

临床论著

个体化定制 3D 打印假体枢椎前柱重建
治疗枢椎肿瘤的疗效观察

管 强, 许文龙, 段婉茹, 刘振磊, 关 健, 张 璨, 管凤增, 陈 赞

(首都医科大学宣武医院神经外科 100053 北京市)

【摘要】目的:观察应用个体化定制 3D 打印假体重建枢椎前柱治疗枢椎肿瘤的临床疗效。**方法:**回顾性分析 2018 年 12 月~2019 年 10 月我科应用个体化定制 3D 打印假体重建枢椎前柱治疗的 6 例枢椎椎体肿瘤患者的临床资料。其中男 5 例,女 1 例,年龄 11~63 岁,平均 42.7 ± 19.2 岁。初次手术 4 例,其中脊索瘤 2 例,动脉瘤样骨囊肿 1 例,血管外皮细胞瘤 1 例;术后复发 2 例,均为脊索瘤。肿瘤累及椎体节段:C2 节段 5 例,C2~C4 节段 1 例。所有患者均行后前联合入路方式切除病变椎体。前路经口咽后壁入路 5 例,经下颌下咽后入路 1 例。所有患者均应用个体化定制 3D 打印颈椎假体行枢椎前柱重建。脊索瘤患者术后补充术区放疗。所有患者术后定期随访,观察肿瘤复发及内固定稳定性情况。**结果:**所有患者术中无神经、血管和硬脊膜损伤发生,术后患者伤口均一期愈合,无感染发生。术后平均随访 11.8 ± 3.7 个月,未见肿瘤残留或复发,所有患者内固定稳定,未见螺钉松动及假体移位。**结论:**应用个体化定制 3D 打印假体能够有效重建枢椎前柱结构,获得满意的短期临床疗效。

【关键词】 枢椎;3D 打印;上颈椎肿瘤

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2020.09.06

中图分类号:R738.1,R318.1 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2020)-09-0804-07

Clinical observation on the application of customized 3D printed prosthetic body weight in the treatment of axial tumors/JIAN Qiang, XU Wenlong, DUAN Wanru, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2020, 30(9): 804-810

【Abstract】 Objectives: To observe the clinical efficacy of customized 3D printed prostheses in the treatment of axial tumors. **Methods:** A retrospective study was conducted on the clinical data of 6 patients with an axial vertebral tumor treated with 3D printed prosthesis in our department from December 2018 to October 2019. There were 5 males and 1 female, aged 11-63 years, with an average age of 42.7 ± 19.2 years. 4 cases were of primary operation, including 2 cases of chordoma, 1 case of aneurysmal bone cyst, and 1 case of hemangiopericytoma. Postoperative recurrence occurred on the 2 patients with chordoma. Vertebral segments involved by tumor: 5 patients with C2 segment and 1 patient with C2-4 segment. All patients underwent vertebral body resection via a posterior-anterior combined approach. The anterior approach was followed by transoral approach in 5 cases, and the posterior approach was followed by high retropharyngeal approach in 1 case. All patients underwent axial anterior column reconstruction with a customized 3D printed cervical prosthesis. Patients with chordoma received additional postoperative radiotherapy. All patients were followed up regularly after surgery. **Results:** There was no vascular and nerve injury and no dura tear. All the wounds healed in the first stage or infection occurred. The patients were followed up for 11.8 ± 3.7 months on average, and no tumor residue or recurrence was found. The patients had stable internal fixation, with no screw loosening, nor implant displacement. **Conclusions:** Personalized 3D printed prosthesis can effectively reconstruct the axial anterior column structure. Satisfactory short-term clinical efficacy was obtained.

基金项目:首发自主创新(编号:2018-2-2014)

第一作者简介:男(1995-),医学硕士,研究方向:神经外科

电话:(010)83198836 E-mail:rediscovered@163.com

通讯作者:陈赞 E-mail:chenzan66@163.com

[Key words] Axis; 3D printing; Upper cervical tumor

[Author's address] Neurosurgery Department, Xuanwu Hospital, Capital Medical University, Beijing, 100053, China

Mavrogenis 的一项 37 年的单中心研究中,发现在上颈椎肿瘤的患者中,恶性肿瘤占 61%,最常见的恶性骨肿瘤为骨转移瘤,其次为浆细胞瘤和脊索瘤,最常见的良性骨肿瘤是骨样骨瘤,其次是骨动脉瘤性囊肿和成骨细胞瘤。相对于寰椎,枢椎更容易受累,其在上颈椎肿瘤的发病率约为 87%^[1]。由于有椎动脉在颈椎横突孔穿行,因此颈椎肿瘤进行整块切除(en bloc)的难度较大^[2];分块进行全椎节切除,术后辅助放疗可以延缓肿瘤复发周期^[3]。

上颈椎椎节切除后颈椎前柱结构重建一直是临床上的难题,3D 打印假体为上颈椎前柱的重建提供了全新的解决方案,而且,3D 打印假体可以通过个体化定制,精确匹配患者上下椎体解剖结构,简化手术操作,降低手术难度。2018 年 12 月~2019 年 10 月我科采用个体化定制 3D 打印假体重建枢椎前柱治疗上颈椎肿瘤患者 6 例,总结报道如下。

1 资料与方法

1.1 临床资料

本组男 5 例,女 1 例,年龄 11~63 岁,平均 42.7±19.2 岁。4 例为首次手术患者,首发症状包括:颈部活动受限伴双下肢无力 2 例,颈部双上肢疼痛 1 例,头颈偏斜 1 例。2 例为翻修手术患者,其中 1 例患者进行过 4 次颈椎管后路减压部分肿瘤切除术,末次手术后半年出现双上肢疼痛,四肢无力,复查 MRI 显示肿瘤复发。另 1 例患者进行过 1 次颈椎管后路减压、部分肿瘤切除术,术后 3 个月患者出现双下肢无力,复查 MRI 显示肿瘤复发。初次就诊患者术前均进行穿刺活检。病理诊断脊索瘤 2 例,动脉瘤样骨囊肿 1 例,血管外皮细胞瘤 1 例。2 例翻修手术患者前次手术病理均为脊索瘤。5 例患者肿瘤仅累及枢椎,1 例患者肿瘤累及 C2~C4 椎体。所有患者术前完善 X 线、CT、MRI 检查。Tomita 分级^[4] I 级 1 例,II 级 1 例,V 级 3 例,VI 级 1 例。Enneking 分期^[5] I A 期 1 例,I B 期 1 例,II B 期 4 例。患者资料详见表 1。

1.2 假体设计

获取患者 CT 数据,利用 Mimics 软件进行建模生成 stl 格式文件,将其导入 3-Matic 进行假体设计,假体直接与上下椎体终板接触,根据接触面面积设计体前后径和左右径尺寸,并保证假体后缘与椎管有 2~3mm 空间,前缘距离上下椎体连线形成的生理曲线 1~2mm。同时假体通过 4 枚螺钉与上下椎体固定形成自稳定结构,与 C1 固定的 2 枚螺钉向后上倾斜,固定于寰椎侧块,与 C3 固定的 2 枚螺钉向后下倾斜,固定于椎体内。假体使用正十二面单元体生成多孔结构,孔隙率 60%~80%,孔径 400~600μm。将设计确认后的假体三维数据文件,通过 Arcam EBM Q10 进行打印,打印粉末为符合 ASTM F3001 标准要求的 Ti6Al4V ELI 材料。将打印完成的假体进行一定的后处理后置入体内并完成固定。

1.3 手术方法

6 例患者均采用分期后前联合入路进行肿瘤累及节段颈椎椎节切除术。术前准备主要对操作通道进行检查,排除张口受限等情况。对所有行经口入路的患者行葡萄糖酸氯己定漱口以抗菌抗炎,对有慢性咽炎或者口腔炎症的患者于术前行咽拭子检查,以指导术后抗生素选择。

首先采用颈后路手术,手术过程中拆除前次手术置入的内固定系统(2 例翻修病例),切除枢椎棘突椎板,然后从内侧向外侧切断枢椎椎弓峡部,切除枢椎下关节突,而后切除枢椎横突孔后壁,显露椎动脉,用剥离子向下方牵拉椎动脉,用磨钻磨除枢椎上关节突外侧 1/2。最后向上牵拉椎动脉,磨钻磨除枢椎横突孔前结节,游离椎动脉 V3 段,椎动脉周围静脉丛出血采用双极电凝和明胶海绵压迫的方式止血。进行椎动脉游离时,强调必须在显微镜下操作,避免损伤椎动脉。跨病变节段进行后路钉棒系统内固定。

二期行前路手术,5 例肿瘤仅累及枢椎的患者均采用经口咽喉壁入路枢椎切除,3D 打印假体重建术。用开口器撑开患者口腔,切开患者咽喉壁粘膜和肌肉,头侧显露寰椎前弓,尾侧显露 C2/3 椎间隙,两侧显露枢椎关节突外缘一期手术断端。切除寰椎前弓,磨除枢椎齿状突,切除 C2/3 椎间

表 1 C2 肿瘤患者临床资料
Table 1 Clinical data obtained in 6 patients with C2 tumor

病例 编号 Case No.	年龄, 性别 Age, Sex	受累 节段 Loca- tion	椎动 脉受 累 Ver- tebral artery in- volve- ment	术前情况 Preop status					治疗 Treatment				随访 Follow-Up				
				Tomita 分型 Tomita staging	Ennek- ing 分 期 Ennek- ing classi- fication	症状 持续 时间 SD (mos)	VAS 评分 VAS score	JOA 评分 JOA score	手术 入路 Ap- proach	切除 方法 Re- sec- tion mode	并发 症 Com- plica- tion	放疗 剂量 RT dose (Gy)	周期 Peri- od (mo s)	VAS 评分 VAS score	JOA 评分 JOA score	局部 复发 Loc- al re- cur- renc- es	结局 Final
1	60,男 60,M	C-2	否 No	V	II B	2	0	15	后路- 经口 PT-TO	全切 Total	无 None	46	12	1	17	否 No	带病 生存 AWD
2	11,男 11,M	C-2	否 No	II	I A	2	1	17	后路- 经口 PT-TO	全切 Total	无 None	否 No	8	2	17	否 No	带病 生存 AWD
3	49,男 49,M	C2-4	是 Yes	VI	II B	240	8	9	后路- 咽后 PT-RP	全切 Total	吞咽 困难 Dys- phagia	56	16	2	13	否 No	带病 生存 AWD
4	38,男 38,M	C-2	否 No	I	I B	6	0	17	后路- 经口 PT-TO	全切 Total	无 None	否 No	15	0	17	否 No	带病 生存 AWD
5	35,女 35,F	C4-2	否 No	V	II B	2	5	14	后路- 经口 PT-TO	全切 Total	无 None	43	6	2	15	否 No	带病 生存 AWD
6	63,男 63,M	C-2	是 Yes	V	II B	9	3	17	后路- 经口 PT-TO	全切 Total	无 None	51	14	1	17	否 No	带病 生存 AWD

注:AWD=带病生存;PT=后路;RT=放疗;SD=症状持续时间;TO=经口入路;RP=咽后入路

Note: AWD=alive with disease; PT=posterior; RT=radiotherapy; SD=symptom duration; TO=transoral; RP=retropharyngeal

盘,然后连同肿瘤切除枢椎椎体。探查硬膜囊,彻底清除硬脊膜表面肿瘤。放置 3D 打印枢椎假体,头侧用螺钉固定于寰椎侧块,尾侧用螺钉固定于 C3 椎体上缘。分层缝合咽喉壁肌肉和粘膜,放置鼻饲管,术毕。术后第 7 天纤维喉镜检查咽喉壁伤口愈合情况,伤口愈合满意,拔除胃管,进流食,3d 后正常饮食。

1 例累及 C2~C4 脊索瘤患者,一期后路手术切除 C2~C4 后路结构,游离双侧椎动脉和神经根,并行 C1、C5 和 C6 后路内固定。二期前路手术选择下颌下咽后入路显露 C2~C4 节段,切除残余 C2~C4 椎体和肿瘤,而后置入 3D 打印假体,头端固定于寰椎侧块,尾端固定于 C5 椎体,重建 C2~C4 前柱。所有患者术后佩戴颈托 3 个月。本组病例中 4 例脊索瘤患者术后辅助放射治疗,其余 2 例患者(动脉瘤样骨囊肿、血管外皮细胞瘤)未行放射治疗,详见表 1。

1.4 随访观察

患者出院前,术后 3 个月,术后半年,术后 1 年门诊复查颈椎正侧位 X 线片、颈椎 CT 三维重建和 MRI。观察患者肿瘤残留或复发情况,同时

观察内固定稳定性情况。

2 结果

所有患者均分块全切肿瘤累及颈椎椎节,后路手术时间平均为 6.35±1.55h,平均失血量 345.55±116.35ml。前路手术平均 5.25±1.78h,平均失血量 205.25±58.35ml。术前 VAS 评分中位数为 2(0,5),术后 VAS 平均为 1.33±0.82,VAS 改善率为 53.00%。术前 JOA 评分平均为 14.83±3.13 分,术后 JOA 评分平均为 16.00±1.67 分,JOA 评分改善率 51.54%。术后所有患者症状均明显改善,经下颌下咽后入路切除 C2~C4 椎体肿瘤患者术后出现一过性吞咽困难,术后 2 周缓解。其余患者无神经、椎动脉、硬脊膜损伤。前后路伤口均一期愈合,无感染、伤口愈合不良。本组患者术后随访平均 11.83±3.67 个月,无肿瘤复发,无内固定松动移位(图 1~3)。

3 讨论

术前明确椎体病变性质和分期,确定切除范围是外科治疗的前提。本组初次手术患者术前均

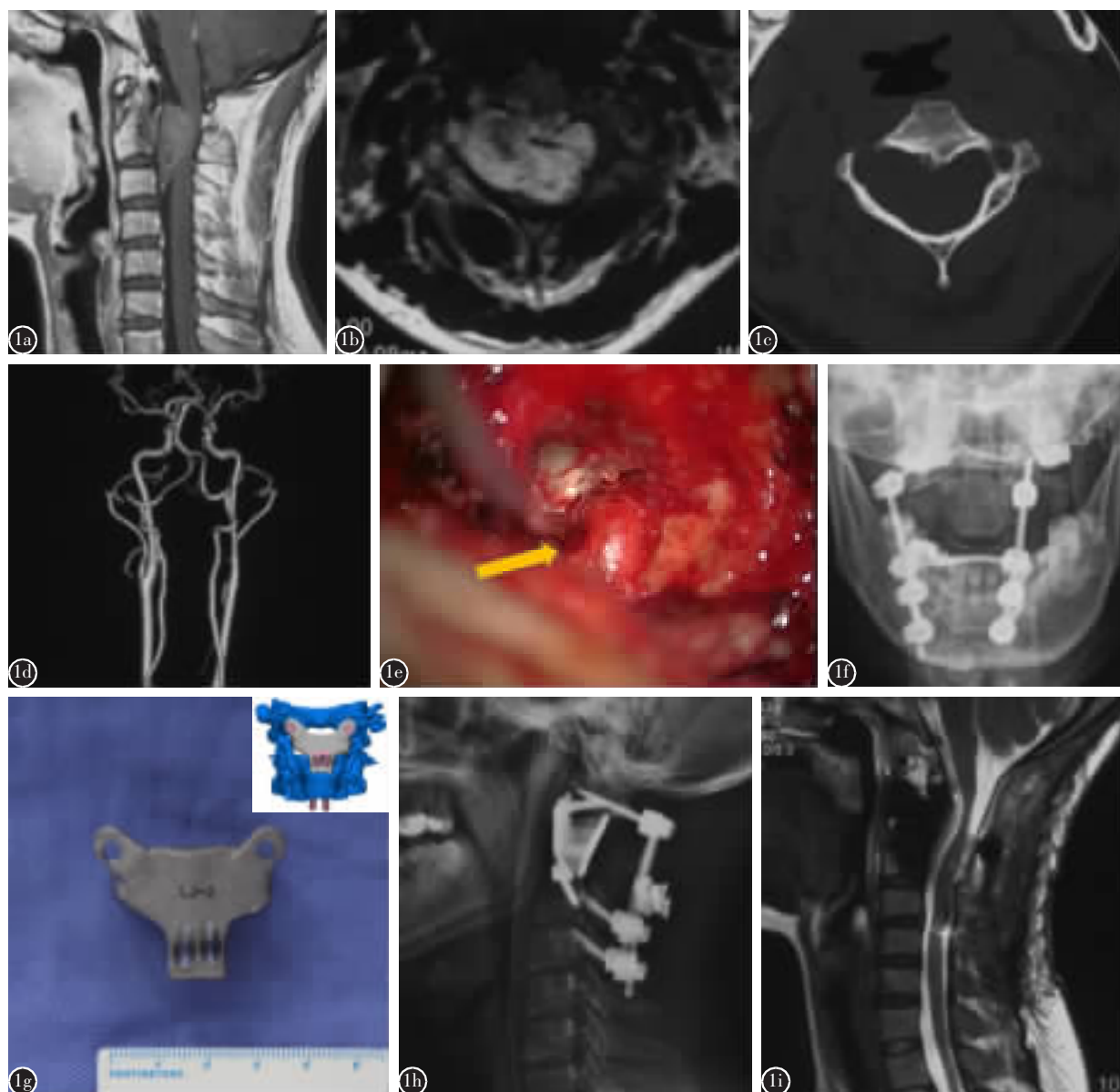


图 1 a 颈椎 MRI 矢状位 T1 像示枢椎肿瘤突入椎管压迫硬脊膜囊 b 颈椎 MRI 轴位 T1 像示肿瘤严重压迫硬脊膜囊 c 颈椎 CT 轴位示枢椎椎体、椎弓根、和椎板骨质破坏变薄 d 颈部 CTA 显示双侧椎动脉通畅,左侧椎动脉 V3 段受压变细 e 一期后路手术过程中磨除左侧枢椎上关节突,游离椎动脉 V3 段 f 一期手术后复查颈椎正位 X 线片示枢椎两侧关节突外侧 2/3 已经被切除 g 根据一期术后颈椎 CT 数据设计的 3D 打印假体图和定制的 3D 打印枢椎椎体假体 h 二期手术后颈椎侧位 X 线片示 3D 打印枢椎假体位置满意 i 患者术后 6 个月复查颈椎 MRI T2 像显示无肿瘤残留复发

Figure 1 a The sagittal T1WI showed that the tumor of axis invaded the spinal canal and compressed the dural sac b The axial T1WI showed the compression of the spinal canal by the tumor c The CT scan showed the C2 vertebral body, pedicle, and lamina became thinner after bone destruction d CTA showed the patency of the bilateral vertebral artery (VA) and the lumen stenosis of the left V3 segment e The arrow indicates the V3 segment of the left VA. The left superior articular process was removed and the V3 segment of the VA was dissociated during the first-stage posterior surgery f The anterior-posterior and lateral images taken after the first stage operation showed two-thirds of the bilateral articular processes of the axis had been removed g The customized 3D printed prosthesis was designed according to the CT data of cervical vertebra after the first stage operation h The cervical lateral X-ray after the second stage surgery showed the satisfactory position of the 3D printed axial prosthesis i T2WI 6 months after surgery showed no residual tumor and recurrence

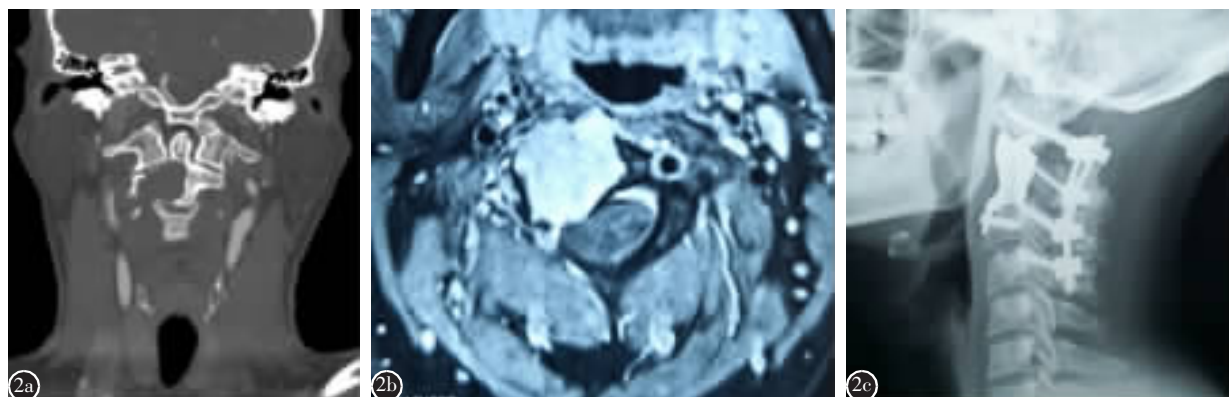


图 2 a 患者颈椎 CT 冠状位重建可见枢椎肿瘤破坏枢椎右侧椎体和关节突 b 颈椎 MRI 轴位 T1 强化像显示枢椎椎体肿瘤明显强化 c 术后 6 个月患者颈椎侧位 X 线片显示枢椎 3D 打印假体位置良好

Figure 2 a The CT coronal reconstruction revealed that the tumor destroyed the right vertebral body and articular process of the axial vertebra b The contrast-enhanced T1WI showed significant enhancement of axial tumor c The lateral X-ray six months after operation showed that the axial 3D printed prosthesis was in position

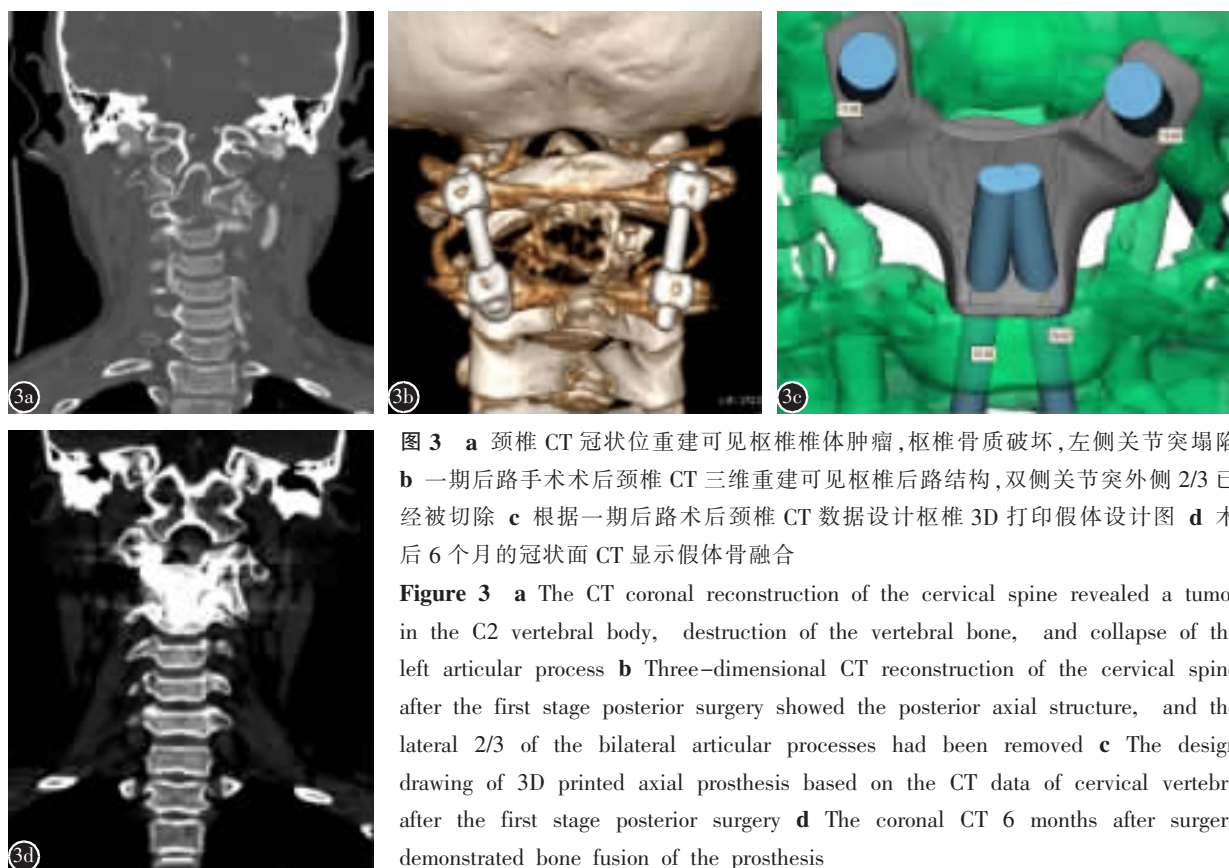


图 3 a 颈椎 CT 冠状位重建可见枢椎椎体肿瘤,枢椎骨质破坏,左侧关节突塌陷 b 一期后路手术术后颈椎 CT 三维重建可见枢椎后路结构,双侧关节突外侧 2/3 已经被切除 c 根据一期后路术后颈椎 CT 数据设计枢椎 3D 打印假体设计图 d 术后 6 个月的冠状面 CT 显示假体骨融合

Figure 3 a The CT coronal reconstruction of the cervical spine revealed a tumor in the C2 vertebral body, destruction of the vertebral bone, and collapse of the left articular process b Three-dimensional CT reconstruction of the cervical spine after the first stage posterior surgery showed the posterior axial structure, and the lateral 2/3 of the bilateral articular processes had been removed c The design drawing of 3D printed axial prosthesis based on the CT data of cervical vertebra after the first stage posterior surgery d The coronal CT 6 months after surgery demonstrated bone fusion of the prosthesis

采用穿刺的方法获得其病理性质,通过影像学检查确定其病变范围。对于脊柱恶性肿瘤,应尽量采用全椎体切除 (total en bloc spondylectomy, TES),以最大程度避免其复发^[6,7]。但上颈椎由于椎动脉穿行,全椎体切除难以实行,经瘤进行分块椎节切除术是目前被广泛接受的方案^[8-11]。椎节切

除是可能切术受累颈椎节段的所有骨性结构,包括棘突、椎板、关节突、横突、椎弓根和椎体^[12]。游离走行在枢椎横突孔内的椎动脉 V3 段是手术最关键的操作,从后路进行这一操作相对安全^[13],可以减少从前路进行枢椎椎体切除时损伤椎动脉的风险。本组患者均先行后路手术,切除枢椎的后路

结构,游离椎动脉。

上颈椎前路手术可以选择经口、经下颌和经下颌下咽后入路。经口入路可以显露斜坡下缘至枢椎,难以显露下颈椎^[14];经下颌入路可以同时显露上下颈椎,但手术创伤巨大,术后并发症发生率较高^[15];经下颌下咽后入路手术创伤较小^[16],但显露上颈椎有一定困难。所以在进行上颈椎手术时应根据肿瘤侵犯颈椎的节段全面考虑前路手术入路的选择。本组病例中 5 例患者肿瘤单独侵犯枢椎,均采用经口入路进行枢椎前柱结构切除和重建。1 例患者复发脊索瘤同时侵犯 C2~C4 椎体,由于经下颌入路并发症较多,因此前路手术采用经下颌下咽后入路,手术过程中对 C2~C4 前路结构显露满意,顺利切除被肿瘤侵犯的椎体,并置入 3D 打印假体。

寰枢椎是特殊椎骨,解剖结构与其他椎骨不同,具有独特的生物力学特点^[17],传统的脊柱前柱重建技术很难重建寰枢椎的稳定性,置入物发生塌陷、松动、甚至移位的几率很高。个体化定制的 3D 打印钛金属假体为寰枢椎前柱支撑结构的重建提供了更加合理的解决方案。2014 年,Xu 报道了第 1 例应用 3D 打印假体治疗枢椎尤文氏肉瘤的病例,应用 3D 打印假体进行了枢椎的置换^[18]。2017 年,Li 报道了 1 例甲状腺癌颈椎转移瘤的患者,成功应用 3D 打印技术置换 C2~C4^[19]。2019 年,He 报道了 1 例多节段颈椎软骨肉瘤的患者应用 3D 打印人工椎体进行 C2~C7 的长节段的椎体置换^[20]。个体化定制 3D 打印假体的优点在于:(1) 3D 打印假体完全重塑上颈椎的解剖形态,可以更好地重建上颈椎的前柱的力学支撑结构^[18];(2) 3D 打印假体为个体化定制,精密匹配患者需要重建的骨性结构,术中无需调整,降低了手术难度,节省了手术时间。为了使 3D 打印枢椎假体更好地匹配寰椎和 C3 椎体,本组患者均采用分期后前路手术。一期后路手术后,为患者进行颈椎 CTA 扫描,采用此次 CTA 数据设计枢椎 3D 打印假体。由于一期后路手术已经对颈椎进行了内固定,颈椎曲度在第二次前路手术过程中不会发生变化,采用一期手术后颈椎 CTA 扫描数据设计制作的枢椎 3D 打印假体可以精密匹配头侧的寰椎和尾侧 C3 椎体上方骨性终板。本组患者手术过程中 3D 打印假体匹配良好,未出现假体适配误差。(3) 3D 打印假体可以设计为微孔结构,形成类似人类

骨骼中的骨小梁结构,上下表面的正常骨组织可以长入假体,形成坚强的骨性融合^[18-21]。本组患者术后随访可见置入物稳定,未见置入物松动移位。

本组 1 例患者为枢椎血管外皮细胞瘤,虽然均为良性肿瘤,但由于肿瘤已经破坏枢椎椎体,为了切除肿瘤后更好地重建枢椎稳定性,采用了后前联合入路,枢椎肿瘤全切后行 3D 打印假体重建。本组另 1 例患者为枢椎动脉瘤样骨囊肿,虽然采用血管栓塞等方式可以取得满意治疗效果,但本例患者枢椎椎体和侧块被肿瘤侵蚀已经塌陷,患者出现严重的颈痛和斜颈,且患者为 11 岁儿童。为重建枢椎的力学结构,避免患者发育过程中出现颈椎畸形,遂采用了后前联合入路,全切枢椎肿瘤后行 3D 打印假体重建。其余 4 例患者为脊索瘤,脊索瘤分块切除后复发率较高,应力争进行包膜外整块切除,由于面颅的遮挡和椎动脉的存在,枢椎脊索瘤进行包膜外整块切除几无可能,分块进行枢椎所有骨性结构的切除是目前外科能够达到最高标准。切除肿瘤累及椎体的所有骨性结构,可以延缓肿瘤的复发。本组 4 例脊索瘤患者均在术后进行了放射治疗,截止末次随访未见肿瘤复发。本组患者随访时间较短,病例数量较少,还需要延长随访时间,增加病例数量以评估采用分块切除枢椎治疗枢椎脊索瘤的疗效。

综上所述,采用后前路联合分期手术全切上颈椎肿瘤可以达到良好的治疗效果,前路手术需要根据肿瘤累及颈椎的节段选择适宜的手术入路,个体化定制 3D 打印假体为上颈椎前柱结构重建提供了良好的解决方案,能够获得满意的短期临床疗效。

4 参考文献

1. Mavrogenis AF, Guerra G, Romantini M, et al. Tumours of the atlas and axis: a 37-year experience with diagnosis and management[J]. La Radiologia Medica, 2012, 117(4): 616-635.
2. Stulik J, Kozak J, Sebesta P, et al. Total spondylectomy of C2: a new surgical technique[J]. Acta Chir Orthop Traumatol Cech, 2007, 74(2): 79-90.
3. Holliday EB, Mitra HS, Somerson JS, et al. Postoperative proton therapy for chordomas and chondrosarcomas of the spine: adjuvant versus salvage radiation therapy [J]. Spine, 2015, 40(8): 544-549.
4. Tomita K, Kawahara N, Murakami H, et al. Total en bloc spondylectomy for spinal tumors: improvement of the technique and its associated basic background [J]. J Orthop Sci,

- 2006, 11(1): 3–12.
5. Enneking WF, Dunham W, Gebhardt MC, et al. A system for the functional evaluation of reconstructive procedures after surgical treatment of tumors of the musculoskeletal system [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1993, 286: 241–246.
6. Boriani S, Bandiera S, Biagini R, et al. Chordoma of the mobile spine: fifty years of experience[J]. *Spine*, 2006, 31(4): 493–503.
7. Kato S, Murakami H, Demura S, et al. More than 10-year follow-up after total en bloc spondylectomy for spinal tumors [J]. *Ann Surg Oncol*, 2014, 21(4): 1330–1336.
8. Stulik J, Kozak J, Sebesta P, et al. Total spondylectomy of C2: report of three cases and review of the literature [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2010, 23(8): e53–58.
9. Suchomel P, Buchvald P, Barsa P, et al. Single-stage total C-2 intralesional spondylectomy for chordoma with three-column reconstruction: technical note [J]. *J Neurosurg Spine*, 2007, 6(6): 611–618.
10. Cohen ZR, Fourney DR, Marco RA, et al. Total cervical spondylectomy for primary osteogenic sarcoma: case report and description of operative technique[J]. *J Neurosurg*, 2002, 97(3 Suppl): 386–392.
11. Wewel JT, Nunna RS, Tan LA, et al. Novel reconstruction of the anterior craniocervical junction using an expandable cage with integrated fixation after total C2 spondylectomy for chordoma[J]. *J Clin Neurosci*, 2016, 30: 157–160.
12. Tomita K, Toribatake Y, Kawahara N, et al. Total en bloc spondylectomy and circumspinal decompression for solitary spinal metastasis[J]. *Paraplegia*, 1994, 32(1): 36–46.
13. Wei F, Liu Z, Liu X, et al. An approach to primary tumors of the upper cervical spine with spondylectomy using a combined approach: our experience with 19 cases[J]. *Spine*, 2018, 43(2): 81–88.
14. Youssef AS, Guiot B, Black K, et al. Modifications of the transoral approach to the craniovertebral junction: anatomic study and clinical correlations[J]. *Neurosurgery*, 2008, 62(3 Suppl 1): 145–154.
15. Nabil S, Nazimi AJ, Nordin R, et al. Mandibulotomy: an analysis of its morbidities [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2018, 47(12): 1511–1518.
16. Ricciardi L, Sturiale CL, Izzo A, et al. Submandibular approach for single-stage craniovertebral junction ventral decompression and stabilization: a preliminary cadaveric study of technical feasibility[J]. *World Neurosurg*, 2019, 127: 206–212.
17. Jeszenszky D, Fekete TF, Melcher R, et al. C2 prosthesis: anterior upper cervical fixation device to reconstruct the second cervical vertebra[J]. *Eur Spine J*, 2007, 16(10): 1695–1700.
18. Xu N, Wei F, Liu X, et al. Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with Ewing sarcoma[J]. *Spine*, 2016, 41(1): E50–54.
19. Li X, Wang Y, Zhao Y, et al. Multilevel 3D printing implant for reconstructing cervical spine with metastatic papillary thyroid carcinoma[J]. *Spine*, 2017, 42(22): E1326–E1330.
20. He S, Yang X, Yang J, et al. Customized "Whole-cervical-vertebral-body" reconstruction after modified subtotal spondylectomy of C2–C7 spinal tumor via piezoelectric surgery[J]. *Oper Neurosurg(Hagerstown)*, 2019, 17(6): 580–587.
21. Yang J, Cai H, Lv J, et al. In vivo study of a self-stabilizing artificial vertebral body fabricated by electron beam melting[J]. *Spine*, 2014, 39(8): E486–492.
- (收稿日期:2020-05-15 修回日期:2020-08-10)
(英文编审 谭 啸)
(本文编辑 彭向峰)