

文章编号: 1004-7220(2024)02-0285-08

视觉对人体姿势控制影响的脑功能网络连接机制

郭峰¹, 袁维帅², 王新¹, 夏雪莲¹, 董彤彤¹, 任迎慧¹

(1. 沈阳体育学院 运动健康学院, 沈阳 110102; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: **目的** 研究视觉对人体姿势控制影响及其脑功能网络连接机制。**方法** 以15名健康青年为研究对象, 要求受试者分别进行30 s睁眼、闭眼的双腿站立平衡, 采集平衡过程中身体压力中心(center of pressure, COP)和脑电。对COP进行样本熵(SampleEn)计算; 对脑电 θ 、 α 和 β 频段, 计算相位滞后指数(phase lag index, PLI)构建大脑功能网络, 并基于图论计算集聚系数(C)、特征路径长度(L)及小世界网络属性(σ)。**结果** 人体在双腿站立平衡过程中, 闭眼COP_y样本熵显著高于睁眼($P < 0.05$)。闭眼 α 频段PLI平均值显著高于睁眼($P < 0.05$); 闭眼 α 频段 C 、 σ 显著高于睁眼, L 显著低于睁眼($P < 0.05$)。闭眼时 α 频段额区-中央区-顶区之间的网络连接以及中央区和顶区内连接强度显著高于睁眼($P < 0.05$)。闭眼时 α 频段PLI平均值以及 C 值与COP_y样本熵中度呈中度负相关($P < 0.05$)。睁眼时左前额区、左顶区、左枕区 α 频段PLI平均值与COP_y样本熵呈中度负相关; 闭眼时左中央区、右枕区 α 频段PLI平均值则与COP_y样本熵呈中度负相关。**结论** 人体在站立平衡时, 当没有视觉信息输入时, 身体平衡稳定性下降, 同时伴随着脑电 α 频段的脑网络连接增强以及大脑处理信息的效率需提升。人体在不同的视觉条件下进行姿势控制时, 大脑会采用不同的神经策略。

关键词: 静态平衡; 视觉; 大脑功能网络; 图论; 脑电

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.02.014

Connection Mechanism of Brain Functional Networks under Impact of Vision on Human Postural Control

GUO Feng¹, YUAN Weishuai², WANG Xin¹, XIA Xuelian¹, DONG Tongtong¹, REN Yinghui¹

(1. College of Sport and Health, Shenyang Sport University, Shenyang 110102, China; 2. First Marine Institute, Department of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China)

Abstract: **Objective** To study the effects of vision on human postural control and the connection mechanisms of the brain's functional network. **Methods** 15 healthy male adults were required to perform 30 s of balanced standing on both legs with eyes open and eyes closed. The center of pressure (COP) and electroencephalograph (EEG) were recorded during balance. The sample entropy (sample En) of the COP was calculated. The phase lag index (PLI) in θ -, α -, β -band of EEG was calculated to construct the brain functional networks, and the clustering coefficient (C), characteristic path length (L), and the criteria (σ) of the small-world network were calculated based on graph theory. **Results** During balanced standing on both legs, the SampleEn of the COPY with eyes closed was significantly higher than that with eyes open ($P < 0.05$). The mean value of PLI in the α -band under the eyes closed state was significantly higher than that under the eyes open state ($P < 0.05$). The C and σ values in the α -band under the eyes closed state were significantly higher than those

收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF0300502), 辽宁省教育厅基本科研项目重点项目(JYTZD2023133), 辽宁省自然科学基金面上项目(2022-MS-415)

通信作者: 郭峰, 教授, E-mail: guofeng_first@163.com

under the eyes open state, and the L value was significantly lower than that under the eyes open state ($P < 0.05$). The frontal-central-parietal connectivity and the central-parietal connectivity strength in the α -band under the eyes closed state were significantly higher than those under the eyes open state ($P < 0.05$). The average PLI and C values in the α -band were moderately negatively correlated with the SampleEn of COP_{γ} ($P < 0.05$). The average PLI of the left prefrontal area, left parietal area, and left occipital area in the α -band under the eyes closed state had a moderate negative correlation with the SampleEn of COP_{γ} . The average PLI of the left central region and the right occipital area in the eyes-closed state was moderately negatively correlated with the SampleEn of COP_{γ} . **Conclusions** During the standing balance, when there is no visual input, the stability of body balance decreases, accompanied by enhanced brain network connectivity in α -band and the requirement for efficiency enhancement in information processing in the brain. The brain adopts different neural strategies when performing postural control under various visual conditions.

Key words: static balance; vision; brain functional network; graph theory; electroencephalograph

姿势控制对于正常人的生活行为必不可少,尤其在维持人体正常的活动行为方面至关重要。姿势控制是一个复杂系统,在这个系统中,中枢神经系统协调和处理来自视觉、前庭系统以及本体感觉系统的信息^[1]。研究表明,视觉系统在姿势控制中起重要的作用,在没有视觉信息输入的情况下,姿势摆动会增加^[2]。视觉功能障碍患者更加依赖本体感和前庭系统的信息输入,以补偿视觉功能低下引起的姿势稳定性下降^[3]。因此,视觉受限会增加身体摇摆和姿势不稳定。

越来越多的证据表明,人类大脑是一个网络,可以将脑网络抽象化为一个图,其中节点代表大脑区域,边代表它们之间的相互连接,即图论^[4]。目前,大脑功能网络连接在姿势控制的研究中相对较少。本文主要通过图论以及相位滞后指数(phase lag index, PLI)来表征脑网络连接。首先,通过无创的头皮脑电(electroencephalograph, EEG)数据重建脑网络,利用 EEG 信号的高时间分辨率,重建在姿势控制任务中发挥作用的皮层网络机制;采用对体积传导效应不敏感的 PLI 评价大脑局部皮层之间或内部的功能性网络连接情况^[5];另外,对 PLI 构建的大脑功能网络,使用基于图论的方法来评价大脑功能网络连接状态。

在姿势控制的研究中,身体压力中心(center of pressure, COP)的变化通常作为评价平衡稳定性的重要指标。熵算法是量化数据信息的手段之一,可以更准确地评估运动中的变异性^[6]。研究表明,身体 COP 样本熵的变化与执行姿势任务的难易程度有关,身体摆动越大,摇摆信号的样本熵值越大^[7]。

因此,本文将 COP 样本熵作为评价平衡能力的指标,观察人体在不同视觉条件下站立平衡过程中身体 COP 样本熵与脑网络连接之间是否存在相关性,以及哪些脑区参与其中,进而阐明视觉信息输入对人体站立姿势影响的大脑功能网络调节机制。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

招募 15 名健康成年人(男 7 人,女 8 人),身高(167.8 ± 8.7) cm,体质量(62.4 ± 10.1) kg,年龄(20.8 ± 4.3)岁。要求受试者没有下肢肌肉损伤、视力正常。实验前 24 h 没有进行过大强度训练。实验前向所有受试者说明具体的实验过程,并签署知情同意书。本研究得到沈阳体育学院伦理委员会的批准。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计 采用组内设计,要求受试者分别在睁眼与闭眼条件下,赤脚站在平衡仪上进行双脚站立平衡。每个视觉条件下的平衡控制持续 30 s,在平衡控制过程中要求受试者注意力集中。睁眼时,双眼目视前方的 1 个固定点。在站立平衡的过程中,同步采集受试者的 EEG。

1.2.2 实验器材和材料 64 导联脑电记录仪(ANT Neuro, Enschede 公司,荷兰)、便携式平衡仪(HUMAC Balance, Computer Sports Medicine 公司,美国)、脑电膏(GT50,武汉格林泰克科技有限公司)。

1.2.3 数据采集与处理

1.2.3.1 平衡数据采集与处理

受试者按照要求站在平衡仪的标准位置后,执行

双腿静态平衡任务,同时开始记录数据。平衡数据的采样频率为 100 Hz,采样时间为 30 s。为了评价受试者站立平衡任务过程中平衡稳定性,选取了 COP 在 X、Y 轴上位移的样本熵 (SampleEn)。X、Y 轴为身体的左右和前后方向,分别用 COP_x 和 COP_y 表示。

1.2.3.2 EEG 数据采集与处理

采用 ANT 脑电仪采集受试者在站立平衡控制过程中 EEG,电极配布基于国际 10-20 系统的 64 导联。在测试前,受试者洗头,佩戴好脑电帽后,在每个电极点注入导电膏,使每个电极点的电极阻抗都降到 5 k Ω 以下。EEG 采样频率为 2 kHz,带通滤波范围 0.1~100 Hz。接地电极位于脑电帽 FPz 与 Fz 电极之间的位置,参考电极为 CPz 点。

为了进行 PLI 计算,需要对 EEG 进行预处理,EEG 信号预处理使用基于 Matlab 语言环境开发的 EEGLab 工具箱,具体操作过程如下:① 将 EEG 进行 3~30 Hz 的 Butterworth 四阶带通滤波;② 将 EEG 进行 250 Hz 降采样处理;③ 将 EEG 数据按照 1 s 的长度进行分段;④ 对数据进行全脑平均再重参考;⑤ 对初步处理的数据进行独立成分分析,去掉 EEG 中的眼电、肌电、心电、动作伪迹等干扰成分;⑥ 对数据使用阈值法再次去除伪迹,阈值标准为 $\pm 80 \mu V$,在该标准下没有坏的分段数据被去除,15 名受试者均保留 30 段;⑦ 将每个受试者的 EEG 进行数字滤波,分成 3 个频率带频段,分别为 θ 频段 (4~8 Hz)、 α 频段 (8~13 Hz)、 β 频段 (13~30 Hz)。

1.2.3.3 COP 样本熵计算

根据 Richman 等^[8]对近似熵改进的方法计算样本熵。在 Matlab 2013b 中编写 SampleEn 运算程序。数据长度 $N=3\ 000$ (采样频率为 100 Hz,采样时间为 30 s),计算 SampleEn 时维数 $m=2$,阈值 $r=0.1$ 。

1.2.3.4 EEG 信号的 PLI 计算

PLI 的算法根据 Stam 等^[9]的方法。分别计算 θ 、 α 、 β 频段 PLI。为了观察不同 EEG 频段信号的总体脑网络连接情况,将该频段下所有不同 EEG 通道之间的脑网络连接强度 PLI 进行全脑平均,即为 PLI 平均值。

另外,为了观察大脑区域间、区域内的功能网络连接,对大脑功能网络进行分区,在 Wu 等^[5]脑分区基础之上,将大脑为左右前额区、左右颞区、

左右中央区、左右顶区、左右枕区 (见图 1)。对于区域间,对两两区域再做配对连接,构成区域间网络连接;而对于区域内大脑功能网络连接,对每个脑区内的两个通道之间求 PLI,全部两两通道之间的 PLI 平均值代表某个脑区内的功能连接强度。

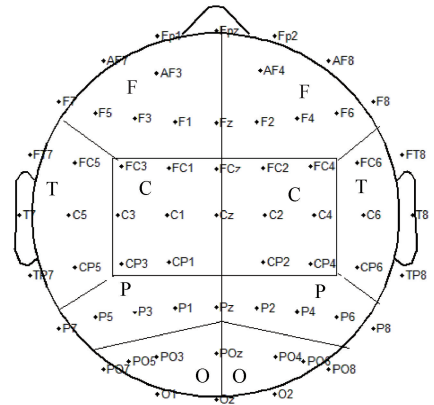


图 1 大脑分区及分区内电极分布

Fig. 1 Brain regions and distributions of electrodes within each region

注:F、C、P、O、T 分别表示额区、中央区、顶区、枕区、颞区。上方为鼻前,下方为枕后。

1.2.4 基于图论的脑功能网络计算 基于图论的方法,大脑的网络连接可以简化为节点和边的集合^[10]。构建 61 个节点的集合,节点两两配对连接构建边的集合,使用 PLI 对边的集合加权,得到 61×61 的 PLI 加权邻接矩阵。邻接矩阵中的每个元素 W_{ij} 用来表示节点 i 和节点 j 之间边的权值,权值越大,表示两个节点之间的连接强度越大,且已知 $0 \leq PLI \leq 1$,故 $0 \leq W_{ij} \leq 1$ 。

首先,计算该网络的集聚系数 (clustering coefficient, C) 与特征路径长度 (characteristic path length, L)。 C 与 L 是用来量化网络特征的常用指标。有序的网络具有高 C 值和高 L 值,无序的网络具有低 C 值和低 L 值^[11];而被认为最佳网络的小世界网络,具有高 C 值和低 L 值,有多个局部连接和少数长距离连接,这表示可以用少量的连接处理更高效的信息^[12]。本研究中, C 和 L 的计算采用 Newman^[13]提出的方法,而小世界属性 σ 的计算按照 Humphries 等^[14]的方法。

1.3 统计学分析

使用 SPSS 19.0 进行统计学分析。视觉条件 (睁眼和闭眼) 对 COP、大脑功能网络连接 PLI、反映

大脑功能网络特征的 C 、 L 及 σ 的影响,经 K-S 检验后,这些变量呈正态分布,使用配对样本 t 检验,数据使用(平均数 \pm 标准差)表示。对于大脑区域间 PLI 的多重比较,采用 Tukey 法对 P 值进行校正。另外,将不同视觉站立平衡条件下的全脑 PLI 平均值、区域内 PLI 平均值、 C 、 L 与 COP_y 样本熵进行相关分析。鉴于这些变量呈正态分布,彼此之间呈线性且每个数据点之间独立,故采用 Pearson 相关性分析法。并且将区域内 PLI 平均值与 COP_y 的 SampleEn 相关性用脑拓扑分布图展示。

2 结果

2.1 睁眼和闭眼站立平衡时 COP 变化

睁眼站立与闭眼站立相比, COP_y 样本熵有显著性差异($t = -3.1434$, $P = 0.0051$),表现为闭眼状态显著高于睁眼状态;而 COP_x 样本熵无显著性差异($t = -0.257$, $P = 0.8009$)。且两种状态下均表现为 COP_y 均显著大于 COP_x ($P < 0.0001$),见图 2(a)。

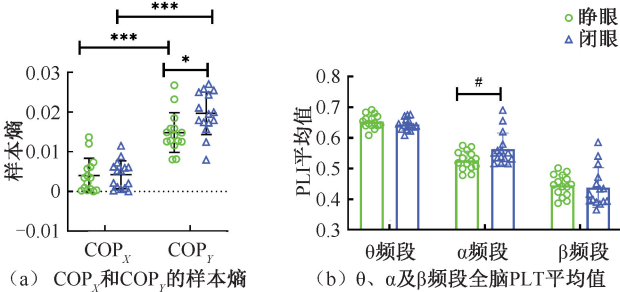


图2 不同视觉状态下双腿站立平衡过程中 COP 样本熵以及不同频段脑波 PLI 平均值变化

Fig. 2 Modulation of COP sample entropy and the mean value of PLI of brain wave in different frequency bands during standing balance with two legs under different visual states

(a) SampleEn of COP_x and COP_y , (b) Average PLI in θ -, α -, β -bands

注:*表示 COP_y 比较, $P < 0.05$; ***表示 COP_x 与 COP_y 相比, $P < 0.0001$; #表示 α 频段比较, $P < 0.05$ 。

2.2 睁眼和闭眼站立平衡控制过程中脑功能网络连接的变化

在不同视觉条件下,比较不同频段全脑 PLI 平均值发现,睁眼与闭眼之间, α 频段的全脑平均连接强度有显著性差异($t = -2.5137$, $P = 0.0248$),而在 θ 、 β 频段无显著性差异[见图 2(b)]。

在 α 频段,睁眼站立平衡时的 C 显著低于闭眼时($t = -2.4855$, $P = 0.0262$),而睁眼站立平衡时 L 显著高于闭眼状态($t = 2.5838$, $P = 0.0216$),睁眼站立平衡时 σ 低于闭眼状态($t = -2.5173$, $P = 0.0246$)。在 θ 、 β 频段, C 、 L 、 σ 均没有显著性差异(见表 1)。

表 1 不同视觉状态下站立平衡过程中不同频段脑电 C 、 L 及 σ 比较
Tab. 1 Comparison of C , L , and σ at different EEG frequency bands during standing balance under different vision states

频段		睁眼	闭眼
θ	C	0.662 3 \pm 0.022 5	0.653 0 \pm 0.020 3
	L	1.507 8 \pm 0.051 4	1.528 7 \pm 0.047 1
	σ	1.000 4 \pm 0.000 2	1.000 4 \pm 0.000 3
α	C	0.533 5 \pm 0.030 8	0.570 5 \pm 0.052 9*
	L	1.873 0 \pm 0.108 0	1.757 3 \pm 0.147 4*
	σ	1.000 6 \pm 0.000 2	1.001 1 \pm 0.000 8*
β	C	0.450 4 \pm 0.035 7	0.442 6 \pm 0.064 0
	L	2.222 6 \pm 0.178 4	2.282 8 \pm 0.299 6
	σ	1.001 0 \pm 0.000 5	1.001 4 \pm 0.000 9

注:*表示与睁眼状态相比, $P < 0.05$ 。

本文结果表明,睁眼和闭眼下站立平衡时,在 α 频段大脑功能网络的多个参数差异有统计学意义。因此,对该波段的大脑网络连接情况做进一步分析。闭眼状态,下脑网络连接强度更高。闭眼状态下站立平衡时,有 5 个区域间的网络连接强度显著高于睁眼状态($P < 0.01$),见图 3。

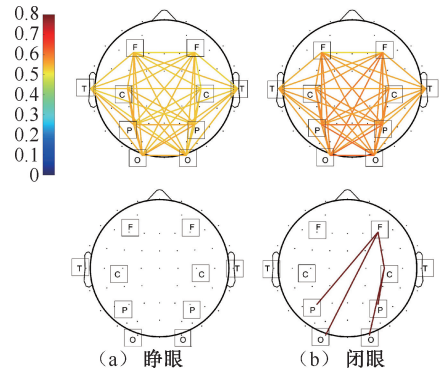


图3 不同视觉状态下站立平衡过程中 α 频段区域间脑功能网络连接及统计学差异

Fig. 3 brain functional network connectivity and statistic significance in α -band during standing balance under different vision states

(a) Eyes open state, (b) Eyes closed states

注:红色连接线表示 $P < 0.01$ 。

同时,对睁眼和闭眼状态下平衡站立过程中 α 频段的区域内 PLI 平均值做配对样本 t 检验。结果表明,闭眼时左、右侧中央区和右侧顶区 PLI 平均值显著高于睁眼 ($P < 0.05$),见图 4。

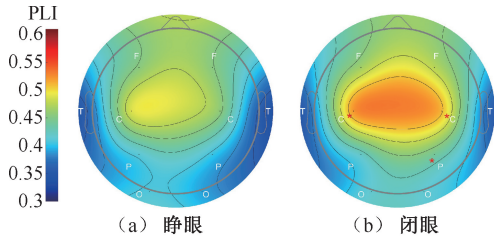


图 4 不同视觉状态下站立平衡过程中 α 频段区域内 PLI 平均值叠加拓扑图

Fig. 4 Overlay topography of average PLI in α -band during standing balance under different vision states

(a) Eyes open state, (b) Eyes closed states

注:红色星号表示两种视觉状态下站立平衡时 PLI 比较, $P < 0.05$ 。

2.3 睁眼和闭眼站立平衡条件下大脑功能网络连接与 COP 样本熵相关性

采用 Pearson 相关分析法对睁眼和闭眼状态下 α 频段全脑功能网络连接的 PLI 平均值、 C 、 L 与 COP_y 样本熵进行相关性分析。结果显示,闭眼状态下站立时, COP_y 样本熵与 α 频段全脑 PLI 平均值呈现中度负相关($r = -0.5824, P = 0.0227$)、与 C 呈现中度负相关($r = -0.5806, P = 0.0232$)、与 L 呈现中度正相关($r = 0.6184, P = 0.0140$),且都具有统计学意义。而在睁眼状态下站立时,上述相关系数不具有统计学意义(见图 5)。

进一步对大脑不同区域内 α 频段的 PLI 平均值与 COP_y 样本熵进行 Person 相关性进行分析。相关系数及其系数的拓扑图分布见表 2 和图 6。

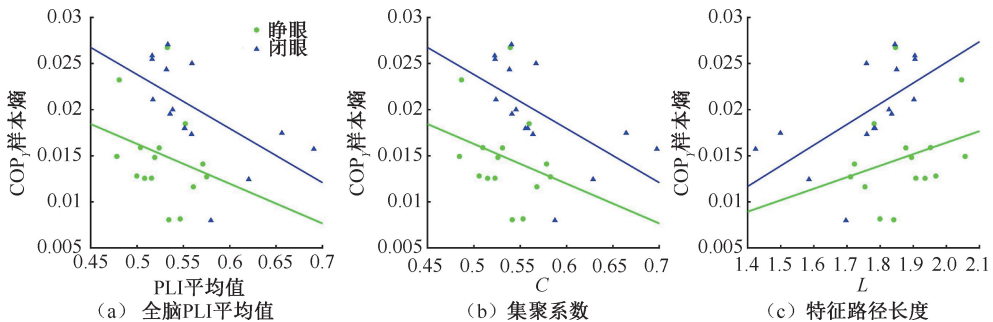


图 5 不同视觉状态下站立平衡过程中 α 频段大脑功能网络连接与 COP_y 样本熵之间的相关性

Fig. 5 Correlations of brain functional network connectivity with SampleEn of COP_y in α -band during standing balance under different vision states (a) Whole-brain grand average PLI, (b) Clustering coefficient, (c) Characteristic path length

注:红色、蓝色实线分别为闭眼、睁眼状态下站立平衡时两变量之间的拟合直线。

表 2 不同视觉状态下站立平衡过程中不同脑区内 α 频段 PLI 平均值与 COP_y 样本熵相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between mean PLI at different brain regions in α -band and sample entropy of COP_y standing balance under different vision states

脑区	睁眼		闭眼		脑区	睁眼		闭眼	
	r	P	r	P		r	P	r	P
F(L)	-0.5605*	0.0297	-0.3363	0.2204	T(R)	-0.3936	0.1467	-0.1718	0.5403
F(R)	-0.1837	0.5123	-0.5038	0.0555	P(L)	-0.6457*	0.0093	0.0223	0.9371
T(L)	-0.3584	0.1896	-0.4521	0.0907	P(R)	-0.1592	0.5709	-0.4644	0.0811
C(L)	-0.2751	0.3210	-0.6842*	0.0049	O(L)	-0.5351*	0.0399	-0.4968	0.0596
C(R)	-0.2296	0.4105	-0.3020	0.2739	O(R)	-0.2480	0.3728	-0.5308*	0.0418

注:F(L)和F(R)分别表示左、右侧额区,T(L)和T(R)分别表示左、右侧颞区,C(L)和C(R)分别表示左、右侧中央区,P(L)和P(R)表示分别左、右侧顶区,O(L)和O(R)分别表示左、右侧枕区。* $P < 0.05$ 。

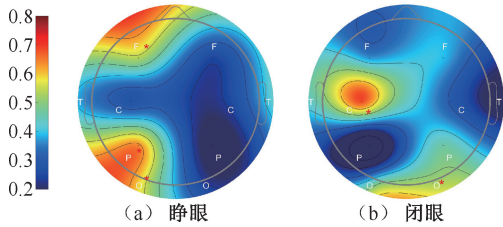


图6 不同视觉状态下双腿站立平衡过程中 α 频段区域内PLI平均值与 COP_Y 样本熵相关性在大脑的拓扑分布

Fig. 6 Topography distributions of average PLI and COP_Y sample entropy correlation in α -band during standing balance under different vision states (a) Eyes open state, (b) Eyes closed states

注:红色表示相关性强,蓝色表示相关性弱;红色星号表示相关性比较, $P < 0.05$ 。

3 分析

3.1 睁眼和闭眼平衡条件下COP变化

本文使用样本熵评估人体在站立平衡过程中COP轨迹的变化。结果显示,闭眼状态下的 COP_Y 样本熵大于睁眼状态。因此,本文认为,在闭眼状态下身体前后方向的COP变异程度大于睁眼状态,该结果与Franco等^[15]的研究一致。Franco等^[15]研究发现,在闭眼条件下人体姿势平衡控制受到的挑战更大,表现为COP样本熵随着平衡控制难度的增加而增加高。本文结果表明,在缺乏视觉输入时,人体双腿站立平衡过程中在前后方向上身体摆动幅度增加。视觉在维持身体平衡中具有重要的作用^[16]。当在姿势控制过程中失去视觉信息输入时,机体的平衡控制能力下降。与有视觉的被试相比,盲人的平衡控制能力较差,表现出更大的COP摆动^[17]。

3.2 睁眼和闭眼站立平衡条件下脑功能网络连接的变化

实际上,在睁眼和闭眼状态下,大脑功能网络存在很大的差异。Xu等^[18]使用核磁共振成像技术研究静息态睁眼和闭眼时大脑功能网络变化,结果发现,睁眼和闭眼时大脑会有两种不同的信息处理模式,其中睁眼状态下C值高于闭眼,但L值无显著差异。另外,有研究使用EEG脑成像技术发现,静息态闭眼时 α 频段的C值高于睁眼,L值低于睁眼^[19]。Huang等^[20]探究了人体平衡控制过程中脑

网络连接发生的变化,结果发现,随着平衡控制难度的增加,大脑功能网络连接增强。本文结果显示,人体在睁眼状态下维持身体直立平衡时, α 频段的PLI平均值低,C值低,L值高;在闭眼时,则相反。而且睁眼和闭眼状态下维持直立平衡过程中的脑功能网络均符合典型小世界网络特征,即 $\sigma > 1$,且闭眼状态下的 σ 显著大于睁眼,表明闭眼状态下维持直立平衡时脑网络的小世界属性更强。这两种特征表明,闭眼状态下直立平衡控制过程中大脑功能网络连接强度高于睁眼,且密度大、整体积分值小、脑网络的小世界属性更强,说明人体在闭眼状态下大脑需要处理更加复杂的信息来维持平衡。同时,区域间大脑功能网络连接的结果表明,闭眼直立平衡时大脑枕叶、顶叶与大脑右额叶、右中央区间在 α 频段的连接强度增大,且闭眼时大脑中央区、右顶叶区域内PLI平均值增高。目前的EEG研究表明,人体在维持直立静态平衡过程中会有多个脑区参与,其中顶枕区、额中央区和枕叶参与了视觉对平衡控制的影响^[21]。本文认为,相对睁眼,闭眼时机体要更多地将本体感觉、前庭感觉传递给中枢系统,使得大脑处理信息的复杂度变高,引起 α 频段大脑网络功能连接增强^[3];而在睁眼状态下,视觉系统给中枢传递了稳定的信息,促进身体达到稳定的平衡,对身体感觉传递的信息依赖小,大脑处理信息量相对较少。从区域大脑功能网络连接来看,闭眼时机体更多地依赖本体感觉信息传入来维持身体平衡,此时 α 频段的右额叶、右中央皮层与顶枕叶皮层的脑网络连接增强,同时中央皮层和右顶叶皮层间的连接增强,这意味着闭眼时感觉运动皮层和运动皮层的活动均增强,且多个区域间的连接也增强,而这些脑区在平衡姿势控制中发挥着重要的作用^[22-23]。

3.3 睁眼和闭眼状态下站立平衡时脑功能网络连接与COP的关系

本文结果显示,在不同的视觉条件下,平衡控制过程中的COP显著性差异主要发生在身体前后方向(Y轴),同时全脑的PLI平均值差异主要发生在 α 频段。基于此,本文主要观察了不同脑区EEG信号的 α 频段PLI平均值与 COP_Y 样本熵之间的相关性。结果表明,闭眼时 α 频段的PLI平均值越高、C值越高、L值越低,其平衡稳定性越好,说明闭

眼时 α 频段的脑网络连接越强,信息传递效率越高,机体的平衡稳定性越好。而睁眼时大脑功能网络连接似乎与平衡控制的相关性较低。这与以往研究一致^[24],即姿势控制与 α 频段脑网络连接特征密切相关。姿势控制是一个复杂系统,在这个系统中,中枢神经系统需要协调和处理大量的信号,包括视觉信息、前庭系统的空间方向信息,再到肌肉的本体感觉反馈信息^[25]。机体在没有视觉信息输入时,更多地靠前庭感觉和本体感觉提供信息以维持身体平衡,这使得机体控制平衡的难度加大。因此,在闭眼状态下,大脑的网络连接强度越高,大脑处理信息的能力越强,其平衡控制就越好。Barollo 等^[26]使用 EEG 脑源连接方法评价了人体在静态平衡控制过程中脑源网络连接与 COP 样本熵之间的关系,也发现在闭眼状态下身体前后轴方向 COP 样本熵与 α 频段脑源连接的强度之间密切相关,且主要发生在顶区和颞区皮层,这与本文结果一致。前顶叶皮层是接受本体感觉信号的主要脑区,后顶叶皮层是多感觉整合的中枢,对视觉、听觉和前庭的输入信息做出反应,并参与运动计划功能,在平衡控制中起到重要作用,尤其是在无视觉信息输入而依靠本体感觉维持平衡的条件下^[27]。

从区域内大脑功能网络连接与 COP_y 样本熵的相关性结果来看,闭眼时 α 频段的左中央皮层、左枕叶皮层区域内连接强度越强,平衡稳定性越好;睁眼时左额叶皮层、左顶枕叶皮层各区域内的连接强度越强,平衡稳定性越好。同时,值得注意的是,睁眼状态时大脑皮层与平衡控制密切相关的脑区比闭眼状态时多,但睁眼状态时脑整体功能网络连接却与平衡控制的相关性较弱。因此,本文认为,相对于睁眼状态,在闭眼缺乏视觉系统的信息输入时,大脑需要调动更多脑区参与平衡调控,提示闭眼时大脑多区域的同步活动会增强,这种同步活动越强,平衡越好;而睁眼时,大脑参与平衡控制的区域相对较少,不需被激活额外脑区就足以维持身体平衡稳定性。另外,在睁眼状态下维持平衡时,额区脑网络连接与身体前后方向摆动关系密切,这可能与在睁眼条件下对人体直立姿势调整主要位于额叶 α 频率带的注意网络有关^[26]。

4 结论

与睁眼状态相比,健康受试者在闭眼状态下维

持平衡时其身体前后方向的 COP 样本熵变大,同时伴随着更高的 α 频段全脑 PLI 平均值、 C 值、 σ 值和更低的 L 值。另外,该 COP 样本熵与 α 频段全脑 PLI 平均值、 C 、 L 呈显著相关,且在不同视觉条件下,大脑区域内 α 频段 PLI 值与 COP 样本熵相关性呈现不同脑区特征。该结果提示,人体在闭眼条件下平衡控制难度增大,同时伴随着 α 频段脑网络连接增强以及大脑处理信息的效率需提升。另外,人体在不同视觉条件下进行姿势控制时,大脑会采用不同的神经策略:睁眼状态下, α 频段左前额区、左顶-枕区的区域内网络连接越强;闭眼状态下,主要表现为 α 频段大脑左中央区、右枕区各区域内网络连接增强。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:郭峰负责研究设计、数据分析及论文撰写;袁维帅负责程序编程及实验数据采集;王新负责论文指导与修改;夏雪莲、董彤彤、任迎慧负责数据采集、分析以及文献整理。

参考文献:

- [1] 赵晨曦,朱文斐,孙方君,等. 老年人身体活动及久坐时间与静态平衡能力的相关性[J]. 医用生物力学, 2022, 37(5): 839-845.
ZHAO CX, ZHU WF, SUN FJ, et al. Correlation of physical activity, sedentary time with static balance ability in older adults [J]. J Med Biomech, 2022, 37(5): 839-845.
- [2] HSU WL, SCHOLZ JP, SCHÖNER G, et al. Control and estimation of posture during quiet stance depends on multijoint coordination [J]. J Neurophysiol, 2007, 97(4): 3024-3035.
- [3] FRIEDRICH M, GREIN HJ, WICHER C, et al. Influence of pathologic and simulated visual dysfunctions on the postural system [J]. Exp Brain Res, 2008, 186(2): 305-314.
- [4] BULLMORE E, SPORNS O. Complex brain networks: Graph theoretical analysis of structural and functional systems [J]. Nat Rev Neurosci, 2009, 10(3): 186-198.
- [5] WU J, ZHANG J, DING X, et al. The effects of music on brain functional networks: A network analysis [J]. Neuroscience, 2013(250): 49-59.
- [6] COSTA M, GOLDBERGER AL, PENG CK. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series [J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(6): 068102.
- [7] 程宇琦,王新. 基于多尺度熵方法对我国自由式滑雪空中技

- 巧运动员静态平衡控制能力的研究 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 132.
- [8] RICHMAN JS, MOORMAN JR. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy [J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2000, 278(6): H2039-2049.
- [9] STAM CJ, NOLTE G, DAFFERTSHOFER A. Phase lag index: Assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources [J]. Hum Brain Mapp, 2007, 28(11): 1178-1193.
- [10] STAM CJ, HAAN W, DAFFERTSHOFER A, *et al.* Graph theoretical analysis of magnetoencephalographic functional connectivity in Alzheimer's disease [J]. Brain, 2009, 132(Pt 1): 213-224.
- [11] WIJK BC, STAM CJ, DAFFERTSHOFER A. Comparing brain networks of different size and connectivity density using graph theory [J]. PLoS One, 2010, 5(10): e13701.
- [12] WATTS DJ, STROGATZ SH. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [13] NEWMAN ME. Properties of highly clustered networks [J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2003, 68(2 Pt 2): 026121.
- [14] HUMPHRIES MD, GURNEY K, PRESCOTT TJ. The brainstem reticular formation is a small-world, not scale-free, network [J]. Proc Biol Sci, 2006, 273(1585): 503-511.
- [15] FRANCO C, FLEURY A, DIOT B, *et al.* Applying entropy to human center of foot pressure data to assess attention investment in balance control [J/OL]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2018, doi: 10.1109/EMBC.2018.8513533.
- [16] SAFTARI LN, KWON OS. Ageing vision and falls: A review [J]. J Physiol Anthropol, 2018, 37(1): 11.
- [17] JEKA JJ, EASTON RD, BENTZEN BL, *et al.* Haptic cues for orientation and postural control in sighted and blind individuals [J]. Percept Psychophys, 1996, 58(3): 409-423.
- [18] XU P, HUANG R, WANG J, *et al.* Different topological organization of human brain functional networks with eyes open versus eyes closed [J]. NeuroImage, 2014(90): 246-255.
- [19] MIRAGLIA F, VECCHIO F, BRAMANTI P, *et al.* EEG characteristics in " eyes-open " versus " eyes-closed " conditions: Small-world network architecture in healthy aging and age-related brain degeneration [J]. Clin Neurophysiol, 2016, 127(2): 1261-1268.
- [20] HUANG CY, LIN LL, HWANG IS. Age-related differences in reorganization of functional connectivity for a dual task with increasing postural destabilization [J]. Front Aging Neurosci, 2017(9): 96.
- [21] MALCOLM BR, FOXE JJ, JOSHI S, *et al.* Aging-related changes in cortical mechanisms supporting postural control during base of support and optic flow manipulations [J]. Eur J Neurosci, 2021, 54(12): 8139-8157.
- [22] SLOBOUNOV S, HALLETT M, STANHOPE S, *et al.* Role of cerebral cortex in human postural control: An EEG study [J]. Clin Neurophysiol, 2005, 116(2): 315-323.
- [23] ADKIN AL, QUANT S, MAKI BE, *et al.* Cortical responses associated with predictable and unpredictable compensatory balance reactions [J]. Exp Brain Res, 2006, 172(1): 85-93.
- [24] MIERAU A, PESTER B, HÜLSDÜNKER T, *et al.* Cortical correlates of human balance control [J]. Brain Topogr, 2017, 30(4): 434-446.
- [25] MERGNER T, MAURER C, PETERKA RJ. A multisensory posture control model of human upright stance [J]. Prog Brain Res, 2003(142): 189-201.
- [26] BAROLLO F, HASSAN M, PETERSEN H, *et al.* Cortical pathways during postural control: New insights from functional EEG source connectivity [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2022(30): 72-84.
- [27] DELHAYE BP, LONG KH, BENSMAIA SJ. Neural basis of touch and proprioception in primate cortex [J]. Compr Physiol, 2018, 8(4): 1575-1602.