DOI:10.16016/j.2097-0927.202404079

个性化 3D 打印导板辅助重度脊柱后凸畸形手术矫正

彭元昊[1],成 凯[2],朱浩天[1],王 虹[3],刘 康[1],王宇宁[1],丁焕文[1,2],吴 毅[4] 510000 广州,华南理工大学医学院[1];510000 广州,广州市第一人民医院骨科[2];510000 广州,中国人民解放军南部战区总医院康复医学科[3];400038 重庆,陆军军医大学(第三军医大学)生物医学工程与影像医学系数字医学教研室[4]

[**摘要**] **目的** 评估在个性化 3D 打印导板引导下,行经椎体内截骨术、脊柱内固定术治疗重度脊柱后凸手术的矫形率、椎弓根钉位准确性和治疗效果。**方法** 本研究为单中心非随机性临床试验研究,样本涵盖 2018 年 12 月至 2023 年 6 月期间接受经椎体内截骨术的 19 例患者(男性 8 例,女性 11 例)。其中 7 例患者为导板组,采用计算机辅助设计(CAD)技术进行术前手术规划和术中个性化 3D 打印导板引导,12 例患者为传统组,采用传统置钉矫正。术后评估包括后凸 Cobb 角、脊柱矫正率、钉位准确性和 Oswestry 功能障碍指数问卷调查(Oswestry Dysfunction Index,ODI)。**结果** 研究纳入患者 19 例,平均年龄 48.0 岁。平均随访 26.4(9~54 个月)。所有患者均获得相对满意的矫正效果,导板组平均矫正率为 96.83%,传统组为 86.61%。导板组与传统组平均术中出血量(857 *vs* 1 045 mL)和平均手术时间(344 *vs* 402 min)差异无统计学意义,平均住院时间(11 *vs* 18 d)差异具有统计学意义($P<0.05$)。本研究共置钉 278 枚,其中导板辅助置钉 70 枚,97.1%为 A 级或 B 级;传统组置钉 208 枚,其中 93.8%为 A 级或 B 级。术后 CT/X 线检查显示导板组与传统组后凸畸形矫正均达到一定程度矫正,2 组的平均矫正角度(43.37° *vs* 36.10°)差异无统计学意义;而导板组的矫正率显著高于传统组(96.83% *vs* 86.61%,$P<0.01$);ODI 评分导板组显著低于传统组($P<0.05$)。**结论** 在脊柱截骨术中,利用计算机辅助技术进行术前规划、手术模拟和个性化 3D 打印导板的辅助,能够改善术后矫形率,提高置钉的准确性,改善严重脊柱后凸畸形患者的生活质量。

[**关键词**] 脊柱后凸;导板;3D 打印;计算机辅助设计;病例系列
[**中图法分类号**] R319; R682.13; R687.32 [**文献标志码**] A

Individualized 3D printing guide plates-assisted surgical correction for severe kyphosis deformity

PENG Yuanhao[1], CHENG Kai[2], ZHU Haotian[1], WANG Hong[3], LIU Kang[1], WANG Yuning[1], DING Huanwen[1,2], WU Yi[4] [1]School of Medicine of South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong Province, 510000; [2]Department of Orthopedic Surgery, Guangzhou First People's Hospital, Guangzhou, Guangdong Province, 510000; [3]Department of Rehabilitation Medicine, General Hospital of Chinese PLA Southern Theater Command, Guangzhou, Guangdong Province, 510000; [4]Institute of Digital Medicine, Faculty of Biomedical Engineering and Imaging Medicine, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400038, China

[**Abstract**] **Objective** To evaluate the correction rate, accuracy of pedicle screw fixation and overall clinical efficacy of intravertebral osteotomy and internal fixation surgery with the assistance of 3D printing guide plates in treatment of severe kyphosis. **Methods** A single-center nonrandomized clinical pilot study was conducted on 19 patients (8 males and 11 females) with severe kyphosis undergoing intravertebral osteotomy

[**基金项目**] 国家重点研发计划(2019YFE0126300,2021YFB3800800);广东省自然科学基金面上项目(2021A1515012564,2023A1515010557);广州市重点研发计划(202206040001)
[**通信作者**] 丁焕文,E-mail:Dinghw@scut.edu.cn
吴 毅,E-mail:wuy1979@tmmu.edu.cn

2097-0927/Copyright © 2024, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

between December 2018 and June 2023. Seven of them (CAD group) had preoperative planning with computer-aided design (CAD) and intraoperative guidance of individualized 3D printing guide plates. And another 12 patients (control group) were corrected with conventional pedicle screw placement. Postoperative evaluation included assessment of posterior Cobb angle, spinal angular correction rate, accuracy of pedicle screw placement and Oswestry Dysfunction Index (ODI) questionnaire. **Results** The 19 patients were at a mean age of 48.0 years, and followed up for 26.4 (9~54) months. All of them achieved relatively satisfactory corrective results, with those of the CAD group having a correction rate of 96.83% and those of the control group of 86.61%. There were no statistical differences in average intraoperative blood loss (857 *vs* 1 045 mL) and average operative time (344 *vs* 402 min), but significant difference was observed in average length of hospital stay (11 *vs* 18 d, $P<0.05$) between the 2 groups. A total of 278 nails were placed in this study, including 70 guide-assisted pedicle screws, 97.1% of which were grade A or B. In the control group, 208 pedicle screws were placed, 93.8% of which were grade A or B. Postoperative CT/X-ray scanning displayed that both groups achieved certain correction for kyphosis. No obvious difference was found in the average spinal angular correction (43.37° *vs* 36.10°), and significantly higher correction rate was seen in the CAD group than the control group (96.83% *vs* 86.61%, $P<0.01$). The ODI value was notably lower in the CAD group than the control group ($P<0.05$). **Conclusion** CAD-assisted preoperative planning, surgical simulation and individualized 3D printing guide plates can promote surgical correction and accuracy of pedicle screw placement and improves the quality of life of patients with severe kyphotic deformity.

[**Key words**] kyphosis; guide plates; 3D printing; computer-aided design; case series

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFE0126300, 2021YFB3800800), the General Program of Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515012564, 2023A1515010557), and the Key Research and Development Project of Guangzhou (202206040001). Corresponding author: DING Huanwen, E-mail: Dinghw@scut.edu.cn; WU Yi, E-mail: wuy1979@tmmu.edu.cn

脊柱后凸畸形的患病率在40岁以上的个体中呈显著增加趋势[1],其中60岁及以上的老年人中便有20%~40%罹患脊柱后凸畸形[2-3]。临床上,脊柱后凸表现为脊柱矢状面不平衡,通常由先天性畸形、创伤后骨折愈合不良、脊柱结核和强直性脊柱炎引起。除了影响姿势和功能外,中重度的畸形还可能压迫周围的神经组织,导致胸背部疼痛及伴有下肢麻木等症状[4]。脊柱截骨矫形术是治疗严重脊柱后凸的常用手术方法[5-7],但其中部分患者由于长时间的受力失衡,可伴有严重的椎体解剖结构畸形,这将显著提升手术的神经和血管损伤风险。此外,术中椎体截骨的角度及椎弓根螺钉放置方位也对术后并发症发生和功能恢复密切相关。因此,提高手术的精确度至关重要[5,7-8]。

为了应对这一挑战,基于三维(3D)精确重建的计算机辅助设计(CAD)手术技术已经被广泛应用于骨科手术的各个方面,包括关节置换、修复体设计、有限元分析等,在骨科异常解剖参数评估及矫形辅助方面具有得天独厚的优势。本研究将以CAD技术及3D打印技术为基础,首先对临床影像学数据进行3D数字模型重建,精确测量脊柱的各种解剖参数,并据此于术前通过CAD规划手术入路,构建个性化手术导板。旨在通过个性化导板辅助术者完成术中置钉和截骨定位,提高手术的准确性、安全性和可靠性。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究为单中心非随机临床试验研究,于2018年12月至2023年6月在广州市第一人民医院(华南理工大学附属第二医院)骨科开展实施。遵循患者自愿原则,根据患者意愿,采用非随机方式招募采用3D打印个性化导板辅助手术患者,共计纳入19例重度脊柱后凸患者,于我院行传统或3D打印个性化导板辅助手术,分为导板组($n=7$)、传统组($n=12$)。纳入标准:①胸段后凸Cobb角>80°或胸腰段后凸Cobb角>60°;②存在脊柱疼痛、畸形进行性加重或神经性压迫;③因外观畸形提出手术者。排除标准:①凝血功能障碍患者;②脊柱存在活动性感染;③其他手术绝对禁忌证。本研究获得广州市第一人民医院伦理审查委员会的批准(K-2018-137-01)。所有患者均获得书面知情同意。

1.2 数据收集

所有患者术前均行CT扫描,扫描层厚度为0.50~1.00 mm。CT数据以DICOM格式保存,导入MIMICS 21.0软件(Materialize, Leuven, Belgium)进行解剖三维重建。使用Imageware 13.0软件(UGS Corporation, Plano, Texas, USA)对脊柱进行空间校准。

1.3 临床干预

导板组患者根据重建的三维模型进行手术设计。模拟手术的原理将穿过 C7 椎体的垂直线与穿过骶骨的垂直线对齐,确保矢状面力线共面,尽可能确保无横向剪切力。重复此过程,直到获得满意的模拟矫正,并据此确定截骨节段的范围和位置。椎弓根螺钉位于截骨的部位上方和下方,通过反复模拟椎弓根螺钉的放置,以确定螺钉的最佳角度、方向、长度和直径。最后模拟确定校正杆的长度和曲率。完成这些步骤后,根据手术要求构建导板,使用 3D 打印机打印。

传统组患者则仅进行畸形角度测量、截骨矫形角度测定,不进行导板设计及打印,并于手术后行影像学评估。

1.4 手术评估及随访

本试验所涉及个性化导板构建及手术操作均由同一术者指导并实施,记录术中出血量、手术时间、住院时间、钉位情况、术后并发症等参数。根据 Gertzbein-Robbins 分级标准评估椎弓根螺钉的放置[9](图 1)。通过术前和术后 X 线正侧位检查,测量脊柱后凸的 Cobb 角和矢状面轴向距离(sagittal vertical axis,SVA)来评估脊柱矫正的准确性[10-12]。采用 Oswestry 功能障碍指数(Oswestry Disability Index, ODI)问卷表[13],评估术前和术后患者腰椎功能损害,该指数得分越高,表明功能障碍的严重程度越高。

1.5 统计学分析

采用 SPSS 26(IBM, Armonk, NY, USA)软件进行统计学分析。数据以实际计算范围或 95% 置信区间的平均值表示。除性别采用 χ^2 分析进行对照外,其余参数均采用 Mann-Whitney U 检验进行统计学分析。

2 结果

2.1 围术期临床结果

研究纳入患者 19 例,平均年龄 48.0 岁(表 1),平均随访 26.4(9~54)个月。所有患者均获得满意的矫正效果,导板组平均矫正率为 96.83%,传统组为 86.61%。2 组手术相关指标评估:术中出血量和手术时间差异无统计学意义,住院时间差异具有统计学意义($P<0.05$),见表 2。术后,所有患者都接受了正侧位 X 线及 CT 检查,以评估脊柱矫正情况并检验椎弓根螺钉放置的准确度。

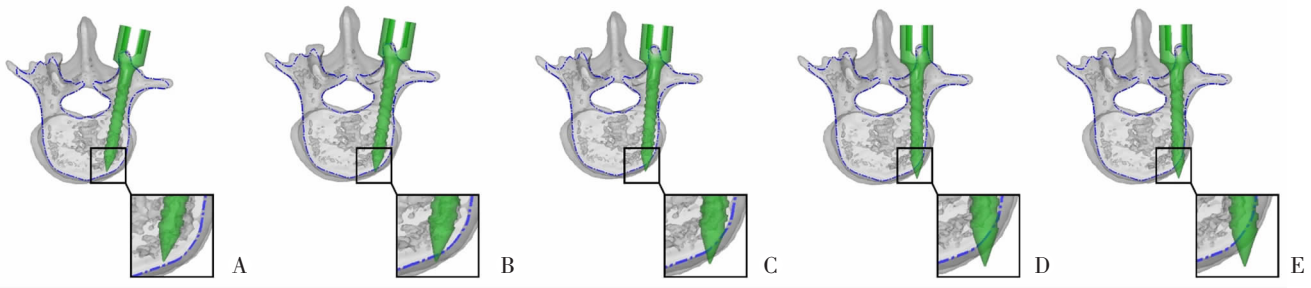
2.2 椎弓根螺钉置钉评估

本研究共植入 278 枚螺钉,通过 CT 扫描评估,并根据 Gertzbein-Robbins 分级系统进行分类。其中导板辅助置钉 70 枚,98.6% 为 A 级或 B 级;传统组置钉 208 枚,其中 94.2% 为 A 级或 B 级(表 3)。

2.3 术中特殊处理及术后评估

在手术过程中,导板组 7 名患者中有 2 名在体感诱发电位仪上表现出轻微的波动;2 名患者下肢感觉减退或肌力减退,均于出院前消退。传统组中 1 名患者因骨质疏松等原因,于半年后对其中 6 枚螺钉进行二次翻修手术。在最后 1 次随访中,导板组 2 名患者表现出不同程度的矫正丧失,但并未发生假体松动,且 2 名成年患者都完成了身高发育,并于术前进行了彻底的 3D 测量,因此,考虑其并发症发生的主要原因可能是强直性脊柱炎的进展。其余患者影像学扫描显示截骨部位骨融合良好,螺钉未松动。

术后 CT/X 线片显示两组患者的后凸畸形都得到了明显的矫正,其平均 SVA 均由术前的严重矢状面失衡状态降至正常或轻微矢状面失衡,但两组间差异并不明显(4.21 *vs* 4.86 cm,表 4);导板组平均矫正角度 43.37°,平均矫正率 96.83%;传统组平均矫正角度 36.10°,平均矫正率为 86.61%;导板组的矫正率显著高于传统组($P<0.01$,表 5)。术后脊柱功能障碍 ODI 评分表明个性导板辅助脊柱截骨矫形在患者腰椎功能改善方面更为显著,差异具有统计学意义($P<0.05$,表 4)。



A:A 级表明螺钉完全在椎弓根内;B:B 级为螺钉突出缺口距离≤2 mm;C:C 级为螺钉突出缺口距离>2~4 mm;D:D 级为螺钉突出缺口距离>4~6 mm;E:E 级为螺钉突出缺口距离>6 mm

图 1 Gertzbein-Robbins 分级评估标准示意图

表 1 19 例纳入研究患者一般情况及临床资料信息

序号	性别	年龄/岁	组别	诊断	ASIA 分级[a]	顶点	随访周期/月
01	女	25	导板	胸腰椎后凸畸形	D	T8	32
02	男	59	导板	陈旧性骨折	D	L1	9
03	男	55	导板	胸腰椎后凸畸形	B	L1	47
04	男	45	导板	胸腰椎后凸畸形	C	L2	17
05	女	41	导板	胸腰椎后凸畸形	D	L2/L3	54
06	男	23	导板	胸腰椎后凸畸形	B	T12/L1	54
07	女	30	导板	陈旧性骨折	D	L1	48
08	女	54	传统	胸腰椎后凸畸形	D	L4/5	12
09	女	58	传统	胸腰椎后凸畸形	C	T12/L1	16
10	女	67	传统	胸腰椎后凸畸形	D	T11/12	17
11	女	60	传统	胸腰椎后凸畸形	D	L1/2	19
12	男	16	传统	胸腰椎后凸畸形	C	L1	20
13	男	53	传统	胸腰椎后凸畸形	B	T7/8	21
14	女	43	传统	胸腰椎后凸畸形	C	T12/L1	21
15	男	51	传统	胸腰椎后凸畸形	D	T12/L1	21
16	女	68	传统	退行性脊柱后凸畸形	D	T12	22
17	男	60	传统	胸腰段后凸畸形	C	T12/L1	22
18	女	56	传统	陈旧性骨折	D	L1	22
19	女	52	传统	胸腰椎后凸畸形	C	T11/12	28

a:美国脊髓损伤协会(American Spinal Cord Injury Association,ASIA)神经功能评分,用于评估脊髓的损伤情况,分为 5 级,其中 A 级最高,为脊髓完全性损伤

表 2 2 组患者手术相关指标比较($\bar{x}\pm s$)

指标	导板组($n=7$)	传统组($n=12$)	P 值
术中出血量/mL	857.14±222.54	1 045.83±1 318.82	0.54
手术时间/min	344.29±51.92	402.42±158.92	0.43
住院时间/d	11.42±3.20	18.50±4.85	<0.05

表 3 2 组患者 Gertzbein-Robbins 分级比较(枚)

分级	导板组($n=70$)	传统组($n=208$)
A 级	66	194
B 级	3	2
C 级	1	2
≤D 级	0	10

表 4 2 组患者脊柱后凸 SVA、ODI 评分比较($n=19,\bar{x}\pm s$)

项目	手术前		P	手术后		P
	导板组	传统组		导板组	传统组	
SVA/cm	14.66±4.77	10.55±2.56	0.056	4.21±1.39	4.86±1.70	0.34
ODI/分	43.71±6.05	44.52±4.98	0.65	9.43±6.05	12.83±3.35	<0.05

表 5 2 组患者脊柱后凸 Cobb 角、矫形率比较($n=19,\bar{x}\pm s$)

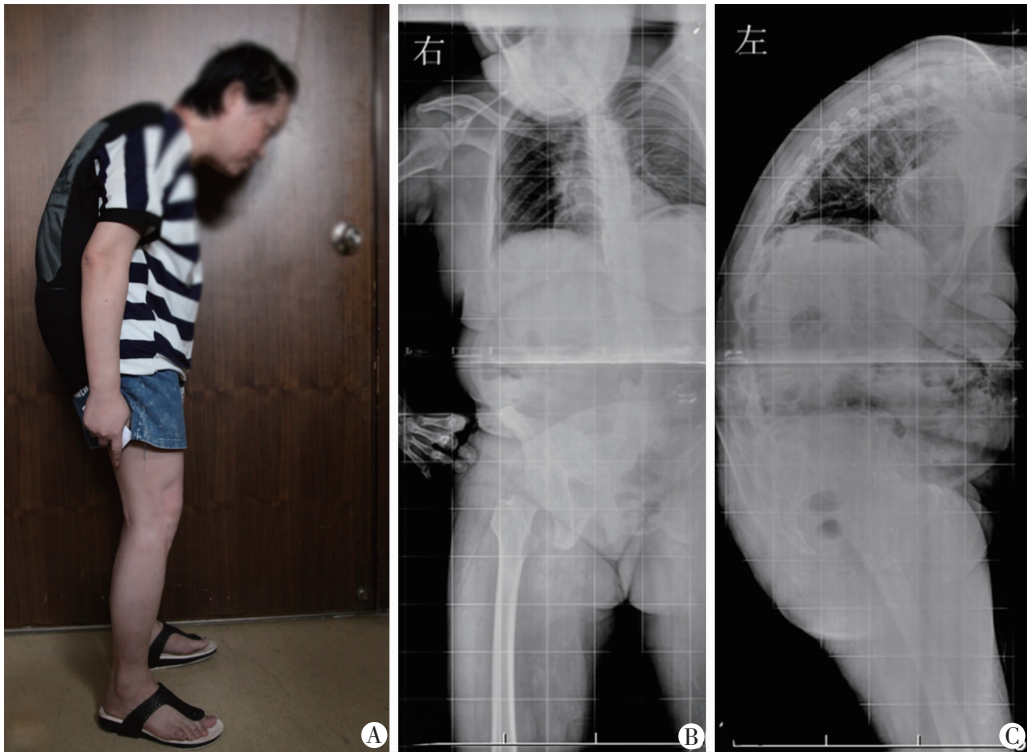
项目	导板组		传统组		P
	手术前	手术后	手术前	手术后	
Cobb 角/度	−42.80±24.40	0.57±15.16	−37.39±12.70	−1.29±5.99	−
矫正度/度	43.37±20.70		36.10±10.77		0.432
矫正率/%	96.83±1.42		86.61±3.55		<0.01

2.4 典型病例

患者,女性,38 岁,身高 150 cm,强直性脊柱炎病史 17 年,后凸畸形病史 4 年,腰腿疼痛 2 年(图 2A)。术前站立正位 X 线片显示后凸顶点位于 L2、L3(图 2B、C)。经个性化导板辅助脊柱截骨矫形术,共植入椎弓根螺钉 8 枚(图 3A、B),术后康复良好,佩戴矫形器 1 周后,患者能够下床自由行走并保持目光前视(图 3C、D)。在 3 年的随访中,没有观察到畸形加重,

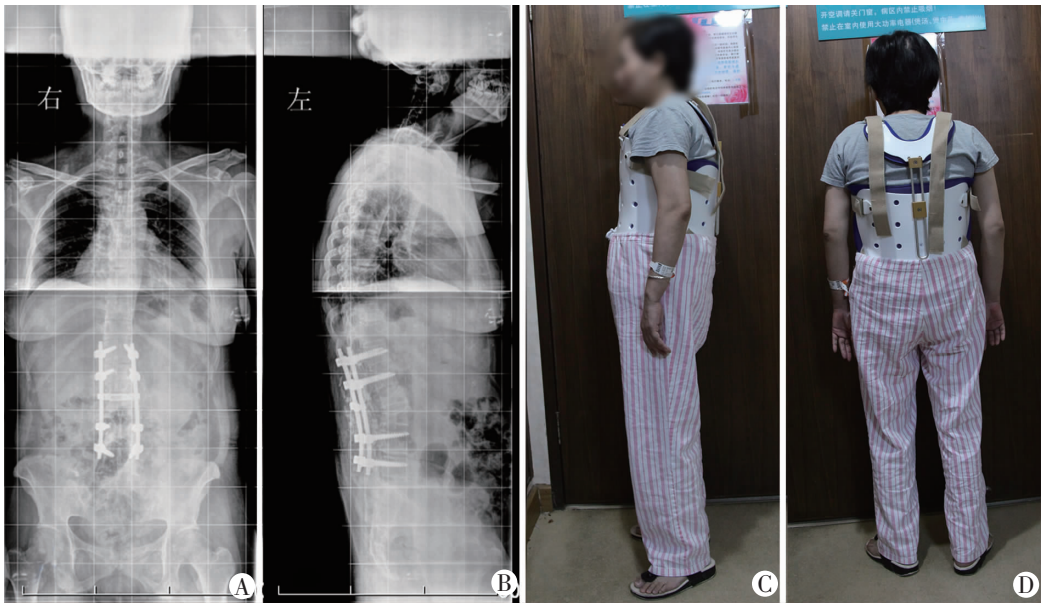
表明手术治疗患者脊柱畸形的长期稳定性和有效性。

利用患者的 CT 数据,使用 Mimics 软件生成整个脊柱的 3D 数字模型。将重建的患者脊柱数据导入 Imageware 软件,经主治医师结合临床专业知识,反复模拟截骨角度和椎弓根螺钉的方位轨迹,构建个性化截骨导板(图 4A~C)。计划在 L2 和 L3 节段各截骨 25°(图 4D~F),并模拟截骨矫形后的脊柱形态。采用 3D 打印技术构建导板实体(图 5),择期完成手术(图 6)。



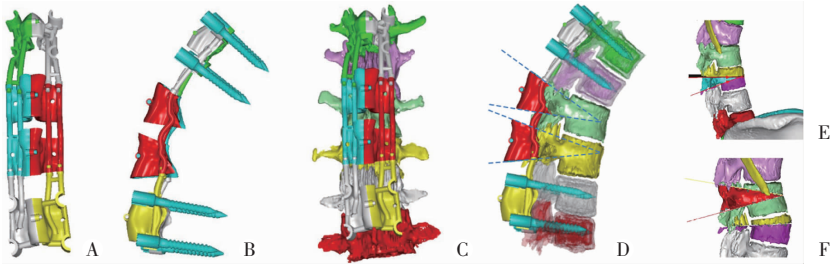
A:术前外观;B:术前站立位正位 X 线片;C:站立位侧位 X 线片显示 L2~L3 的后凸尖端

图 2 患者术前影像学检查及外观



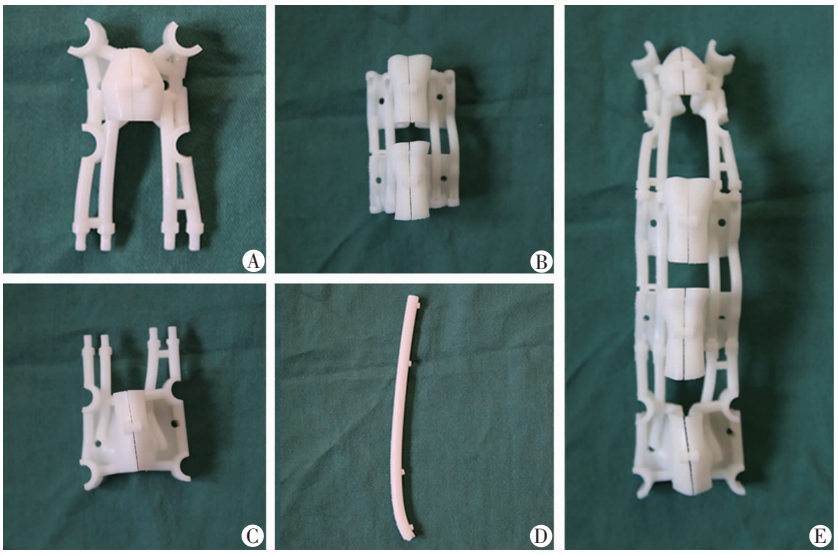
A:站位正位片;B:站位侧位片;C:佩戴矫形器 1 周后,患者能够自由行走并保持目光前视;D:患者背部外观

图 3 患者术后影像学检查及外观



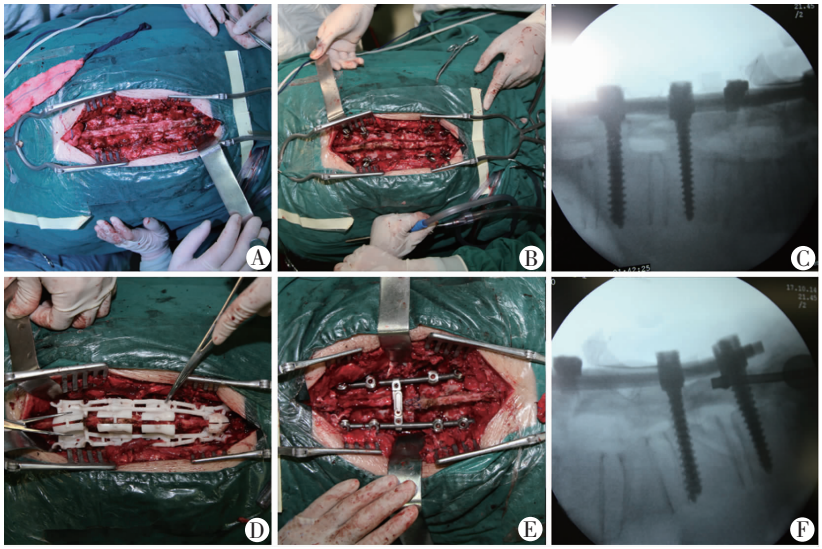
A:钻孔导板与截骨板的设计;B:椎弓根螺钉与钻孔导板的匹配;C:模拟手术区导板放置;D:模拟椎弓根螺钉置入及截骨;E:L3 截骨模拟;F:L2 截骨模拟

图 4 导板模块设计



A:T12、L1 钻孔引导导板;B:L4、L5 钻孔引导导板;C:截骨引导模板;D:连杆;E:安装后个性化脊柱截骨导板

图 5 导板 3D 打印实体



A:充分暴露手术区域;B:拆除导板;C:术中螺钉位置观察(T12, L1);D:放置个性化 3D 打印导板,置入椎弓根螺钉,使用截骨导板辅助截骨;E:固定棒的放置;F:术中螺钉位置观察(L4, L5)

图 6 术中导板应用及影像结果

3 讨论

脊柱截骨矫形配合钉棒系统植入是治疗严重脊柱畸形的最终手段。脊柱是人体重要的承重结构,因此该手术不仅对角度及力线要求度高,假体的植入方位也是决定手术能否成功的重要指标。在传统的手术方法中,不仅依靠术前测量及术中调整,很大程度上还依赖于术者的个人经验,这些经验难以用客观的指标量化,在不同个体间难以复制。通过 CAD 技术及 3D 打印技术,构建个性化手术导板,能够有效地提高手术的精准度,降低手术难度。本研究的结果证实两种手术方法均能实现脊柱截骨矫形及钉棒系统植入,显著改善患者的脊柱功能,但在术后恢复及假体置钉的精准度方面,采用个性化手术导板辅助能够获得更好的手术效果。

3.1 脊柱外科数字矫形现状

现阶段已有一些采用 CAD 技术构建个性化手术导板辅助脊柱截骨矫形内固定术的临床研究相关报道,如 CECCHINATO 等[14]通过建立脊柱的虚拟模型,构建患者个性化引导系统,提升了椎弓根钉的置入精准度,并且由于减少了术中 C 臂照射,还有效降低了患者受到的总辐射剂量。LUO 等[15]同样通过构建个性化导板辅助椎弓根螺钉置钉,显著提高了螺钉的定位,此外其构建的个性化导板辅助置钉系统还可有效减少平均置钉时间,显著缩短手术时长。CHEN 等[16]在利用 3D 打印技术构建个性化脊柱钻孔导板的同时,还针对术中术后体感诱发电位及运动诱发电位进行检测,从神经功能损伤的角度,证实了个性化脊柱置钉导板的安全性,并对椎弓根螺钉的受力环境进行了初步的分析,认为涉及脊柱 T8 层面以上的置钉手术风险较高,更容易出现诸如置钉失败、螺钉折断、移位等并发症。

以上研究充分介绍了个性化导板在椎弓根螺钉置钉方面的应用,证实个性化手术导板辅助椎弓根螺钉置钉的有效性,但在截骨矫形方面,这些研究则主要关注冠状面的成角矫正,缺乏对于矢状面成角的手术规划研究。据此,本研究以矢状面成角的截骨矫形为切入点,结合研究团队前期建立的数字人体解剖模型库及有限元分析方法,对患者脊柱后凸畸形进行空间解剖参数测量,并通过 3D 打印技术构建截骨矫形、置钉一体化手术导板辅助实施手术。从术后结果分析可以发现,采用个性化导板辅助方法的患者能够获得比传统手术更好的脊柱功能恢复。尽管本研究纳入的样本量不大,结论仍需要更大规模的临床试验验证,但该技术的初步应用能够为未来脊柱外科数字精准化提供潜在的发展方向。

3.2 个性化手术导板设计心得

本研究在导板设计及手术实践中注意到,导板的使用均存在一定的匹配失败率,这一点在其他团队所报道的使用记录也有记载。究其原因,我们认为脊柱表面的软组织是导致这一结果的主要因素,因为通过 CT 扫描重建的数字模型无法体现骨表面附着的软组织及软骨,因此在构建导板的过程中,一旦导板的识别区域存在软组织附着,就可能会出现导板匹配失败。在脊柱背侧,椎弓板是最佳的识别区域,该区域无固有韧带,软组织附着较少,可通过器械清理,而棘突则正好相反,棘突表面存在棘上韧带,中部存在棘间韧带。因此,本临床试验中所用的导板识别区均位于椎弓板处,并对棘突处的导板结构适当放大公差,从而提高了导板识别的成功率。

综上所述,本研究认为通过 CAD 技术结合 3D 打印技术辅助完成脊柱截骨矫形内固定术,有助于术者在术前熟悉手术方案,选择最适施术节段区域、角度及置钉方案,借助个性化手术导板可以准确快速地按照术前规划进行截骨置钉,避免椎弓根螺钉的反复调整或置钉失败,减少术中的 C 臂照射,提高术后患者的脊柱功能恢复,是复杂脊柱畸形患者手术规划及实施的重要工具。

参考文献:

[1] KOELÉ M C, LEMS W F, WILLEMS H C. The clinical relevance of hyperkyphosis: a narrative review[J]. Front Endocrinol, 2020, 11: 5. DOI: 10.3389/fendo.2020.00005.

[2] KADO D M, PRENOVOST K, CRANDALL C. Narrative review: hyperkyphosis in older persons[J]. Ann Intern Med, 2007, 147(5): 330-338. DOI: 10.7326/0003-4819-147-5-200709040-00008.

[3] KADO D M, MILLER-MARTINEZ D, LUI L Y, *et al*. Hyperkyphosis, kyphosis progression, and risk of non-spine fractures in older community dwelling women: the study of osteoporotic fractures (SOF)[J]. J Bone Miner Res, 2014, 29(10): 2210-2216. DOI: 10.1002/jbmr.2251.

[4] MAO K Y, WANG Y, XIAO S H, *et al*. Clinical application of computer-designed polystyrene models in complex severe spinal deformities: a pilot study[J]. Eur Spine J, 2010, 19(5): 797-802. DOI: 10.1007/s00586-010-1359-0.

[5] DIEBO B G, SHAH N V, SOLOW M, *et al*. Adult cervical deformity: radiographic and osteotomy classifications[J]. Orthopade, 2018, 47(6): 496-504. DOI: 10.1007/s00132-018-3581-0.

[6] SCHWAB F, BLONDEL B, CHAY E, *et al*. The comprehensive anatomical spinal osteotomy classification[J]. Neurosurgery, 2015, 76(Suppl 1): S33-S41; discussionS41. DOI: 10.1227/01.neu.0000462076.73701.09.

[7] LUAN H P, LIU K, KAHAER A, *et al*. Pedicle subtraction osteotomy for the corrective surgery of ankylosing spondylitis with thoracolumbar kyphosis: experience with 38 patients[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2022, 23(1): 731. DOI: 10.1186/s12891-022-05693-z.

[8] QIAN B P, HUANG J C, QIU Y, *et al*. Complications of spinal osteotomy for thoracolumbar kyphosis secondary to ankylosing spondylitis in 342 patients: incidence and risk factors[J]. J Neurosurg Spine, 2018, 30(1): 91-98. DOI: 10.3171/2018.6.SPINE171277.

[9] GERTZBEIN S D, ROBBINS S E. Accuracy of pedicular screw placement *in vivo*[J]. Spine, 1990, 15(1): 11-14. DOI: 10.1097/00007632-199001000-00004.

[10] FARCY J P, WEIDENBAUM M, GLASSMAN S D. Sagittal index in management of thoracolumbar burst fractures[J]. Spine, 1990, 15(9): 958-965. DOI: 10.1097/00007632-199009000-00022.

[11] JIN C, WANG S R, YANG G D, *et al*. A review of the methods on Cobb angle measurements for spinal curvature[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(9): 3258. DOI: 10.3390/s22093258.

[12] PAN Y L, CHEN Q R, CHEN T T, *et al*. Evaluation of a computer-aided method for measuring the Cobb angle on chest X-rays[J]. Eur Spine J, 2019, 28(12): 3035-3043. DOI: 10.1007/s00586-019-06115-w.

[13] FAIRBANK J, PYNSENT P. The Oswestry disability index[J]. Spine, 2000, 25(22): 2940-2952. DOI: 10.1097/00007632-200011150-00017.

[14] CECCHINATO R, BERJANO P, ZERBI A, *et al*. Pedicle screw insertion with patient-specific 3D-printed guides based on low-dose CT scan is more accurate than free-hand technique in spine deformity patients: a prospective, randomized clinical trial[J]. Eur Spine J, 2019, 28(7): 1712-1723. DOI: 10.1007/s00586-019-05978-3.

[15] LUO M, WANG W G, YANG N N, *et al*. Does three-dimensional printing plus pedicle guider technology in severe congenital scoliosis facilitate accurate and efficient pedicle screw placement? [J]. Clin Orthop Relat Res, 2019, 477(8): 1904-1912. DOI: 10.1097/CORR.0000000000000739.

[16] CHEN P C, CHANG C C, CHEN H T, *et al*. The accuracy of 3D printing assistance in the spinal deformity surgery[J]. Biomed Res Int, 2019, 2019: 7196528. DOI: 10.1155/2019/7196528.

(收稿:2024-04-17;修回:2024-05-20)

(编辑 李 玥)