

太极桩功中枢-外周交互机制研究

齐莉萍¹, 田志浩¹, 杨树叶², 杨雨龙², 刘立清²

1 大连理工大学人工智能学院, 大连, 辽宁 116024

2 大连理工大学体育与健康学院, 大连, 辽宁 116024

摘要: 目的: 太极拳作为传统“身心运动”, 协调意识、呼吸和动作, 对身心健康有积极影响。然而关于太极拳影响身心的生理机制尚不明确。本研究以心脑互动模型为基础, 将中枢与外周的“双向”交互作为研究假设, 联合应用功能性近红外光谱与心电技术, 以前额皮层活动、心率变异性和呼吸作为中枢自主神经网络、自主神经系统及呼吸系统的指标, 探索太极拳习练者在桩功过程中中枢与外周“自上而下”与“自下而上”双向交互机制, 探究太极拳对人体机能的调节机理。**方法:** 本研究共募集了 30 名健康男性受试者 (56.9±11.18 岁, 77.3±8.9 公斤, BMI: 26.2±2.4)。实验过程包括受试者以高架混元桩桩功姿态 10 分钟以及站姿静息状态 10 分钟。采用 Brite 24 (荷兰 Artinis) 便携式无线近红外脑成像采集设备对受试者前额皮层区域血氧变化数据进行记录, 该设备由 10 个近红外光发射探头与 8 个接收探头交替排布, 共同组成 24 个测量通道, 在 760nm 与 850nm 两种近红外光波长下实现对前额皮层 HbO₂ 与 HbR 浓度变化的监测。覆盖的脑区包括双侧额极区 (frontopolar area, FPA)、背外侧前额叶 (dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)、腹外侧前额叶 (ventrolateral prefrontal cortex, VLPFC)、额叶眼动区 (frontal eye fields, FEF) 以及前运动皮层 (pre-motor cortex, PMC)。同时采用运动心电 (electrocardiography, EKG) (美国 Delsys) 采集模块对心电及呼吸频率信号进行采集。近红外光谱信号采用修正后的朗伯-比尔定律进行血氧浓度变化计算, 并对血氧浓度变化的数据进行去运动伪迹、除心脏活动与呼吸带来的噪声、以及去除低频振荡以及基线漂移等预处理。采用一般线性模型和统计参数映射等方法对前额皮层各个脑区的血流动力学进行分析, 并采用相关性分析进行功能连接与小世界属性的计算。心电信号使用 Pan-Tompkins 方法进行 R 波峰值位置检测, 获得 R 波峰值出现的时间序列, 差分后得到 RR 间期时间序列 (IBI), 之后采用小波变换作为 IBI 序列时频域分析方法, 计算心率变异性的频域指标。有向信息转移的分析中, 前额神经活动特征选用各脑区的 HbO₂ 浓度变化时间序列, 计算自发神经活动频段 (0.01~0.1 Hz) 内瞬时能量时间序列作为指标, 并对各时间序列进行归一化计算。脑区内 HbO₂ 浓度变化时间序列为区域内分布的 fNIRS 通道 HbO₂ 浓度变化时间序列的均值。心率变异性特征选用根据预处理后的 IBI 时间序列计算的心率时间序列 (heart rate, HR), 心率变异性高频瞬时能量 (HRV-HF)、低频瞬时能量 (HRV-LF)

时间序列, 心率变异性低频与高频瞬时能量比值 (LF/HF) 时间序列作为指标, 并对各时间序列进行归一化计算。呼吸特征根据呼吸间隔时间序列计算呼吸频率的时间序列作为指标, 并对时间序列进行归一化计算与数据插值。最终获得每位受试者包括心、脑、呼吸指标的 15 通道 \times 300 秒时间序列信号矩阵, 在一阶受试者水平计算转移熵值。根据转移熵 (transfer entropy, TE) 参数估计方法, 计算 15 个通道两两之间的转移熵, 作为一阶分析受试者水平的结果。进一步从统计学角度分析, 使用配对样本 T 检验, 计算桩功状态与静息状态相比各个通道之间转移熵均值水平差异, 衡量桩功状态对比静息状态由驱动通道向响应通道的信息流动变化情况。在统计显著性 $p < 0.05$ 下, 标注出信息转移发生显著变化的“驱动-响应”参数对。在此基础上, 构建中枢-外周生理信号有向加权网络, 并使用统计与复杂网络分析方法对比桩功与静息状态下中枢-外周生理信号转移以及拓扑网络属性, 探索太极桩功状态下中枢与外周神经网络的双向互动。**结果:** 1) 相比于站姿静息状态, 太极桩功状态下前额皮层血流动力学响应的变化与 HRV-HF 参数的差异存在显著关联的脑区。回归分析显示桩功状态下前额皮层的功能活动与 HRV-HF 在左半球呈现更显著的正相关关系, 主要包括左侧 DLPFC、左侧 VLPFC 等脑区。另外功能连接的结果显示在太极桩功状态下, 与 HRV-HF 具有显著正相关关系的功能连接数目增多, 并主要分布在左脑的脑区之间, 呈现出一定的左侧偏侧化; 同时, 跨左右脑的脑区之间的长程功能连接增多。2) 在太极桩功与站姿静息状态下, 由中枢到外周的转移熵均值大于由外周向中枢的转移熵均值, 信息主要由中枢流向外周方向。中枢作为驱动方“自上而下”地调节外周自主神经活动。然而与静息相比, 太极桩功状态下由外周向中枢的信息有向转移显著增加, 外周“自下而上”地影响中枢功能活动, 外周到中枢的信息转移主要由左侧脑的前额皮层接收, 尤其是与认知-情绪控制相关的脑区 (VLPFC、DLPFC)。3) 小世界属性的分析表明太极桩功状态下全局属性中的全局聚类系数显著升高, 说明了中枢-外周生理网络中“集团化”程度升高, 桩功状态下节点之间的联系更为紧密。网络整体“集团化”程度升高, 节点与周围节点间的信息交流更为密集; 从节点属性角度看, 太极桩功状态下, 皮层区域的左侧 VLPFC、DLPFC, 右侧 DLPFC 以及 FPA 区域有显著升高的节点聚类系数以及节点局部效率, 在太极桩功的信息转移过程中显示出了较高的“集团化”。左侧 VLPFC 有显著升高的出度, 具有更多的信息流出; 左侧 VLPFC、DLPFC 以及右侧 DLPFC, FPA 具有显著升高的入度, 具有更多的信息流入。结合以上结果, 中枢与外周的互动机制可能是由于太极桩功增加了由外周 (包括呼吸与副交感-迷走神经活动) 向中枢的信息转移; 外周的信息主要向左侧的 VLPFC 与 DLPFC 转移, 影响左侧前额皮层的血流动力学响应与功能连接, 并通过由左向右的前额皮层之间的信息流动增强左右前额皮

层之间的功能耦合。**结论:** 从中枢-外周生理信号交互的结果来看, 在中枢-外周“自上而下”调控的前提下, 太极桩功“自下而上”地增强中枢认知-情绪调控相关区域(背外侧与腹外侧前额叶皮层)同外周自主神经活动的关联, 提高中枢-外周生理网络信息转移能力, 起到调节身心、改善情绪的作用。本研究结果从太极拳桩功状态下中枢-外周生理系统之间双向互动的角度为太极拳影响身-心健康的生理机制做了初步的探索, 为进一步科学解释中国的传统文化奠定了基础。