

长期太极拳训练对脑结构可塑性及其平衡功能的影响：一项多模态神经影像学研究

刘博文，杜小霞

上海体育大学，上海 200438

目的：太极拳（TCC）是一种源于中国传统文化的身心运动形式，融合了呼吸、专注等冥想元素，被广泛用于预防跌倒、改善平衡功能以及调节情绪状态。近年越来越多神经影像学研究表明，TCC 不仅能促进身体健康，还可能通过促进神经可塑性改变大脑结构，进而改善认知和心理健康。然而，目前 TCC 对脑的研究大多聚焦于老年人群，且多采用单一模态（如灰质体积或皮层厚度）指标，对于处于神经系统发育高峰期的青年人，尤其是训练有素的专业运动员群体，其脑结构的重塑模式尚不明确。此外，对于这些脑结构改变是否与身体平衡表现存在系统性关系，以及多模态神经影像指标是否具有区分群体的潜力，目前研究尚不充分。因此，本研究首次采用 T1 加权成像和扩散峰度成像（DKI）相结合的多模态神经影像技术，综合考察青年 TCC 运动员在灰质体积、白质微结构及姿态平衡等方面的表现，进一步探讨神经结构特征与行为表现的相关性。**方法：**本研究共纳入 65 名受试者，其中 TCC 运动员组包含 35 名国家二级以上专业训练背景的大学生 TCC 运动员（女性：25 名，年龄：20.71±1.87 岁，训练年限：7.20±3.44 年）与 30 名健康对照者（女性：23 名，年龄：20.58±2.53 岁），匹配其性别、年龄与受教育年限。所有受试者为右利手、无神经或精神疾病史，接受了统一的结构化行为评估。行为学方面，使用 Wii 平衡板采集静态双脚站立条件下 30 秒的身体重心轨迹数据，计算了前后（AP）振幅、内外侧（ML）振幅、总路径速度和均方根位移（RMS）来量化姿态控制能力。磁共振扫描采用 3T Siemens MAGNETOM Prisma 系统，采集高分辨率 T1 加权图像（MPRAGE 序列）和 DKI 图像。T1 加权图像处理使用 CAT12 模块，提取全脑调制灰质体积参数；DKI 数据通过 QSIPrep 完成标准预处理流程，利用 dipy 实现 DKI 建模，提取各向异性分数（FA）、平均扩散率（MD）、径向扩散率（RD）和轴向扩散率（AD）等各向异性指标及平均峰度（MK）、径向峰度（RK）、轴向峰度（AK）和平均峰度（MK）等非高斯扩散指标，并将其标准化至 FA 骨架以进行白质微结构比较。这些指标被用于评价白质纤维的完整性和微观复杂性。统计分析方面，采用 SPSS 软件进行组间行为差异检验；VBM 和基于纤维束的空间统计（TBSS）结果的组间差异使用一般线性模型，结果经 FWE 和 TFCE 校正以控制多重比较，使用偏相关分析建

立行为学与结构指标的关联性分析；此外，构建逻辑回归模型并使用 ROC 曲线评估分类准确率。

结果：结果显示，TCC 组在身体平衡方面，包括 AP 振幅、ML 振幅、总路径速度和均方根位移在内的多个指标均显著低于对照组 ($P < 0.01$)，预示着 TCC 运动员姿态控制更为稳定；在大脑结构方面，VBM 结果显示 TCC 组在右楔叶/枕上回、双侧中扣带回、左海马、右侧额下回眶部、左侧顶上小叶、双侧丘脑等多个灰质区域体积显著大于对照组 ($P_{FWE} < 0.05$)。DKI 分析结果表明，TCC 组在 FA、AD、RK、MK 等多个白质微结构指标上表现出优势 ($P_{TFCE} < 0.05$)，主要分布于胼胝体部、双侧放射冠、皮质脊髓束和上纵束等纤维路径上，表示其白质完整性和微观复杂性更高。偏相关结果显示，在控制了性别、年龄和组别后，皮质脊髓束 ($r = -0.386$, $P_{FDR} = 0.034$) 及后放射冠 ($r = -0.373$, $P_{FDR} = 0.034$) MK 值与姿态路径 RMS 呈显著负相关，说明白质微结构越复杂，平衡表现越稳定。进一步构建的逻辑回归分类模型显示，单一结构指标，如 FA 模型即可实现较高分类准确率 ($AUC=0.826$, $AIC=70.29$)，而多模态特征融合模型 (VBM 灰质体积+FA+AD+RK+MK) 具有更优表现 ($AUC=0.903$, $AIC=59.65$)，显示整合宏观与微观结构指标能有效区分专业运动员与普通健康人群。**结论：**本研究首次采用多模态神经影像方法，在青年 TCC 运动员中系统验证了长期身心训练对大脑结构的广泛塑造作用，发现其灰质体积不仅在中扣带回、额下回眶部、楔叶、顶叶、丘脑及海马等情绪与感知相关区域显著增加，白质方面也在与运动计划和感觉输入整合密切相关的通路上展现出更高的各向异性与复杂性。这些脑结构优势与平衡能力存在密切联系。同时，本研究还提供了 TCC 运动所带来的结构特征在分类上的临床应用潜力，提示多模态结构特征可作为区分不同身体训练背景人群的重要生物标志物。未来研究可进一步引入功能磁共振、静息态网络分析与纵向追踪设计，从而拓展 TCC 在康复干预、认知训练及情绪障碍治疗中的科学依据与实际应用价值。

关键词：太极拳；灰质；白质；平衡；磁共振成像

The impact of long-term tai chi training on brain structural plasticity and postural balance: a multimodal neuroimaging study

Bowen Liu, Xiaoxia Du

Shanghai University of Sport, Shanghai, 200438, China

Abstract: Objective: Tai Chi Chuan (TCC) is a traditional Chinese mind-body practice that combines slow movement, breath control, and attentional focus, and is known to enhance balance and cognitive function. However, the neural mechanisms underlying these benefits remain unclear. In particular, it is not well understood how long-term TCC training may influence brain structures related to sensorimotor

integration and visuospatial attention—core components of balance control. This study aimed to examine whether elite TCC athletes show structural brain adaptations associated with enhanced balance ability, and to identify specific gray and white matter correlates of these adaptations. **Methods:** Sixty-five right-handed young adults participated, including 35 nationally certified TCC athletes and 30 age-, sex-, and education-matched controls. Postural balance was assessed using a Wii balance board under quiet standing conditions. High-resolution T1-weighted images were analyzed with voxel-based morphometry (VBM) via CAT12, and diffusion kurtosis imaging (DKI) data were processed using QSIPrep and DIPY to extract diffusion (FA, AD) and kurtosis (MK, RK) metrics. Between-group comparisons, partial correlations, and logistic regression models were used to assess brain–behavior relationships and classification performance. **Results:** TCC athletes exhibited significantly better postural stability ($P < 0.01$). VBM analyses showed increased gray matter volume in the cuneus, cingulate cortex, hippocampus, thalamus, and parietal/frontal areas. DKI analyses revealed higher FA, AD, RK, and MK in motor- and sensory-related white matter tracts, including the corticospinal tract and corpus callosum. Notably, MK in the corticospinal tract and posterior corona radiata was negatively correlated with RMS sway displacement, suggesting a link between white matter complexity and balance control. A multimodal logistic regression model achieved high classification accuracy ($AUC = 0.903$). **Conclusion:** Long-term TCC training leads to widespread structural brain adaptations in young athletes, enhancing both gray matter volume and white matter microstructural complexity. These neuroplastic changes are closely associated with improved balance performance. Multimodal MRI features may serve as reliable biomarkers of training-induced brain plasticity.

Keywords: Tai Chi; Gray Matter; White Matter; Postural Control; diffusion kurtosis imaging

