

· 技术与方法 ·

ROAST软件定量分析tDCS治疗过程中电极位置误差影响

刘习杰¹, 谭云华²

¹宜春学院物理科学与工程技术学院, 江西 宜春 336002; ²北京大学电子学院, 北京 100871

[摘要] 目的:用计算机模型工具来研究经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)临床治疗问题,将真实体积逼近模拟经颅电刺激法(realistic volumetric-approach to simulate transcranial electric stimulation, ROAST)以观察tDCS临床治疗过程中的电极位置误差,并从电极位置误差定量分析tDCS临床疗效性问题。方法:以F3、F4位置治疗抑郁为例,仿真计算颅内靶区所激励电场剂量,对比tDCS治疗电极位置误差对颅内治疗靶区电场剂量产生的影响,并给出施加2 mA和4 mA电流时电场剂量变化曲线。结果:仿真显示32种物理位置误差,矩形电极,圆形电极分别造成电场剂量变化是-10.3%~72.4%, -12.9%~11.3%,既有减少也有增加;此结果正是由于大脑皮质具有非均匀性。当电场剂量减少时,颅内靶区会出现小于有效电场剂量的情况,因此有可能出现tDCS临床治疗疗效不好。仿真还发现当tDCS施加4 mA时,颅内靶区均会大于有效电场剂量,且32种误差位置在颅内靶区电场剂量变化规律和施加2 mA时基本一致,电场剂量变化程度与施加电流大小基本无关。结论:ROAST可为临床一线医生寻找tDCS治疗的个体剂量和优化方案。

[关键词] 经颅直流电刺激;神经调控;电场有限元数值方法

[中图分类号] R454.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2023)07-995-09

doi: 10.7655/NYDXBNS20230714

Quantitative analysis of the change of dose caused by the position deviation of tDCS electrodes with ROAST

LIU Xijie¹, TAN Yunhua²

¹Institute of Science and Technology, Yichun University, Yichun 336002; ²Institute of Applied Electronics, Peking University, Beijing 100871, China

[Abstract] **Objective:** This article aims to use computer model tools to discuss transcranial direct current stimulation (tDCS) for clinical treatment problems, applying ROAST (realistic volumetric - approach to simulate transcranial electric stimulation) to the analysis of the influence of electrode position errors in the tDCS clinical treatment, and quantitatively analyze effects from the position offsets. **Methods:** This study takes F3 and F4 as an example to treat depression, simulates and calculates the electric field dose excited in the intracranial target area, compares the influence of the electrode position errors on the intracranial treatment target electric field dose, and gives the electric field dose variation curve under application of 2 mA and 4 mA current. **Results:** The simulation shows among 32 kinds of physical position errors, the pad electrode and the disk electrode cause the electric field dose to vary from -10.3% to 72.4%, -12.9% to 11.3%, both decreasing and increasing; this result is due to the non-uniformity of the cerebral cortex. When the electric field dose is reduced, the electric field in intracranial target area will be low than the effective electric field dose, so it is possible that the clinical treatment effect of tDCS may not be good. The simulation also shows that when 4.0 mA is applied, the intracranial target area will produce an effective electric field dose. In addition, the variation of the electric field dose generated by 32 kinds of error positions in the intracranial target area is basically the same as that when 2 mA is applied. The degree of electric field dose change is consistent with the magnitude of the applied current It's roughly okay. The degree of electric field dose change is roughly irrelevant to the magnitude of the applied current. **Conclusion:** ROAST can be used to find the individual dose optimization of tDCS for clinical doctors.

[Key words] transcranial direct current stimulation(tDCS); neuromodulation; electric field finite element numerical method

[J Nanjing Med Univ, 2023, 43(07):995-1003]

经颅直流电刺激 (transcranial direct current stimulation, tDCS) 属于神经调控 (neuromodulation) 技术。随着对 tDCS 的广泛研究和临床试验, tDCS 作为一种潜在精神疾病物理性治疗, 受到越来越多的关注; 并因其非侵入的优势成为当前神经调控工程技术的热点应用领域。美国食品药品监督管理局 (FDA) 有报告认为 tDCS 是一种相对新颖、简单、便宜、较少设备依赖的脑刺激形式, 对于患者终身和慢性治疗更可行。从大量讨论 tDCS 临床治疗精神健康疾病的文献中, 看到对其各种不同角度的研究, Nitsche 等^[1]和 Bennabi 等^[2]研究了 tDCS 对抑郁症是否有改善作用。Herrera-Melendez 等^[3]的研究验证 tDCS 对精神分裂症、药物依赖上瘾有疗效性。Fregni 等^[4]临床试验了 tDCS 是否可增强记忆。此外, tDCS 具有缓解多种疼痛的潜力。Knotkova 等^[5]的研究指出多种慢性疼痛患者连续 5 d 接受 tDCS 治疗后, 患者自我评估疼痛减轻, 有镇痛效果, 其中含神经性疼痛、头痛。

然而, 有研究指出, tDCS 治疗临床效果可能因病患的差异导致可重复性较低^[6-7]。Herrera-Melendez 等^[3]也提到 tDCS 治疗效果的差异性和可重复性争议。本文认为电极放置物理位置误差是疗效不稳定的另一个因素, 通过 tDCS 治疗时颅内电场分布计算, 有助于分析并确保颅内目标区的电场能够高于有效刺激阈值, 从而判断和确定 tDCS 治疗的有效性。

围绕 tDCS 临床疗效可重复性质疑, 本文将真实体积逼近模拟经颅电刺激法 (realistic volumetric-approach to simulate transcranial electric stimulation, ROAST)^[8] 运用到此可重复性的辩论中, 从电极物理位置误差影响定量地分析疗效可重复性问题, 通过 tDCS 治疗时颅内电场数值分布图解, 准确检视 tDCS 治疗电场

强度, 确保颅内目标区的电场能够高于有效刺激阈值, 从而判断 tDCS 治疗对患者的有效性。

本文接下来将讨论在同一模型下计算不同电极位置电场。为此, 本研究以 F4 电极位置改变为例, 选择使用圆盘和矩形两类电极, 分析电极偏移对抑郁治疗的量化影响。

1 材料和方法

1.1 ROAST 完成数值计算的过程路径

为进行仿真计算评估电极位置变化如何造成治疗靶区电场强度的变化, 选择了开源软件 ROAST3.0^[8]。此仿真计算过程包括准备头颅 MRI 数据, MRI 数据进行脑组织分割, 导入 tDCS 电极三维设计文件, 合并生成网格数据, 利用网格数据进行电场有限元数值计算。这过程根本上是把 tDCS 治疗看作是一个关于头颅的麦克斯韦电场边值问题。

ROAST 在解头颅麦克斯韦电场边值问题时, 针对有限元数值计算路径上每一个步骤, 集成了最新的开源软件。图 1 概括性地呈现了 ROAST 完成数值计算的过程路径。ROAST 需在 Matlab 环境中运行使用。首先, ROAST 在 Matlab 中基于人头 MRI 构建分析模型, 借 SPM12 软件模块完成脑组织分割, 获得头部组织分割解剖结构; 接着用 Matlab 代码将电极的三维数据叠加在头部解剖结构模型上。然后 ROAST 集成 iso2mesh, 将合并了电极的头颅模型进行网格化。iso2mesh 是在 Matlab 环境有限元网格开源生成软件。最后, ROAST 通过 Matlab 环境运行 getDP, 数值求解电场有限元模型电流分布, 实现头颅的麦克斯韦电场边值问题数值求解。

由于所需开源软件已经集成好了, 通过 ROAST 以命令行方式对 tDCS 麦克斯韦电场边值问题进行

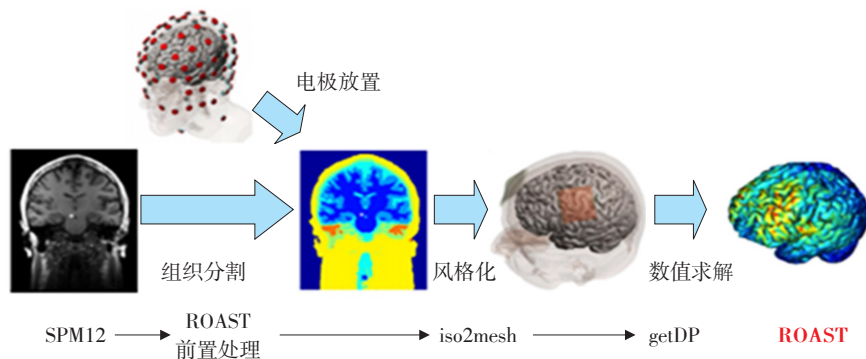


图1 ROAST 完成电场数值计算的途径

Figure 1 The path of ROAST to complete the numerical calculation of electric field

数值求解, 仅需输入单行命令即可选择患者的模型数据和所需治疗的电极位置, 以及临床治疗的电流剂量, 实现颅内电场的数值计算。

ROAST3.0 为最新版本, 可从 www.parralab.org 网站下载安装文件。ROAST 提供两种体素空间坐标, 允许将电极放置在头皮任意指定位置; 这一功能为本文研究电极位置偏移, 量化分析治疗靶区电场强度提供很大的便捷。

1.2 tDCS 电极放置

tDCS 是通过头皮上 1 对或多对电极间的弱直流电, 无创伤地刺激大脑皮层的兴奋性。tDCS 的刺激过程, 神经活动受其电场环境变化导致突触连接的持续增强或减弱, 会短暂形成一种突触可塑性现象。

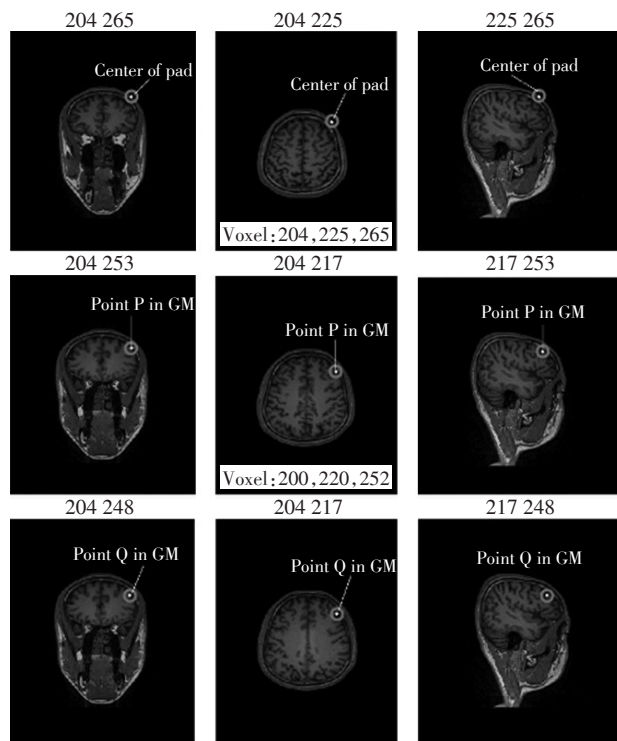
神经元上的调控刺激极性强弱, 根本上是由颅内电场空间分布决定, 与神经元所在空间位置相关。如果对颅内电场分布进行数值求解, 可以量化分析治疗靶区的电场强度是否变化, 再对比依据 Antal 等^[9]和 Francis 等^[10]研究给出的有效刺激阈值, 从中检查 tDCS 治疗有效性出现问题时的原因是否为颅内电场低于经验阈值 0.3 V/m, 或是能高于以往观察得出的经验值。这有助于深入理解 tDCS 治疗的有效性。

本文以 tDCS 治疗抑郁为例, 运用 ROAST 数值计算电极位置偏移后头颅内电场的分布结果, 讨论电极位置偏移对背外侧前额叶皮层 (dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC) 治疗靶区电场的影响。数值计算时设定电极形状, 可选圆盘和矩形电极; 施加电极电流取 2 mA 或 4 mA。抑郁治疗电极放在左 DLPFC 和右 DLPFC 的正上方。取 DLPFC 表面 Q 点和 DLPFC 深部 P 点两点作为代表进行对比参照, 展示 P 和 Q 点电场强度在不同电极位置偏移的差异。Q 点在 VOXEL 坐标 (200, 220, 245), P 点在 VOXEL 坐标 (200, 220, 252) (图 2)。

2 结果

2.1 tDCS 电极位置偏移对颅内电场的影响

tDCS 治疗疾病有对应的目标靶区, 而此靶区可通过观察研究 fMRI 和 MRI 影像发现并确定。Pandya 等^[11]指出抑郁的大脑皮层在前额叶皮层区域异常, 在 fMRI 和 MRI 影像中观察到该区域经常伴随新陈代谢减少和血流灌注不足。DLPFC 区域皮层功能是输入和输出关联的桥梁皮层。Boggio 等^[12]和 Taylor 等^[13]均认为通过刺激大脑的这一区域, 抑



GM, 灰质。

图 2 在 MRI 影像标记 F4 电极中心点以及 P 点和 Q 点位置, Voxel 坐标

Figure 2 The center of F4 electrode and the location of points P and Q marked on MRI images, and Voxel coordinates

郁症状会得到改善。出于同样的原因, Herrera-Melendez 等^[3]选择的 tDCS 治疗方案是在左 DLPFC 和右 DLPFC 进行刺激, 即 F3~F4^[3]。阳极位于左 DLPFC 和阴极置于右 DLPFC。本文抑郁治疗的电极放置位置亦是依据此选择。

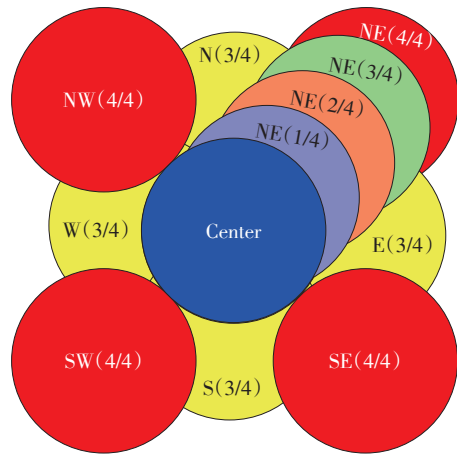
电极的位置关系到 tDCS 治疗剂量优化, 也关联到治疗效果, 本文重点以单个电极的位置误差为例做量化对比分析, 虽然临床中常发生 F3 和 F4 位置同时变化, 但会造成组合量过多, 徒增仿真计算工作量, 故仅以 F4 位置改变进行说明; 相对正确的 F4 位置, 本文仅讨论 32 种误差位置。通过仿真, 本文给出了 32 种位置误差将分别造成颅内电场剂量波动变化。当电场剂量减少时, 颅内 DLPFC 靶区会出现小于有效电场剂量的情况, 因此有可能出现 tDCS 临床疗效不好。

2.2 电极放置物理位置偏移的表示

tDCS 治疗抑郁, 电极放在 F3~F4^[3]。本文上节提到, 治疗过程中设定阳极放在 F3 的位置正确且不变, 仅放在 F4 位置的阴极会发生安装误差。将无偏差的 F4 位置称为正确位, 以正确位为起点, 电极假

设沿东、南、西、北以及东南、东北、西南、西北8个方向偏移,每次移动1/4电极大小(圆盘直径或矩形长边),圆盘电极F4位置变化参见图3示意,一共形成32种误差位置。图3中央是没有偏移的F4,最外的4个圆代表F4向东南、西南、西北、东北方向偏移中央位置1个直径大小(4/4)。图3中NW、SW、NE、SE分别代表西北、西南、东北、东南方向。

依据ROAST中自带的示范头颅模型(MNI152模型),F4中心位置为VOXEL坐标系下的(204, 225, 265),参见图4。根据Akiyama等^[14]的研究,MNI52头颅Length=203 mm。对比VOXEL坐标中头颅大小Length=248。ROAST中圆盘直径缺省值为6 mm,其对应坐标系估计大小为7.33(248/203×6)。以F4为中心,电极放置偏移沿罗盘8个方向相对偏移位置(1/4、2/4、3/4、4/4圆盘直径),计算得到电极放置位置偏移(表1)。计算中近似将头颅看作球曲面。表1中字母代表偏移方向,字母后的数字为相对偏移量,如SE24表示电极中心沿东南方向移动2/4电极圆盘直径大小,W14表示电极中心向西移



中央蓝色圆盘是无误差F4位置,四顶角红色是电极在NW、SW、NE和SE方向各移动1个直径距离误差。在NE方向4个圆,示意圆心分别移动1/4、2/4、3/4、4/4。

图3 圆形电极偏移示意

Figure 3 A circular electrode offset is indicated

动1/4电极圆盘直径大小。将表1坐标作为ROAST中的自定义电极放置位置。表1还包括了5 cm×3 cm矩形电极的坐标。

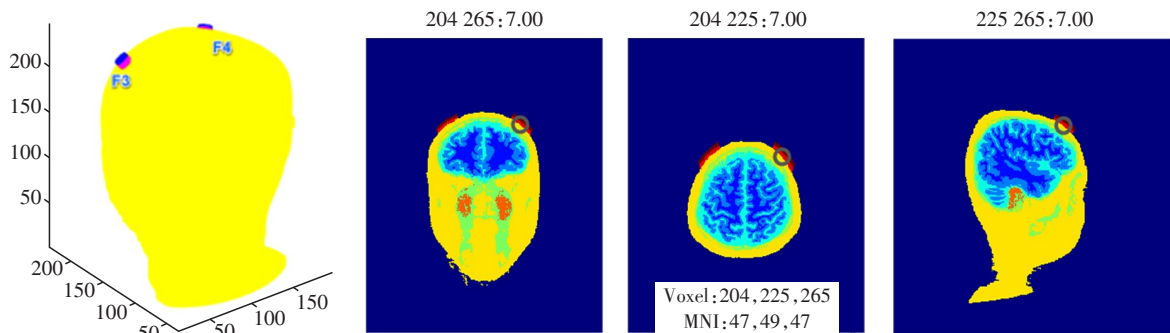


图4 Voxel(x,y,z)坐标,ROAST中组织分割影像中pad电极在F4位置

Figure 4 Voxel(x,y,z) coordinates, the pad electrode in the tissue segmentation image in ROAST is at the F4

2.3 抑郁靶区电场强度分布计算

如果圆盘电极放在F3和F4,F3连接阳极,F4连接阴极,施加2 mA,依据ROAST使用指南,计算颅内电场仅需在Matlab环境运行以下命令就可以。这时不存在误差。

```
roast('example/subject1.nii', {'F3', 2.0, 'F4', -2.0})
```

但当F4放置有误差情况时,本文先计算出全部圆盘电极误差位置,记录在表1中,采用带位置参数的命令,再数值计算电场后,从每次结果中,找出P点和Q点的电场强度。Q点位置是在DLPFC的表面,P点是在DLPFC的深部。在数值计算不同电极偏移情境的电场强度时,仅需运用ROAST命令,

逐次在命令中更替新电极位置参数。例如让表1中E14和E24分别以自定义字符串customE14和customE24表示电极位置,将它们添加到ROAST工具中的“subject1_customLocations”文件,他们位置的赋值分别对应E14(203, 226, 265)和E24(201, 227, 265)。然后分别执行下面命令,获得各自的电场分布。

```
roast('example/subject1.nii', {'customE14', 2.0, 'F4', -2.0}, 'zeropadding', 10, 'simulationTag', 'E12 mA')
```

```
roast('example/subject1.nii', {'customE24', 2.0, 'F4', -2.0}, 'zeropadding', 10, 'simulationTag', 'E22 mA')
```

表1 F4电极中心VOXEL坐标位置及各方向偏移后的中心坐标

Table 1 VOXEL coordinate position of F4 electrode center and its offset center coordinate in different direction

位置	50 mm×30 mm pad			6 mm disk			位置	50 mm×30 mm pad			6 mm disk		
	x	y	z	x	y	z		x	y	z	x	y	z
F4中心	204	225	265	204	225	265	F4中心	204	225	265	204	225	265
E14	192	234	265	203	226	265	W14	213	214	265	205	224	265
E24	179	241	265	201	227	265	W24	220	201	265	206	222	265
E34	165	244	265	200	229	265	W34	224	186	265	208	221	265
E44	150	245	265	199	230	265	W44	225	172	265	209	220	265
SE14	198	230	270	203	226	266	NW14	209	219	261	205	224	264
SE24	192	233	275	203	226	267	NW24	213	213	258	205	224	263
SE34	186	236	281	202	227	268	NW34	215	207	255	206	223	262
SE44	179	237	287	201	227	269	NW44	217	200	253	206	222	262
S14	204	225	274	204	225	267	N14	204	225	256	204	225	263
S24	202	223	282	204	225	269	N24	202	223	248	204	225	261
S34	201	221	291	204	225	270	N34	201	221	239	204	225	260
S44	198	219	299	204	225	272	N44	198	219	231	204	225	258
SW14	209	219	270	205	224	266	NE14	198	230	261	203	226	264
SW24	213	213	275	205	224	267	NE24	192	233	258	203	226	263
SW34	215	207	281	206	223	268	NE34	186	236	255	202	227	262
SW44	217	200	287	206	222	269	NE44	179	237	253	201	227	262

表2 2 mA激励时,pad、disk电极在不同偏移下,DLPFC表面P点和深部Q点的电场强度

Table 2 Under 2 mA excitation, electric field strength of point P on the surface of the DLPFC and point P of the pad and disk electrodes under different offsets (V/m)

位置	pad		disk		位置	pad		disk		位置	pad		disk	
	Q	P	Q	P		Q	P	Q	P		Q	P	Q	P
F4	0.36	0.29	0.71	0.62	S34	0.39	0.30	0.62	0.58	NW24	0.35	0.33	0.67	0.59
E14	0.43	0.30	0.66	0.61	S44	0.41	0.39	0.64	0.61	NW34	0.36	0.36	0.62	0.62
E24	0.41	0.32	0.66	0.61	SW14	0.37	0.35	0.63	0.60	NW44	0.36	0.40	0.64	0.59
E34	0.42	0.30	0.67	0.63	SW24	0.37	0.33	0.66	0.60	N14	0.35	0.29	0.66	0.61
E44	0.42	0.32	0.80	0.54	SW34	0.35	0.35	0.64	0.62	N24	0.35	0.35	0.78	0.67
SE14	0.42	0.33	0.64	0.58	SW44	0.36	0.38	0.64	0.69	N34	0.35	0.34	0.64	0.57
SE24	0.40	0.30	0.68	0.57	W14	0.36	0.34	0.65	0.58	N44	0.37	0.40	0.64	0.57
SE34	0.46	0.26	0.66	0.59	W24	0.37	0.39	0.66	0.64	NE14	0.35	0.31	0.66	0.61
SE44	0.35	0.32	0.68	0.54	W34	0.38	0.50	0.62	0.67	NE24	0.44	0.30	0.65	0.59
S14	0.37	0.32	0.66	0.60	W44	0.42	0.50	0.67	0.60	NE34	0.42	0.31	0.67	0.62
S24	0.35	0.33	0.66	0.60	NW14	0.35	0.29	0.65	0.61	NE44	0.40	0.29	0.63	0.60

按上述命令逐次完成表1中全部偏移点的输入,计算对应电极放置的颅内电场。统计整理同一个靶区在不同偏移下的电场,读取每次结果中所对应P点和Q点的电场强度数值,并录入表2。同时将电极偏移放置后的电场图解整理成图5和图6。图5是使用2 mA激励圆盘电极的情况。随电极位置误差变化,P点电场在0.54~0.69 V/m。各位置误差所产生电场变化在-12.9%~11.3%,但是全部偏差

仍然能够产生>0.3 V/m的电场剂量,即神经元依旧会受到有效的电场调制。图6显示2 mA激励矩形电极下的情况,P点电场在0.26~0.50 V/m。各位置误差对应靶区所产生的电场剂量偏差绝大多数仍然能够产生大于0.3 V/m的电场剂量,即多数情况神经元依旧会受到有效的电场调制^[9]。

对于各种电极误差放置所得计算结果,抽取DLPFC靶区里Q点位置和P点的电场强度,重新按

表3 2 mA和4 mA激励时,disk 电极在不同偏移下,DLPFC表面P点和深部Q点的电场强度
Table 3 Excited by 2 mA and 4 mA,electric field strength of point P on the surface of the DLPFC and point Q under different offsets (V/m)

位置	I=2 mA		I=4 mA		位置	I=2 mA		I=4 mA		位置	I=2 mA		I=4 mA	
	Q	P	Q	P		Q	P	Q	P		Q	P	Q	P
F4中心	0.71	0.62	1.29	1.15	S34	0.62	0.58	1.30	1.22	NW24	0.67	0.59	1.30	1.25
E14	0.66	0.61	1.33	1.24	S44	0.64	0.61	1.24	1.20	NW34	0.62	0.62	1.26	1.20
E24	0.66	0.61	1.42	1.44	SW14	0.63	0.60	1.27	1.12	NW44	0.64	0.59	1.23	1.12
E34	0.67	0.63	1.31	1.23	SW24	0.66	0.60	1.28	1.14	N14	0.66	0.61	1.30	1.21
E44	0.80	0.54	1.63	1.41	SW34	0.64	0.62	1.26	1.31	N24	0.78	0.67	1.29	1.22
SE14	0.64	0.58	1.36	1.26	SW44	0.64	0.69	1.27	1.16	N34	0.64	0.57	1.35	1.23
SE24	0.68	0.57	1.40	1.20	W14	0.65	0.58	1.34	1.21	N44	0.64	0.57	1.29	1.20
SE34	0.66	0.59	1.30	1.13	W24	0.66	0.64	1.27	1.17	NE14	0.66	0.61	1.24	1.22
SE44	0.68	0.54	1.39	1.12	W34	0.62	0.67	1.23	1.10	NE24	0.65	0.59	1.23	1.15
S14	0.66	0.60	1.35	1.17	W44	0.67	0.60	1.30	1.25	NE34	0.67	0.62	1.27	1.25
S24	0.66	0.60	1.32	1.12	NW14	0.65	0.61	1.28	1.24	NE44	0.63	0.60	1.30	1.25

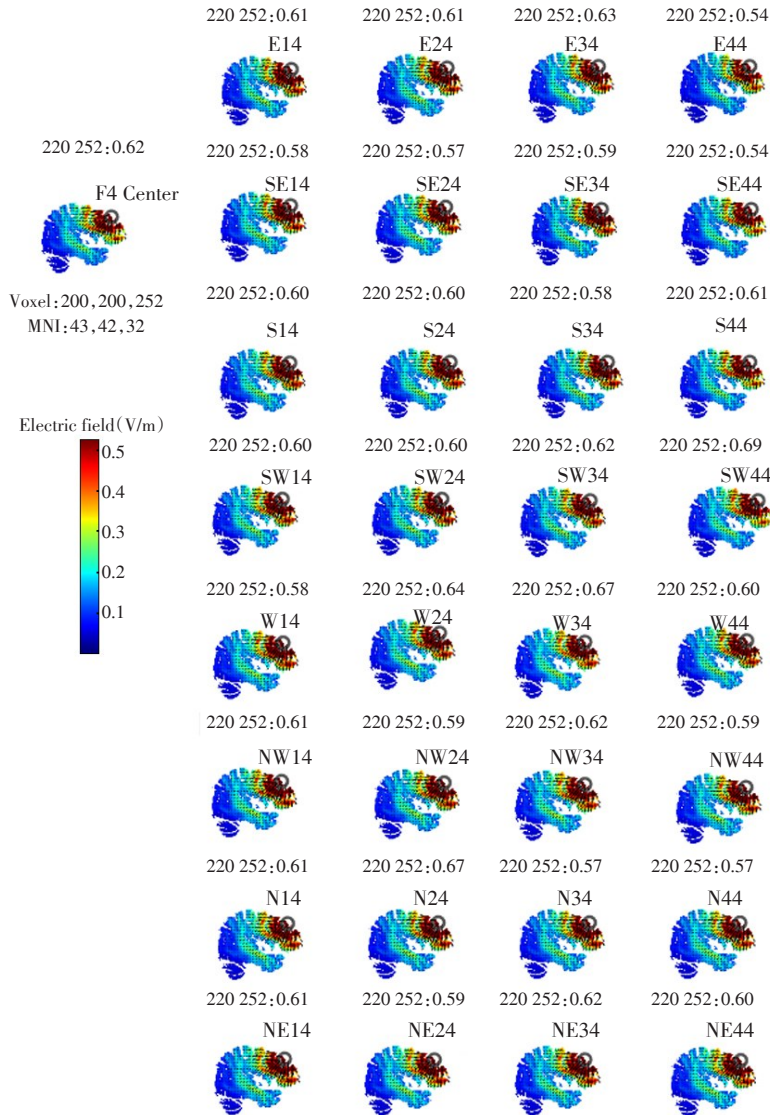


图5 2 mA激励6 mm圆盘电极时DLPFC内P点在不同电极偏移下的电场数值
Figure 5 Electric field value of point P in DLPFC under different electrode offset when 2 mA excites 6 mm disk electrode

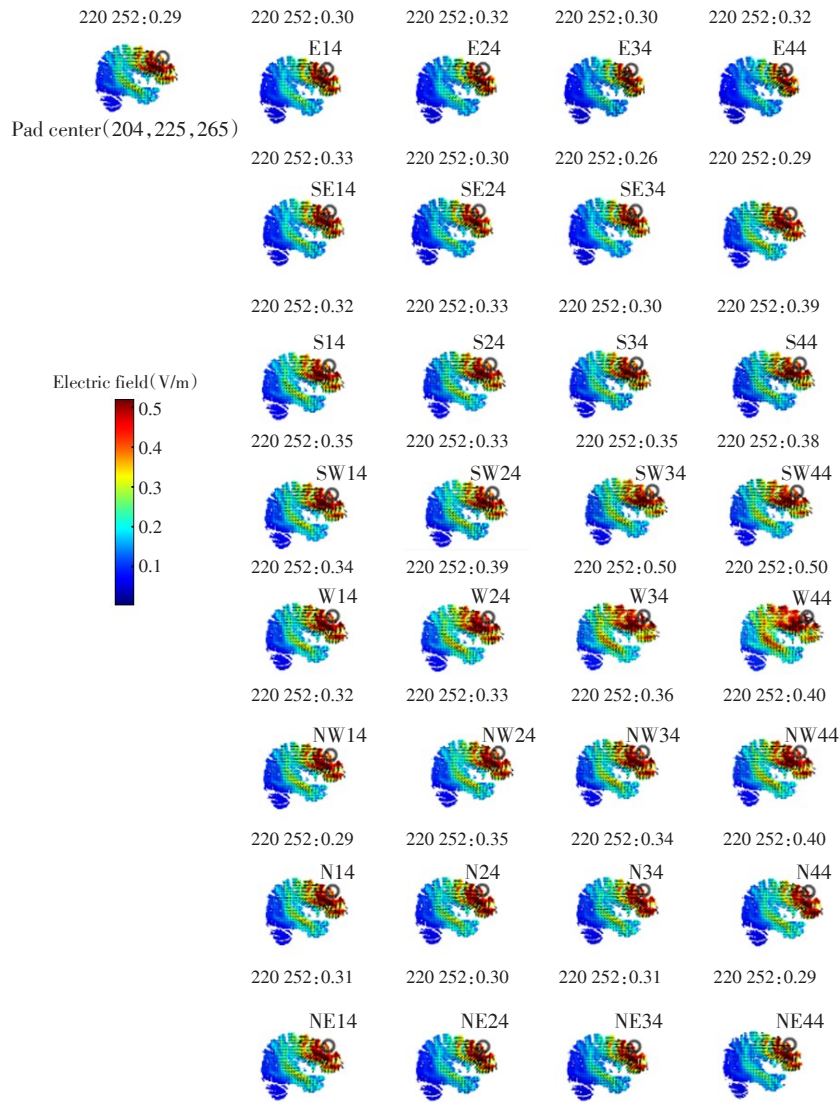


图6 2 mA 激励 50 mm × 30 mm 矩形电极时DLPFC内P点在不同偏移下的电场数值

Figure 6 Electric field value of P point in DLPFC under different offsets when 2 mA excites 50 mm × 30 mm rectangular electrode

照32个误差位置整理,以便更清楚地表示DLPFC里电场强度随电极放置误差的情况。图7为2 mA直流激励电极时,进行pad和disk两种电极类型比较。从图7可见电极不同偏移时,Q点位置和P点的电场强度会随位置误差而变化,电场剂量偏差多数能大于0.3 V/m;用同一种电极类型条件下,同一误差位置时Q点位置电场强度大多时候略高于P点位置电场强度,因为Q点位置更浅层;pad和disk两类电极之间对比时,disk电极类型的电场强度略高,原因是二者间电流密度的差异。Disk的直径取的是6 mm,pad的大小取的是50 mm×30 mm,它们电流密度分别是0.071、0.001 3 mA/mm²。对于改变激励电极电流大小所带来的影响,本文分析了使用disk电极情况。本文在图8中整理出当电极激

励电流为2 mA和4 mA直流刺激时,DLPFC靶区的Q点位置和P点位置在不同偏移条件下的电场强度。如预期变化,当电极激励电流从2 mA增加到4 mA时,P点和Q点电场强度均大致成倍增加。但是不能误以为电流增加和电场增加是线性关系,它们正确的实质关系是应该符合麦克斯韦电场边值关系。

3 讨论

本研究第一次用计算机模型工具来研究讨论临床治疗问题,将计算机工具ROAST运用到此可重复性的辩论中,从电极位置误差影响角度定量分析了电极位置误差差异对治疗效果可重复性的影响。文中以F3、F4位置,施加2 mA和4 mA电流临

床治疗抑郁为例,通过仿真计算tDCS治疗在颅内靶区所激励电场剂量,指出32种电极位置误差对颅内tDCS治疗靶区电场剂量产生的影响,仿真显示矩形和圆形电极各自32种位置分别造成电场变化范围是-10.3%~72.4%、-12.9%~11.3%。既有电场剂量减少也有增加,此结果正是由于大脑皮质的非均匀性造成的。

以pad电极方式治疗,颅内DLPFC靶区会出现3种位置电场强度小于0.3 V/m的有效电场剂量情况。此时有可能出现tDCS临床疗效不理想。但是当tDCS施加4.0 mA电流时,颅内靶区产生大于0.3 V/m的有效电场剂量,此暗示临床可以适当增加

电流,以改善治疗效果。

从表2可见tDCS的另外一个特征是小面积电极能够在P和Q点形成更大的电场。对于圆盘和圆环电极出现位置偏差后,全部位置偏差都能够在DLPFC产生大于0.3 V/m的电场剂量,即DLPFC的神经元依旧会得到有效的电场调制。

本文还观察了使用同一种电极,仅改变电流时电场强度变化的规律。表3中可以看到施加4 mA电流时32种误差位置在颅内靶区所产生变化率和施加2 mA电流时基本一致,电场强度的改变率与施加电流大小基本无关,曲线的波动非常接近(图7、8)。

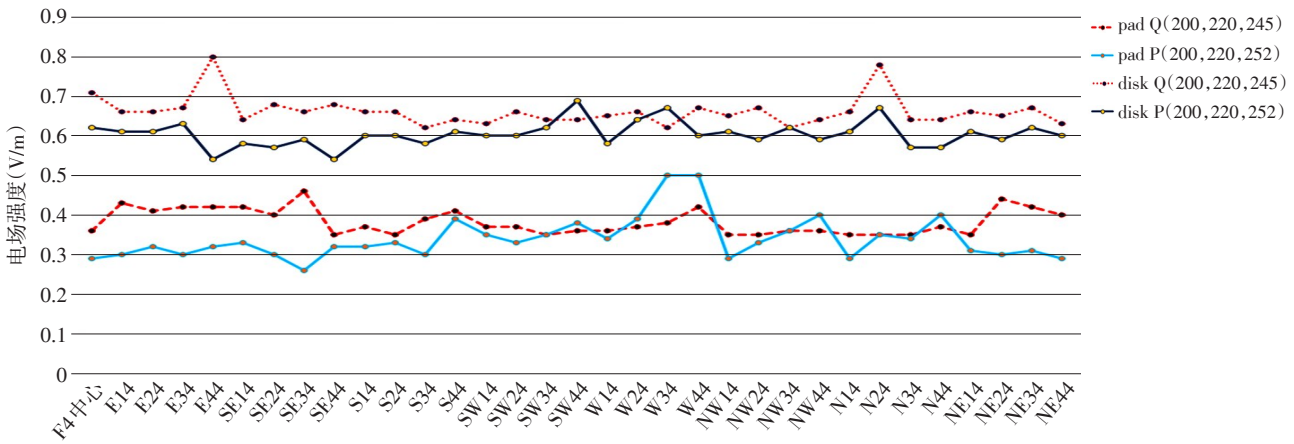


图7 pad、disk 电极进行 2 mA 直流刺激时,电极偏移下 P 和 Q 点的电场强度

Figure 7 Electric field intensity of points P and Q under electrode offset when pad and disk electrodes are stimulated by 2 mA DC

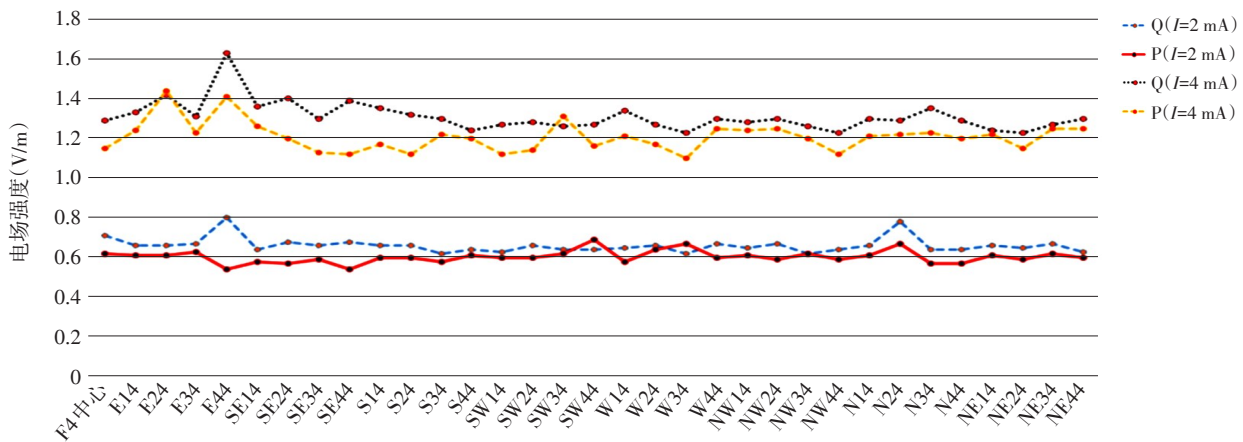


图8 disk 电极进行 2 mA 和 4 mA 直流刺激时 P 和 Q 点的电场强度变化

Figure 8 Electric field intensity changes at points P and Q of disk electrodes stimulated by 2 mA and 4 mA DC

考虑到DLPFC不是唯一的与抑郁相关的区域,后续研究有必要检查更多特殊点的电场剂量。抑郁症的病理生理关联大脑多区域,如Hu等^[15]指出

外侧系带功能障碍可能会导致几种神经性疾病,特别是重度抑郁症。后续研究还会考察多电极位置发生偏移下的电场变化,例如F3、F4位置临床治疗

位置都有误差的情况。

另一项未来研究工作,将应用ROAST软件计算整理出各种tDCS治疗方案,针对每一种治疗,每个电极的位置误差,产生的电场治疗剂量,进行全面的计算和整理,用数据库方式展现,建成“tDCS治疗指南:电极错误位置数据库”。临床医生因此可以了解如果放置位置发生变化,目标靶区的电场强度如何变化,临床治疗中选择参考剂量,以提供临床医生优化治疗过程的参考,更好地理解tDCS疗效的可重复性。

本研究方法还能够用于寻找tDCS治疗的个体剂量和方案优化,把方法介绍给国内临床医生,寻求和他们合作,结合临床进行个性化治疗优化。

[参考文献]

- [1] NITSCHKE A, BOGGIO P, FREGNI F, et al. Treatment of depression with transcranial direct current stimulation (tDCS): a review [J]. *Exp Neurol*, 2009, 219(1): 14-19
- [2] BENNABI D, HAFFEN E. Transcranial direct current stimulation (tDCS): a promising treatment for major depressive disorder? [J]. *Brain Sci*, 2018, 8(5): 81
- [3] HERRERA-MELENDZ A, BAJBOUJ M, AUST S. Application of transcranial direct current stimulation in psychiatry [J]. *Neuropsychobiology*, 2020, 79: 372-383
- [4] FREGNI F, BOGGIO P, NITSCHKE M, et al. Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory [J]. *Exp Brain Res*, 2005, 166(1): 23-30
- [5] KNOTKOVA H, SOTO E, LEUSCHNER Z, et al. Transcranial direct current stimulation (tDCS) for the treatment of chronic pain [J]. *J Pain* 2013, 14: S64
- [6] FERTONANI A, MINIUSI C. Transcranial electrical stimulation: what we know and do not know about mechanisms [J]. *Neuroscientist*, 2017, 23(2): 109-123
- [7] MAHDAVI S, TOWHIDKHAH F. Computational human head models of tDCS: influence of brain atrophy on current density distribution [J]. *Brain Stimul*, 2018, 11(1): 104-107
- [8] HUANG Y, DATTA A, BIKSON M, et al. Realistic volumetric-approach to simulate transcranial electric stimulation-ROAST-a fully automated open-source pipeline [J]. *J Neural Eng*, 2019, 16(5): 056006
- [9] ANTAL A, ALEKSEICHUK I, BIKSON M, et al. Low intensity transcranial electric stimulation: safety, ethical, legal regulatory and application guidelines [J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128(9): 1774-1809
- [10] FRANCIS J, GLUCKMAN B, SCHIFF S. Sensitivity of neurons to weak electric fields [J]. *J Neurosci*, 2003, 23(19): 7255-7261
- [11] PANDYA M, ALTINAY M, MALONE D A, et al. Where in the brain is depression? [J]. *Curr Psychiatry Rep*, 2012, 14(6): 634-642
- [12] BOGGIO P S, BERMPOHL F, VERGARA A O, et al. Go-no-go task performance improvement after anodal transcranial DC stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex in major depression [J]. *J Affect Disord*, 2007, 101(1/2/3): 91-98
- [13] TAYLOR J, YAMADA T, KAWASHIMA T, et al. Depressive symptoms reduce when dorsolateral prefrontal cortex-precuneus connectivity normalizes after functional connectivity neurofeedback [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 2581
- [14] AKIYAMA L, RICHARDS T, IMADA T, et al. Age-specific average head template for typically developing 6-month-old infants [J]. *PLoS One*, 2013, 8(9): e73821
- [15] HU H, CUI Y, YANG Y. Circuits and functions of the lateral habenula in health and in disease [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2020, 21(5): 277-295

[收稿日期] 2022-10-22

(责任编辑:蒋莉)