、提升、倾斜及饮用等连续步骤,可全面评估脑卒中患者上肢力量、协调性、灵活性及双手配合能力,是反映康复效果的关键指标。拉抽屉-按压组合动作模拟操作抽屉与按钮等高频日常行为,需肩、肘、腕多关节协调运动及手指精细控制,且要求双手协同完成,对评估双手协调性功能具有重要临床价值。上述任务有助于深入理解患者计划、执行及协调双手自然交互动作的能力特征。

本研究存在若干局限性。① 仅分析了 2 项代表性动作,未能全面覆盖患者日常双手任务的多样性。② 纳入患者的上肢运动功能 Brunnstrom 分期为Ⅲ~Ⅴ期,未纳入Ⅰ~Ⅱ期患者,原因是 Microsoft Azure Kinect 在采集软瘫或高肌张力状态患者的数据时面临技术挑战。③ 本研究对多个结局指标进行了统计比较,但未应用多重比较校正方法如 Bonferroni 法。尽管该策略有助于全面描述干预效果,但也可能增加Ⅰ类错误(假阳性)的风险。④ 研究未设置不同训练时长的亚组,如 30 min 和 60 min,因此,无法确定太极拳的最小有效剂量。⑤ 研究仅观察了 4 周干预的短期效果,未追踪长期训练对神经可塑性的影响。

未来研究拟纳入更多样化的双手协调动作以全面评估脑卒中患者协调能力,并特别关注不同 Brunnstrom 分期患者的运动特征差异。同时,优化 Microsoft Azure Kinect 的数据处理方法,以提高对严重功能障碍患者运动特征的识别精度。此外,后续研究将通过预先设定主要结局指标及实施多重比较校正以控制Ⅰ类错误,并设置不同训练时长亚组,探索太极拳的最小有效剂量及剂量-效应关系。同时,将探索优化训练方案结构(如开发高强度间歇式太极训练)、结合辅助技术(如个性化实时反馈系统以加速学习曲线)、比较不同训练频率模式等方法以提高时间效率。此外,考虑到太极拳训练的持久效果,计划在 6 个月或更长长时间后进行随访评估,以探究太极拳训练的持久效果及长期神经可塑性机制,为临床制定科学、个体化的太极拳康复方案提供更充分的循证依据。

4 结 论

本研究对比分析发现,4 周太极拳结合康复训练和单纯康复训练均对脑卒中后双手协调功能恢复有积极影响。太极拳结合康复训练在双手协调任务测试中,双手同步协调系数改善明显优于单纯康复训练,凸显太极拳在促进双手协调性方面的特殊价值。结果支持将太极拳作为传统康复训练的补充,以增强患者双手协调能力。

参考文献

- [1] FEIGIN V L, BRAININ M, NORRVING B, et al. World Stroke Organization (WSO): global stroke fact sheet 2022 [J]. *Int J Stroke*, 2022, 17(1): 18-29.
- [2] ITO K, SHUN S W, NAKANO H. Bimanual asymmetric exercises reduce pathological mirror movements after stroke: a case report with disconnectome mapping [J]. *Neurocase*, 2026, 32(3): 103-111.
- [3] POTTS C A, KANTAK S S. Post-stroke deficits in the anticipatory control and bimanual coordination during naturalistic cooperative bimanual action [J]. *J NeuroEngineering Rehabil*, 2023, 20(1): 153.
- [4] QIAN F F, HU L Y, HE Y H, et al. A bilateral upper limb interactive game-based virtual reality rehabilitation system for stroke patients: a usability and clinical study [J]. *J NeuroEngineering Rehabil*, 2026, 23(1): 62.
- [5] DEMBELE J, TRICCAS L T, AMANZONWÉ L E R, et al. Bilateral versus unilateral upper limb training in (sub)acute stroke: a systematic and meta-analysis [J]. *S Afr N J Physiother*, 2024, 80(1): 1985.
- [6] LI H M, HAN Y Y, SHENG F, et al. Influence and significance of bilateral upper-extremity training on recovery of upper-extremity motor function for hemiplegic patients with mild-moderate cerebral apoplexy: a randomised controlled study [J]. *Afr Health Sci*, 2022, 22(3): 375-382.
- [7] ALKHARJI H, GAN Q F, FOO C N. Concepts and application of Tai Ji in stroke rehabilitation: a narrative review [J]. *Int J Public Health*, 2022: 2449-2457.
- [8] CAI L S, MA Y, XIONG S P, et al. Validity and reliability of upper limb functional assessment using the Microsoft Kinect V2 sensor [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2019, 2019: 7175240.
- [9] ALEKSANDRA K, MAJ A, DEJNEK M, et al. Wrist motion assessment using Microsoft Azure Kinect DK: a reliability study in healthy individuals [J]. *Adv Clin Exp Med*, 2023, 32(2): 203-209.
- [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.
Chinese Society of Neurology and the Cerebrovascular Disease Group, Chinese Medical Association. Diagnostic criteria of cerebrovascular diseases in China (version 2019) [J]. *Chin J Neurol*,

- 2019,52(9):710-715.
- [11] 周莉,李宗衡,张勇,等.改良太极拳对中风患者运动功能康复疗效初探[J].中西医结合心脑血管病杂志,2015,13(7):878-880.
ZHOU L, LI Z H, ZHANG Y, et al. Preliminary study on the effect of modified Tai Chi for motor function in patients with stroke [J]. Chin J Integr Med Cardio/Cerebrovasc Dis, 2015, 13(7):878-880.
- [12] 中国康复医学会.常用康复治疗技术操作规范(2012年版)[M].北京:卫生部办公厅,2012:84-97.
China Rehabilitation Medical Association. Commonly used rehabilitation therapy technical operating specifications (2012 Edition) [M]. Beijing:General Office of the Ministry of Health, 2012:84-97.
- [13] KANTAK S S, ZAHEDI N, MCGRATH R L. Task-dependent bimanual coordination after stroke: relationship with sensorimotor impairments [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2016, 97(5):798-806.
- [14] JOHNSON B P, WESTLAKE K P. Chronic poststroke deficits in gross and fine motor control of the ipsilesional upper limb [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2021, 100(4):345-348.
- [15] AKREMI H, HIGGINS J, AISSAOUI R, et al. Bilateral motor coordination during upper limb symmetric pushing movements at two levels of force resistance in healthy and post-stroke individuals [J]. Hum Mov Sci, 2022, 81: 102913.
- [16] CHEN S Y, MAO M C, ZHU G Y, et al. Cortical activity in patients with high-functioning ischemic stroke during the Purdue Peg-board Test: insights into bimanual coordinated fine motor skills with functional near-infrared spectroscopy [J]. Neural Regen Res, 2024, 19(5):1098-1104.
- [17] MARÍN-MEDINA D S, ARENAS-VARGAS P A, ARIAS-BOTERO J C, et al. New approaches to recovery after stroke [J]. Neurol Sci, 2024, 45(1):55-63.
- [18] RUNGSEETHANAKUL S, TRETRILUXANA J, PIRIYAPRASARTH P, et al. Task oriented training activities post stroke will produce measurable alterations in brain plasticity concurrent with skill improvement [J]. Top Stroke Rehabil, 2022, 29(4):241-254.
- [19] ZHAO J, CHAU J P C, CHAN A W K, et al. Tailored sitting Tai Chi program for subacute stroke survivors: a randomized controlled trial [J]. Stroke, 2022, 53(7):2192-2203.
- [20] 张丽英,王杰宁,于小明,等.太极云手联合机器人辅助训练对脑卒中患者手功能的影响[J].中医康复,2024,1(1):17-20.
ZHANG L Y, WANG J N, YU X M, et al. Effects of body weight support-Tai Chi Yunshou training on upper limb motor function in stroke patients [J]. Tradit Chin Med Rehabil, 2024, 1(1):17-20.
- [21] 王心缘.太极云手训练对于脑卒中后上肢功能障碍的疗效研究[J].临床研究,2021,29(6):106-108.
WANG X Y. Effect of Tai Chi Yunshou training on upper limb dysfunction after stroke [J]. Clin Res, 2021, 29(6):106-108.
- [22] GARDNER E P, PUTRINO D F, CHEN VAN DAELE J. Neural representation in M1 and S1 cortex of bilateral hand actions during prehension [J]. J Neurophysiol, 2022, 127(4):1007-1025.
- [23] 王睿月,齐丽娜,陈琳渝,等.左右制衡机制下不同电刺激对脑卒中后偏瘫患者大脑皮质兴奋性和上肢运动功能的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2025,47(1):19-24.
WANG R Y, QI L N, CHEN L Y, et al. The effects of electrical stimulation on upper limb motor function, left-right coordination and balance after a stroke [J]. Chin J Phys Med Rehabil, 2025, 47(1):19-24.
- [24] LIU H, SALEM Y, ARGUELLO E, et al. Brain structural response and neurobehavioral changes in the elderly after Tai Chi practice—a literature review [J]. Tradit Integr Med, 2023, 8(1):86-96.
- [25] CHEN R R, WANG S L, FAN Y J, et al. Acute Tai Chi Chuan exercise enhances sustained attention and elicits increased *Cuneus*/precuneus activation in young adults [J]. Cereb Cortex, 2023, 33(6):2969-2981.
- [26] CHEN S Y, QIU Y Q, BASSILE C C, et al. Effectiveness and success factors of bilateral arm training after stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. Front Aging Neurosci, 2022, 14: 875794.
- [27] MARQUES L M, SOUSA M H G, ORTEGA-MÁRQUEZ J, et al. Nonlinear association between motor impairment after stroke and the contralesional inhibitory deficit [J]. Clin Neurophysiol, 2025, 177:2110760.
- [28] HSU H Y, CHIU H Y, KUAN T S, et al. Robotic-assisted therapy with bilateral practice improves task and motor performance in the upper extremities of chronic stroke patients: a randomised controlled trial [J]. Aust Occup Ther J, 2019, 66(5):637-647.
- [29] KUIPERS J A, HOFFMAN N, CARRICK F R, et al. Post-stroke rehabilitation: neurophysiology processes of bilateral movement training and interlimb coupling: a systematic review [J]. J Clin Med, 2025, 14(11):3757.
- [30] ATEŞ SARI Y, ALDEGES W, ÜNLÜER N Ö. An investigation of upper extremity function, sleep quality, and functional independence in patients with poststroke shoulder pain: a cross-sectional study [J]. Physiother Theory Pract, 2024, 40(11):2472-2479.
- [31] TSAI H T, LAU H Y, LIN K C, et al. Responsiveness and construct validity of two outcome measures of bilateral upper limb function in patients with chronic stroke [J]. Front Neurol, 2024, 15:1352365.
- [32] ALOUCHE S R, MOLAD R, DEMERS M, et al. Development of a comprehensive outcome measure for motor coordination; step 1: three-phase content validity process [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2021, 35(2):185-193.
- [33] STIJIC M, PETROVIC K, SCHWINGENSCHUH P, et al. The purdue pegboard test: normative data from 1,355 healthy people from Austria [J]. Am J Occup Ther, 2023, 77(3):7703205030.
- [34] MOLAD R, LEVIN M F. Construct validity of the upper-limb interlimb coordination test in stroke [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2022, 36(1):49-60.
- [35] ZAIDI K F, WEI Q. Temporal localization of upper extremity bilateral synergistic coordination using wearable accelerometers [J]. PeerJ, 2024, 12:e17858.

[36] IOSA M, GHANBARI GHOSHCHY S, MORONE G, et al. Visuomotor integration for coupled hand movements in healthy subjects and patients with stroke [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2020,8:591.

[37] SHIH P C, STEELE C J, HOEPFEL D, et al. The impact of lesion side on bilateral upper limb coordination after stroke [J]. *J Neuro-Engineering Rehabil*, 2023,20(1):166.

Effects of Tai Chi Combined with Upper Limb Rehabilitation Training on Bimanual Coordination Kinematic Characteristics in Post-Stroke Patients: A Markerless Motion Capture-Based Analysis

XIE Qirong^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, SHENG Bo³, WANG Xiaoling^{1,2}, LUO Jia^{1,2}, ZHANG Yanxin⁴, HUANG Jia^{1,2*}

¹ College of Rehabilitation Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou, Fujian 350122, China;

² Rehabilitation Industry Institute, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou, Fujian 350122, China;

³ School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

⁴ Department of Exercise Sciences, The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand

*Correspondence: HUANG Jia, E-mail: jasmine1874@163.com

ABSTRACT Objective This study investigated the effects of Tai Chi combined with upper limb rehabilitation training on bimanual coordination kinematic characteristics in post-stroke patients using markerless motion capture technology. **Methods** A total of 84 stroke patients admitted to the Rehabilitation Hospital Affiliated to Fujian University of Traditional Chinese Medicine between March 2022 and January 2024 were recruited. Participants were randomly assigned to a control group or a Tai Chi group via the random number table method, with 42 cases in each group. During the study, 6 cases dropped out in the control group and 8 in the Tai Chi group, and finally 36 cases in the control group and 34 cases in the Tai Chi group were included in the final analysis. Both groups received routine upper limb rehabilitation training, once daily, 60 min per session, 5 days per week, for 4 consecutive weeks. The Tai Chi group additionally received Tai Chi training, once daily, 60 min per session, 5 days per week, for 4 consecutive weeks. Kinematic data were collected at a 30 Hz sampling rate via two Microsoft Azure Kinect depth sensors and iPi Soft Motion Capture software based on a deep learning-powered skeleton tracking algorithm, and processed and analyzed using a custom-built data analysis system. Bilateral symmetric coordination tasks were evaluated across five dimensions: total movement time (MT), right-hand transfer time, left-hand transfer time, normalized reach-to-pickup time coefficient (RTP), and transfer coordination coefficient (TC). Bilateral asymmetric coordination tasks were assessed from four dimensions: pressing hand movement time, drawer hand movement time, normalized onset synchronization coefficient (nOSc), and normalized pull-to-press time coefficient (nPTPc). **Results** Compared with pre-treatment, both groups showed significant reductions in MT and right-hand transfer time after treatment ($P<0.05$), as well as significant decreases in RTP and TC values ($P<0.05$). In the Tai Chi group, left-hand transfer time also decreased significantly ($P<0.05$). Compared with the control group, the Tai Chi group showed significant reductions in MT ($P<0.05$) and TC ($P<0.05$) after treatment, while no significant differences were observed in right-hand transfer time, left-hand transfer time, or RTP ($P>0.05$). Compared with pre-treatment, both groups showed significant reductions in pressing hand movement time and drawer hand movement time after treatment ($P<0.05$), as well as significant decreases in nOSc and nPTPc values ($P<0.05$). However, no significant differences were found between the two groups in pressing hand movement time, drawer hand movement time, nOSc and nPTPc ($P>0.05$). **Conclusion** Markerless motion capture technology-based observation indicates that Tai Chi combined with upper limb rehabilitation training can improve bimanual coordination function in post-stroke patients.

KEY WORDS stroke; Tai Chi; markerless motion capture technology; bimanual coordination; kinematic analysis

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.07002