

本文引用格式:马龙涛,马绍玉.3D Slicer软件在神经外科手术中的临床应用[J].安徽医学,2023,44(11):1401-1405.DOI:10.3969/j.issn.1000-0399.2023.11.025

3D Slicer 软件在神经外科手术中的临床应用

马龙涛 马绍玉

[摘要] 三维切片(3D Slicer)软件是一款功能强大的医学影像处理、分析及可视化的处理软件,能够处理磁共振成像技术(MRI)及计算机断层扫描(CT)多种模态的影像学数据,具有三维重建功能,能够重建出脑组织,颅神经,血管及病灶。目前在神经外科的术前规划,术中定位,辅助疾病诊断和治疗效果评价等方面发挥重要作用。本文就3D Slicer软件在神经外科手术中的应用展开介绍。

[关键词] 3D Slicer; 神经外科; 术前规划

doi:10.3969/j.issn.1000-0399.2023.11.025

由于颅脑解剖结构复杂,功能重要,手术要求高,最大程度的切除病灶及保护脑功能是神经外科医生常常需要权衡的问题。三维切片(three dimensional slicer, 3D Slicer)软件是由哈佛大学和麻省理工学院联合开发、开源的图像分析及处理平台,对计算机配置要求不高,且具有扩展及升级功能,将扫描的原始数据导入软件进行处理即可获得三维立体模型,可进行多方位观察、测量^[1]。目前,3D Slicer软件在高血压脑出血、脑动脉瘤手术、颅内肿瘤、微血管减压术、乙状窦后入路关键孔的定位、三叉神经痛球囊压迫术等手术中已开始应用,也有学者用于评价脑积水腹腔分流术后效果^[2]。本文就目前3D Slicer软件在神经外科的应用进行综述,旨在充分认识和利用该软件。

1 3D Slicer 软件在颅内血肿手术中的应用

高血压脑出血作为一种死亡率高、致残率高的疾病,是临床上常见的急危重症,占有自发性脑出血的50%~70%^[3-5]。高血压脑出血起病较急,血肿体积增长快,可迅速形成占位效应,引起高血压,手术治疗是迅速解决高血压、占位效应的有效方法^[6-7]。血肿体积既是手术指征的重要参考指标,也是高血压脑出血患者预后的重要参考依据^[8-9]。血肿体积的计算目前临床上多采用多田公式^[10]。而崔亚辉等^[11]通过研究103例基底节区出血患者,依据血肿大小及血肿形状进行分组,分别应用多田公式及3D Slicer软件测量血肿体积,结果显示由于受血肿形状的影响多田公式在血肿体积计算上准确性低,尤其对于不规则血肿差异性较大,而3D Slicer软件利用计算机断层扫描(computed tomography, CT)扫描原始影像学数据进行三维重建血肿模型,计算血肿体积,不受血肿形状的影响,结果准确可靠(图1)。应用3D Slicer软件进行血肿体积的计算,更利于手术指征的把握。3D Slicer软件在术前的规划中发挥着重要的作用。李知阳等^[12]将72例高血压脑出血患者分为3D Slicer软件联合神经内镜血肿清除术组及CT定位下钻孔引流术组,研究发现,在3D Slicer

软件辅助下于神经内镜下清除血肿,具有血肿清除率更高,术后并发症率更低,预后更好的特点(图2)。彭逸龙等^[13]应用3D Slicer软件联合手机Sina软件对20例高血压脑出血患者进行血肿穿刺引流,20例均成功穿刺血肿,15例到达预设的位置,定位精确,成功率高,效果良好,对手术操作具有一定的指导。有学者将实施脑出血穿刺引流术的50例患者分为观察组与对照组,观察组利用3D Slicer软件辅导3D打印导板技术对患者实施穿刺引流,对照组采用常规简易定位方法实施手术,观察组临床总有效率(96.0%)高于对照组(68.0%),差异具有统计学意义^[14]。3D Slicer软件通过处理脑出血术前影像学数据,设计穿刺导板,结合3D打印技术辅助脑出血穿刺引流术,术中定位准确,降低术后并发症发生率,缩短住院时间,效果显著^[15]。

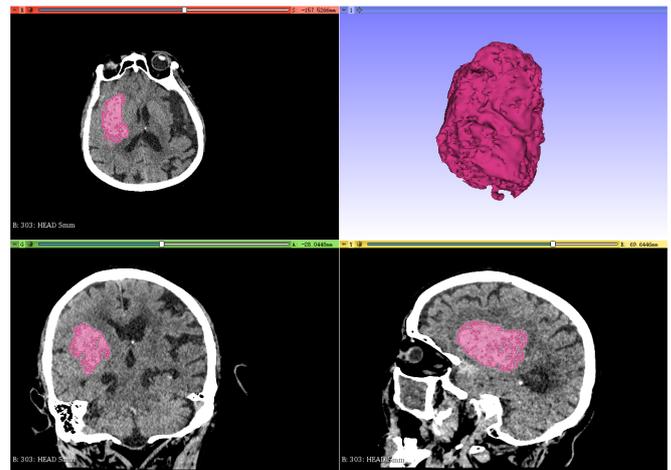


图1 3D Slicer软件三维重建血肿后精确计算血肿体积

2 3D Slicer 软件在大面积脑梗死手术中的应用

脑梗死的患者在脑卒中患者中占80%,大面积脑梗死的患

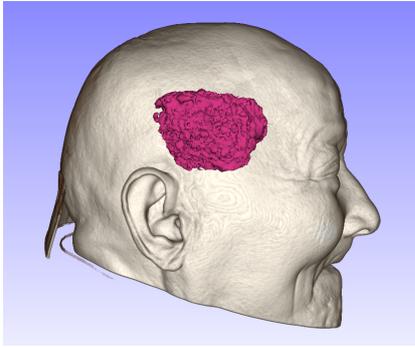


图2 3D Slicer三维重建血肿后头皮投影

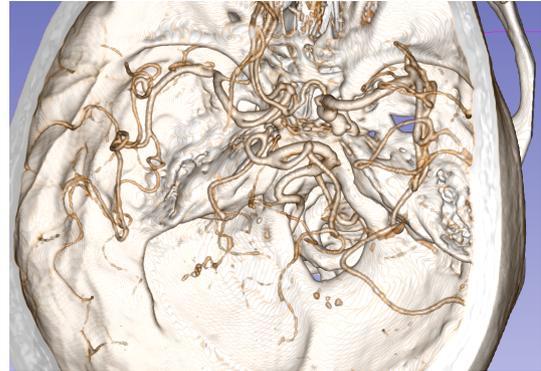


图3 3D Slicer重建动脉瘤模型及其周围血管和部分骨性结构

者死亡率高,致残率高,往往预后不佳,去骨瓣减压术是挽救患者生命的外科治疗方法,有学者利用3D Slicer软件辅助定位去骨瓣减压范围,与传统大骨瓣减压相比,明显提高了临床疗效,改善了患者预后^[16]。李政等^[17]利用3D Slicer软件通过重建术前与术后头颅CT影像学资料,通过分析得出较小的术前全脑体积、较大的术前梗死脑组织/全脑体积比是脑梗死患者去骨瓣减压术后短期内预后不良的危险因素。

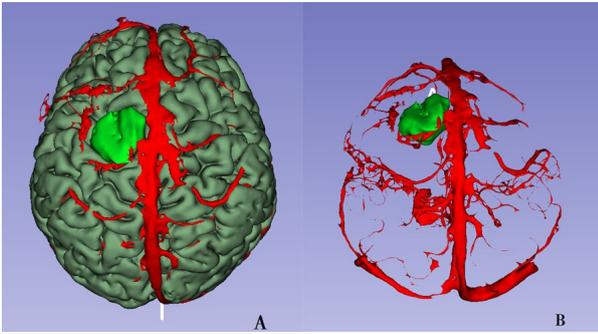
3 3D Slicer软件在颅内动脉瘤手术中的应用

颅内动脉瘤是颅内动脉血管壁的瘤样突起,该突起为永久性扩张,一旦破裂就会急性发病引发严重后果。约85%的自发性蛛网膜下腔出血由颅内动脉瘤破裂引起^[18]。目前治疗颅内动脉瘤常规方法有血管内治疗和开颅夹闭^[19]。虽然脑血管造影术是诊断颅内动脉瘤的金标准,但由于其有创性,需要在麻醉下进行(局麻或全麻),具有费用高,风险高等缺点,有可能被相对无创、安全的计算机断层扫描血管造影(computed tomography angiography, CTA)取代^[20]。有研究表明利于3D Slicer软件重建3D-CTA动脉瘤与脑血管造影在诊断上具有相同的灵敏度与特异度^[21]。有学者使用3D Slicer软件重建动脉瘤及其周围血管三维模型,通过测量动脉瘤的大小、大小比例、子母角、角度、血管角度等参数评价动脉瘤破裂的风险^[22]。目前,CTA已成为蛛网膜下腔出血后筛查动脉瘤的首选检查方法^[23]。有研究表明CTA在评估动脉瘤夹闭术后残留及血管闭塞方面具有较高的灵敏性和准确性,是颅内动脉瘤术后长期多次随访的可靠方法^[24]。白雅林等^[25]利用3D Slicer软件重建并融合颅脑CTA,涉及到26例经翼点入路开颅患者,且患者满足动脉瘤夹闭术后前交通动脉未破裂的要求,研究通过分析前交通动脉走向以及动脉瘤与载瘤动脉等相关组织、器官的三维解剖关系,为术前制定合适的手术计划并于术前模拟手术过程,取得较好效果。李文华等^[26]术前利用3D Slicer软件三维重建动脉瘤模型及其周围血管结构及部分骨性结构,模拟手术入路,能够获得更多立体解剖信息,指导制定手术计划,做到精准夹闭,降低术中破裂的风险(图3)。

4 3D Slicer软件在颅脑肿瘤中的应用

颅脑肿瘤目前以手术为主要治疗方式,最大限度的切除肿瘤及保护脑功能是外科医生的追求,充分的术前规划是精准切除肿瘤的有力保障。3D Slicer软件在脑肿瘤切除方面具有广泛

的应用。有学者应用3D Slicer软件辅助神经内镜经鼻蝶入路进行垂体瘤切除术,根据是否使用3D Slicer软件辅助手术,分为观察组(应用3D Slicer软件辅助手术)与对照组(单纯神经内镜经鼻蝶入路),与传统神经内镜经鼻蝶入路进行对比,观察组在术中出血量,手术时长,减少海绵窦窦损伤及脑脊液漏发生率方面优于对照组,术后内分泌激素改善及改善视野缺损方面优于对照组^[27]。有学者应用3D Slicer软件利用多模态影像三维重建技术切除中央区矢状窦旁脑膜瘤来指导手术,术中在最大程度地切除肿瘤的同时能够较好的保护周围静脉和大脑皮质,取得较好效果^[28]。彭逸龙等^[29]利用3D Slicer软件处理患者术前多模态影像学数据,重建出肿瘤及其周围结构,利用重建模型与患者家属沟通,制定手术计划,辅助开颅,可提高手术成功率,并在脑功能保护、减少术后并发症方面发挥作用。马龙涛等^[30]术前利用3D Slicer软件处理多模态影像学原始数据并重建肿瘤与邻近结构的三维模型(图4),通过立体观察更好地掌握病灶与毗邻结构的位置关系,利于病灶的切除及更好的保护脑组织,该方法可于术前模拟手术入路,精准规划手术方案,肿瘤全切率高,并发症少,提高患者生活质量。杨佳等^[31]在脑干肿瘤手术中利用3D Slicer软件重建脑干纤维束及毗邻结构,可准确地观察到纤维束的走行,了解到肿瘤与纤维束的三维空间位置关系,以便确定相对安全区,选择最佳手术入路。综上,使用3D Slicer软件重建技术在最大限度的切除肿瘤的同时,又能够很好的保护脑功能。目前脑胶质瘤在治疗上以手术切除为主,术后辅助放疗和化疗等综合治疗手段,最大范围安全切除肿瘤有助于延缓和预防肿瘤的进展与复发,改善生活质量^[32]。如何实现肿瘤全切与脑功能保护的平衡是当下胶质瘤手术的难点与研究核心^[33]。胶质瘤肿瘤细胞生长方式为呈膨胀性浸润性的特点,手术时需以脑沟、脑回为边界,沿着肿瘤与周围毗邻白质纤维束的走行进行“雕刻式”切除,有助于神经功能的保护,从而降低术后致残率,提高生活质量^[34]。因此,神经胶质瘤手术术前定位至关重要^[35]。目前临床上主要以神经导航辅助定位,但是由于设备高昂、体位限制及脑脊液的丢失导致术中脑漂移等问题,使其在神经外科手术中的应用受限。而开源软件3D Slicer可以重建出脑皮层及肿瘤周边结构,结合相应设备或者坐标定位法辅助手术定位,利用自然解剖结构及术中超声的辅助可减少术中因脑漂移引起的误差,实现精准手术,适合推广到各级医院。

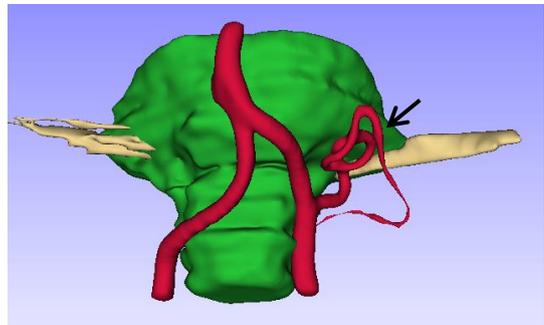


注:A为利用多模态影像学数据三维重建病灶、脑皮质、静脉及静脉窦;B为利用多模态影像学数据三维重建后,单独显示肿瘤与周围血管的关系。

图4 多模态影像三维模型

5 3D Slicer 软件在功能性手术中的应用

5.1 血管神经压迫综合征 原发性三叉神经痛及面肌痉挛是临床上常见的血管神经压迫综合征,其临床症状严重的影响患者的工作和生活,微血管减压术是目前主要的治疗手段^[36-37]。术前通过影像学判断是否存在责任血管及其走行,术中责任血管及神经彻底分开是手术成功的关键所在^[38]。目前临床上主要通过磁共振成像技术(magnetic resonance imaging, MRI)来判断责任血管与神经的关系^[39-41]。但是由于MRI影像学数据为二维图像,无法完全在三维空间结构上体现血管与神经的关系,利用3D Slicer软件可以对术前MRI影像学数据进行配准融合,分别重建出血管、神经、脑干等结构,并对相应模型进行多方位立体观察,有助于发现责任血管及其压迫点,指导手术^[42-43](图5)。研究发现术前利用3D Slicer软件进行血管神经重建,责任血管Kappa值达0.921,显著高于传统影像阅片对责任血管的预测^[44]。枕下乙状窦后入路手术中准确的判断横窦乙状窦移行处是开颅的重要步骤^[45]。理想的关键孔既可显露横窦-乙状窦移行处内侧缘又能显露部分硬脑膜的骨孔,能够降低损伤横窦及乙状窦的概率,减少开颅时间,目前临床上主要还是依据星点、颞骨岩部及枕骨等骨性结构进行定位^[46-47]。但由于存在个体差异,术中开颅时难免出现定位偏移,引起静脉窦损伤、颅骨缺损过多等情况^[48]。刘桂彪等^[49]基于横窦-乙状窦沟的位置实现关键孔的定位,利用星点坐标系在颅骨表面标记关键孔的位置进行颅骨的三维重建。杨吉鹏等^[50]利用3D Slicer软件辅助定位关键孔技术应用于20例患者的手术治疗,并取得良好的效果,既缩短了开颅时间,保护了静脉窦,又减少术中损伤,且颅骨缺损较少。经皮三叉神经半月节球囊压迫术是治疗原发性三叉神经痛有效的方法之一^[51]。该术式由Mullan^[52]于1983年首先应用于临床,因其无需开颅、创伤小、手术时间短、疗效确切、接受程度高等优势而被广泛应用。其中卵圆孔的穿刺是手术操作过程中的难点,因此精确定位卵圆孔是影响手术成功的关键性因素。3D打印技术具有精准化、个体化的特点,能够满足卵圆孔定位的要求^[53]。邱俊等^[54]应用3D Slicer软件,重建颅底模型,打印3D穿刺导板,辅助三叉神经半月节球囊压迫术研究中与传统徒手穿刺对比,更准确、更快的穿刺卵圆孔,降低了手术风险和手术难度,取得较好效果。



注:箭头示小脑后下动脉为责任血管。

图5 MRTA数据重建脑干、面神经及动脉

5.2 难治性癫痫 目前临床上针对于难治性癫痫的主要治疗手段依旧是癫痫灶切除或毁损手术^[55-56],因此癫痫灶的精确定位是手术效果的关键。然而,癫痫灶与肿瘤不同,在实体组织上可能肉眼无法辨别,其切除范围需要进行多学科综合评估进行确定,较传统的二维影像学来说,3D Slicer软件可以将MRI、正电子发射断层造影术(positron emission tomography, PET)等多模态影像学数据进行配准重建,结合可视化模型能够更加直观准确的确定影像异常区域,结合临床症状、体征和脑电图的结果确定最终的切除范围,在3D Slicer软件重建模型上描绘出来,术中依据模型及脑沟脑回特点,很容易确定切除范围^[57-58]。李佳等^[59]利用3D Slicer软件处理17例癫痫患者术前影像学数据,进行术前规划,确定手术切除范围,手术顺利,术后效果良好。此外,3D Slicer软件还可以用于指导立体定向脑电图(stereo-electroencephalography, SEEG)手术,进行术前规划、术后位置的验证,结合立体定向脑电图的结果决定切除范围^[60]。Liu等^[61]利用3D Slicer辅助SEEG植入提高了建模速度和分辨率、缩短电极植入计划时间、提高了临床工作效率。

综上,3D Slicer软件是一款强大的三维可视化处理软件,在神经外科的应用已广泛开展,在基层医院指导脑出血的定位及血肿重建,体积的精确计算,在大型神经外科医学中心,应用于功能神经外科,肿瘤术前重建等领域已成绩斐然,在解剖结构的学习及手术模拟的教学上具有独特的优势。手术医师可以佩戴专门的VR眼镜学习、研究虚拟的三维图像,熟悉个体化手术过程及路径,从而更好地理解手术患者的神经解剖结构^[62]。在术前沟通中也可以利用三维重建图像向患者及家属更直观的解释病情、手术方案及术中可能遇到的风险,在手术方案制定时也可以充分做好多种应急预案。随着3D Slicer软件功能不断的开发与完善,对神经外科手术的指导会提供越来越多的帮助。

参考文献

- [1] FEDOROV A, BEICHEL R, KALPATHY-CRAMER J, et al. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network[J]. Magn Reson Imaging, 2012, 30(9): 1323-1341.
- [2] 张逵,罗波,唐辉,等. 3D Slicer软件评估脑积水术后早期疗效的价值[J]. 中国临床神经外科杂志, 2021, 26(7): 518-520.
- [3] 陈忠容,秦家骏,沈照立,等. 高血压脑出血预后不良风险预

- 测模型的构建与验证[J]. 同济大学学报(医学版),2022,43(2): 181-187.
- [4] PENG J, WANG H, RONG X, et al. Cerebral hemorrhage and alcohol exposure: a review[J]. *Alcohol Alcohol*, 2020, 55(1): 20-27.
- [5] TANG Y, YIN F, FU D, et al. Efficacy and safety of minimal invasive surgery treatment in hypertensive intracerebral hemorrhage: a systematic review and meta-analysis[J]. *BMC Neurol*, 2018, 18(1): 1-11.
- [6] 游潮,刘鸣,于学忠,等. 高血压性脑出血中国多学科诊治指南[J]. *中国急救医学*,2020,40(8):689-702.
- [7] 王长林,赵兵. 小骨窗入路显微手术联合颅内压监护治疗高血压脑出血(附68例临床分析)[J]. *立体定向和功能性神经外科杂志*,2023,36(2):115-117, 121.
- [8] DELCOURT C, HUANG Y, ARIMA H, et al. Hematoma growth and outcomes in intracerebral hemorrhage: the INTERACT1 study[J]. *Neurology*, 2012, 79(4): 314-319.
- [9] RUIZ-SANDOVAL J L, CHIQUETE E, ROMERO-VARGAS S, et al. Grading scale for prediction of outcome in primary intracerebral hemorrhages[J]. *Stroke*, 2007, 38(5): 1641-1644.
- [10] 徐兴华,陈晓雷,张军,等. 多田公式计算脑内血肿体积的准确性和可靠性[J]. *中国神经精神疾病杂志*,2015,41(2): 87-91.
- [11] 崔亚辉,闫伟,蒋雨虹,等. 3D_slicer软件对高血压脑出血患者早期血肿准确性的评估分析[J]. *浙江临床医学*,2019, 21(8):1140-1141,1147.
- [12] 李知阳,王文举,魏航宇,等. 3D-slicer软件联合神经内镜手术治疗高血压基底节区脑出血的临床效果及安全性[J]. *中国医药*,2021,16(9):1334-1338.
- [13] 彭逸龙,伍益,陈少霁,等. 3D-slicer软件+手机sina软件在高血压性脑出血穿刺引流术中的应用[J]. *中国临床神经外科杂志*,2018,23(6):427-429.
- [14] 周翔,吴俊,黎琴,等. 3D-slicer辅助3D-打印导板技术在脑出血穿刺引流术中的应用[J]. *当代医学*,2021,27(11): 13-16.
- [15] 汤连军,翁明,陈秋兰,等. 个性化3D打印手术导板辅助高血压脑出血穿刺引流术临床疗效评估[J]. *临床医药实践*, 2023,32(1):7-10.
- [16] 高翔,李明,龚海姣,等. 3D-Slicer辅助定位大面积脑梗死老年病人去骨瓣减压范围内手术治疗研究[J]. *实用老年医学*,2022,36(6):588-591.
- [17] 李政,奚之玉,鲍得俊,等. 术前脑梗死组织/全脑体积比值与脑梗死患者去骨瓣减压术后预后的关系[J]. *立体定向和功能性神经外科杂志*,2022,35(6):343-349.
- [18] CLAASSEN J, PARK S. Spontaneous subarachnoid haemorrhage[J]. *Lancet*, 2022, 400(10355): 846-862.
- [19] 刘峥,黄银兴,魏梁锋,等. 显微手术夹闭与血管内治疗破裂颅内动脉瘤的疗效分析[J]. *中华神经外科杂志*,2021,37(8):805-809.
- [20] ROMIJN M, VAN ANDEL H A F G, VAN WALDERVEEN M A, et al. Diagnostic accuracy of CT angiography with matched mask bone elimination for detection of intracranial aneurysms: comparison with digital subtraction angiography and 3D rotational angiography[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2008, 29(1): 134-139.
- [21] 姬将,赵超云,王明磊,等. Slicer三维可视化后处理软件进行3D-CTA重建诊断颅内破裂动脉瘤的准确性[J]. *中国临床神经外科杂志*,2019,24(8):476-479.
- [22] LIN N, HO A, CHAROENVIMOLPHAN N, et al. Analysis of morphological parameters to differentiate rupture status in anterior communicating artery aneurysms[J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e79635.
- [23] 梁琰,张永强,李展展,等. 螺旋CT血管造影对颅内动脉瘤诊断及疗效评估的临床分析[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2019,17(3):72-74.
- [24] 王晓慧,杨娟,张瑜. 3D-CTA对颅内动脉瘤诊断效能及治疗指导的价值研究[J]. *中国CT和MRI杂志*,2022,20(1): 18-20.
- [25] 白雅林,齐高洋,刘带林,等. CTA结合3D-Slicer软件对前交通破裂动脉瘤夹闭术前规划的应用[J]. *宁夏医学杂志*, 2021,43(10):899-901.
- [26] 李文华,师忠杰,王占祥,等. 3D Slicer三维影像重建在颅内动脉瘤夹闭术中的应用[J]. *中国临床神经外科杂志*,2022, 27(8):646-649.
- [27] 龙潮新,郭铭,李平安,等. 3D Slicer辅助神经内镜经鼻蝶入路鞍区肿瘤切除术的应用研究[J]. *国际神经病学神经外科学杂志*,2022,49(6):29-34.
- [28] 贤俊民,陈凤月,孙晓妍,等. 3D Slicer三维重建技术在脑功能区肿瘤手术治疗中的应用价值[J]. *中国临床神经外科杂志*,2022,27(10):819-821, 824.
- [29] 彭逸龙,伍益,李智斌,等. 3D-Slicer虚拟现实技术在神经外科脑肿瘤术前计划的应用[J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2018,23(3):107-110.
- [30] 马龙涛,张伟文,梅加明,等. 多模态影像融合三维重建技术在颅内中央区脑膜瘤手术中的应用[J]. *中国现代神经疾病杂志*,2022,22(3):187-194.
- [31] 杨佳,武有涛,董康,等. 显微神经外科运用3D-Slicer自主构建脑干纤维束的相关研究[J]. *中华医学杂志*,2020(8): 604-609.
- [32] GRABOWSKI M M, RECINOS P F, NOWACKI A S, et al. Residual tumor volume versus extent of resection: predictors of survival after surgery for glioblastoma[J]. *J Neurosurg*, 2014, 121(5): 1115-1123.
- [33] 吴劲松,周良辅. 脑胶质瘤的外科手术近代观点[J]. *复旦学报(医学版)*,2017,44(6):724-732.
- [34] FANG S, LI Y, WANG Y, et al. Awake craniotomy for gliomas involving motor-related areas: classification and function recovery[J]. *J Neurooncol*,2020, 148(2): 317-325.

- [35] 郭学军,雷克成,梁勇.显微外科手术治理脑胶质瘤的临床效果[J].中国临床实用医学,2020,11(6):36-39.
- [36] BASAMH M, SINNING N, KEHLER U. Individual variations of the superior petrosal vein complex and their microsurgical relevance in 50 cases of trigeminal microvascular decompression[J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2020, 162(1): 197-209.
- [37] SATOH T, YAGI T, ONODA K, et al. Hemodynamic features of offending vessels at neurovascular contact in patients with trigeminal neuralgia and hemifacial spasm[J]. *J Neurosurg*, 2018, 130(6): 1870-1876.
- [38] OHTANI K, MASHIKO T, OGURO K, et al. Preoperative three-dimensional diagnosis of neurovascular relationships at the root exit zones during microvascular decompression for hemifacial spasm[J]. *World Neurosurgery*, 2016, 92(8): 171-178.
- [39] GAMALELDIN O A, DONIA M M, ELSEBAIE N A, et al. Role of fused three-dimensional time-of-flight magnetic resonance angiography and 3-dimensional T2-weighted imaging sequences in neurovascular compression[J]. *World neurosurgery*, 2020, 133(1): e180-e186.
- [40] 谭娜.3.0T磁共振断层血管成像对面肌痉挛血管神经压迫诊断的临床价值研究[J].现代医用影像学,2021,30(6):1000-1003.
- [41] JIA J, GUO H, HUO W, et al. Preoperative evaluation of patients with hemifacial spasm by three-dimensional time-of-flight (3D-TOF) and three-dimensional constructive interference in steady state (3D-CISS) sequence[J]. *Clin Neuroradiol*, 2016, 26(4): 431-438.
- [42] YAO S, ZHANG J, ZHAO Y, et al. Multimodal image-based virtual reality presurgical simulation and evaluation for trigeminal neuralgia and hemifacial spasm[J]. *World Neurosurgery*, 2018, 113(5): e499-e507.
- [43] HAN K, ZHANG D, CHEN J, et al. Presurgical visualization of the neurovascular relationship in trigeminal neuralgia with 3D modeling using free Slicer software[J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2016, 158(11): 2195-2201.
- [44] 王银占,钱涛.3D-Slicer软件评估面肌痉挛神经血管关系的研究[J].中国微侵袭神经外科杂志,2018,23(9):409-412.
- [45] 卜计源,姚辉,孙亮,等.73例小型桥小脑角脑膜瘤的手术体会[J].临床神经外科杂志,2022,19(6):672-676.
- [46] 蔡青,张斌,冯达云.乙状窦后入路两种骨性标志定位与静脉窦关系的比较[J].临床神经外科杂志,2017,14(2):126-128.
- [47] TOMASELLO F, ESPOSITO F, ABBRITTI R V, et al. Microvascular decompression for trigeminal neuralgia: technical refinement for complication avoidance[J]. *World Neurosurg*, 2016, 94(10): 26-31.
- [48] KEMP W J, COHEN-GADOL A A. A review of skin incisions and scalp flaps for the retromastoid approach and description of an alternative technique. [J]. *Surg Neurol Int*, 2011, 2(10): 143.
- [49] 刘桂彪,苏江,谢正德,等.三维CT定位乙状窦后入路骨瓣开颅技术的应用体会[J].右江民族医学院学报,2019,41(2):149-151.
- [50] 杨吉鹏,邱翔,李晓瞳,等.3DSlicer软件在乙状窦后入路开颅术中的应用[J].脑与神经疾病杂志,2021,29(2):97-101.
- [51] AGARWAL A, DHAMA V, MANIK Y K, et al. Percutaneous balloon compression of Gasserian ganglion for the treatment of trigeminal neuralgia: an experience from India[J]. *Middle East J Anaesthesiol*, 2015, 23(1): 105-10.
- [52] MULLAN S, LICHTOR T. Percutaneous microcompression of the trigeminal ganglion for trigeminal neuralgia[J]. *J Neurosurg*, 1983, 59(6): 1007-1012.
- [53] 刘宇清,何炳蔚,黄绳跃,等.3D打印技术在蝶骨嵴脑膜瘤切除术中的应用价值[J].中国肿瘤临床,2017,44(22):1146-1150.
- [54] 邱俊,易勇,张超,等.3D打印个性化穿刺导板在微球囊压迫治疗原发性三叉神经痛术中的应用研究[J].四川医学,2022,43(2):145-148.
- [55] KWON C S, JETTÉ N, GHATAN S. Perspectives on the current developments with neuromodulation for the treatment of epilepsy[J].*Expert Rev Neurother*, 2020, 20(2): 189-194.
- [56] 许新科,谢艳平,陈程,等.小儿难治性癫痫的外科治疗策略[J].中国现代药物应用,2018,12(10):61-62.
- [57] PRINCICH J P, WASSERMANN D, LATINI F, et al. Rapid and efficient localization of depth electrodes and cortical labeling using free and open source medical software in epilepsy surgery candidates[J]. *Front Neurosci*, 2013, 7(12): 260.
- [58] DE MOMI E, FERRIGNO G, BOSONI G, et al. A method for the assessment of time-varying brain shift during navigated epilepsy surgery[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(3): 473-481.
- [59] 李佳,林久鑫,周文静,等.3D-Slicer软件在难治性癫痫外科手术计划可视化中的运用[J].临床神经外科杂志,2020,17(3):306-310.
- [60] NARIZZANO M, ARNULFO G, RICCI S, et al. SEEG assistant: a 3DSlicer extension to support epilepsy surgery[J]. *BMC Bioinformatics*, 2017, 18(1): 1-13.
- [61] LIU Q, WANG J, WANG C, et al. Freesurfer and 3D slicer-assisted SEEG implantation for drug-resistant epilepsy[J]. *Front Neurobot*, 2022, 16(2): 848746.
- [62] 邱俊,易勇,张朝贵,等.3D打印个性化定位导板在颅内幕上浅表病变定位中的应用:前瞻性随机对照研究[J].中国微创外科杂志,2023,23(3):203-207.

(2022-12-12收稿)

(本文编校:朱岚,张迪)