

· 医学教育 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2023.21.026

基于三维有限元分析的口腔种植可视化教学设计*

李如意¹, 万乾炳¹, 谢果², 裴锡波^{1△}

(1. 四川大学华西口腔医院/口腔疾病防治全国重点实验室, 成都 610041; 2. 四川大学水利水电学院/水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610041)

[摘要] 目的 研究三维有限元分析在口腔种植可视化教学中的应用效果。方法 于 2022 年 9 月 1 日选取四川大学华西口腔医院修复科 56 名学生作为研究对象, 随机分为两组, 每组各 28 例, 试验组采用基于三维有限元分析的可视化教学, 对照组采用传统教学模式。教学过程完成后对两组学生进行卷面考核, 并收集问题反馈问卷, 评估基于三维有限元分析的口腔种植可视化教学设计的应用效果。结果 试验组学生的考核分数(86.54±4.90)明显高于对照组的(77.43±6.32)分, 差异有统计学意义($P < 0.05$)。试验组满意度为 92.9%, 高于对照组的 67.9%, 差异有统计学意义($P < 0.05$)。结论 基于三维有限元分析的可视化教学设计优于传统教学模式, 能够有效提升学生的三维空间构想能力。

[关键词] 口腔医学教育; 三维重建; 有限元分析; 种植修复; 可视化教学

[中图分类号] R783.4

[文献标识码] B

[文章编号] 1671-8348(2023)21-3338-05

自从骨结合现象被发现以来, 口腔种植学科得到了快速发展, 种植牙成为人类的第三副牙齿。种植牙一般由种植体、基台和上部修复体组成。目前临床存在诸多种植体系统, 体系庞大且复杂, 各系统在材质、形态结构或连接方式等方面往往存在一定差异。有文献研究显示, 种植体的尺寸规格、连接方式、基台高度及植入骨内的三维位置等因素会对边缘骨丢失量(marginal bone loss, MBL)和骨组织重建有重要影响^[1-2]。口腔种植的临床实践中, 种植体的选择和术式的设计高度依赖医生个人的临床经验, 而这部分工作决定了种植修复的术后及远期效果。但是当前较少能够形成具体的数据去预测种植修复远期效果, 学生只能被动地在教师抽象的说教式教育中形成较为模糊的概念, 在实际病例中自主完成种植体的选择和术式设计对于大部分学生而言存在一定难度^[3-4]。

种植体周围的微应变应力分布影响 MBL 和骨组织的重建, 对种植体的长期成功率有重要影响^[5]。三维有限元分析技术是计算种植牙系统应力-应变分布最为常用的手段之一, 其具有允许建立精确的病案模型、施加个性化咬合力并能够输出定量及定性数据等优势, 能够较大幅度地模拟临床真实病案^[6-7]。基于此, 本研究从真实的病例资料入手, 利用三维重建技术及三维有限元分析等数字化技术, 实现种植体的微结构、患者颌骨数据的可视化, 以及种植牙预期临床效果的可视化教学, 以期提升学生对种植体系统、术式设计的认识与理解, 培养其循证医学思维。

1 资料与方法

1.1 一般资料

于 2022 年 9 月 1 日选取四川大学华西口腔医院修复科 56 名在读研究生、规培生及进修生作为研究对象。将其随机均分为试验组和对照组, 每组各 28 名。试验组中男 8 名, 女 20 名, 年龄(28.3±3.5)岁; 对照组中男 10 名, 女 18 名, 年龄(27.9±3.1)岁。两组受试者性别、年龄等一般资料比较, 差异无统计学意义($P > 0.05$)。

1.2 方法

对照组进行常规的口腔种植教学, 试验组进行以三维有限元为引导的全过程可视化教学。两组中各分配 1 名教师及 1 名助教, 完成相应组别的教学内容, 要求所有学生了解并掌握 3 种不同的种植体系统, 掌握常规种植术的术式设计, 并就该课程教学的基础知识进行卷面考核。

1.2.1 对照组教学方法

对照组教学内容包括: 观看种植体形貌结构、手术器械盒、种植手术及牙冠戴入的录像, 学习常用种植体系统的种植外科及修复手册。此外, 由教师进行课堂教学, 内容包括种植植入的三维位置基本要求、种植体的选择原则, 并进行不同类型病例的分享, 分小组进行临床真实病案的诊断与分析。课后, 由助教统一收集学生们的问题反馈, 于考试前进行分析探究并解答。

1.2.2 试验组教学方法

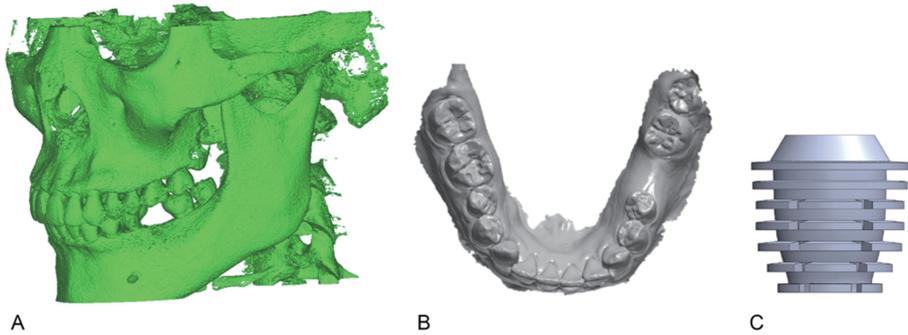
试验组学生自带电脑, 拷贝由教师提供的锥形束计算机断层扫描(cone-beam computed tomography, CBCT)、口内扫描及种植体的三维数据。教师及助教先行演示, 讲解基本要求及基础知识, 随后由学生在

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(82071164); 四川大学基层教学组织特色品牌工作项目(2022JCJX31)。 作者简介: 李如意(1999-), 初级技师, 硕士, 主要从事口腔陶瓷材料、口腔医学数字化研究。 △ 通信作者, E-mail: xpei@hotmail.com。

教师和助教的辅助下进行学习。学生以医学影像数据为基础,通过三维重建技术实现真实病例拟植入位点牙槽骨模型的可视化,辅助以骨质密度、骨高度及骨宽度等的测量工具,让学生在可视化情况下进行种植体选择和术式设计。通过建模实现种植体的虚拟植入及上部修复体的置入,教师引导学生利用三维有限元分析技术计算得到每一套种植方案相对应的临床效果,通过评估种植体内部、牙槽骨内的应力-应变等的定量数据,实现种植体植入效果的可视化,分析、对比已有的数据,完成最优方案设计。

1.2.2.1 医学影像数据获取与三维重建,实现种植位点的可视化

通过 CBCT 设备获取颌面部硬组织三维数据,并



A: 颌骨; B: 牙列; C: 种植体。

图 1 通过三维重建获得的模型图

1.2.2.2 模型测量与种植体模拟植入

完成影像学数据的三维重建即实现了数据可视化。如需使种植体能够放置于合适的位点,教师需要驱动学生测量颌骨的骨质密度和骨量,便于初步选择种植体和设计术式(图 2)。通过模拟植入多个位置或不同系统种植体,提前发现真实临床中可能的种植体及术式,同时代入前期设计完成的修复体,即可完整地展示颌骨、种植体与修复体之间的三维空间位置(图 3)。但是,以种植体与颌骨及修复体的空间关系为限定条件,会存在多种规格的种植体系统及多个植入位置均能满足需求的情况。因此,在完成种植体的虚拟植入后,需要利用三维有限元分析技术分析各种植入方案对应的结果,计算应力-应变分布以评估骨吸收的风险^[10-11]。



A: 不同位置骨密度测量; B: 骨宽度及高度测量。

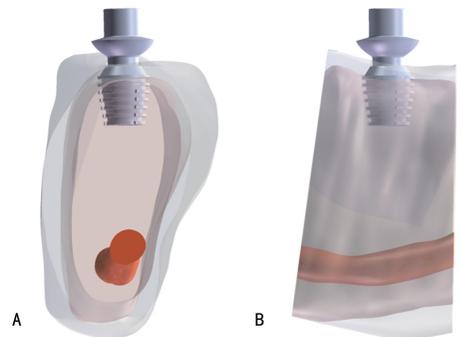
图 2 测量拟植入位点的骨质密度及骨量

1.2.2.3 有限元计算及评估方法

将已经模拟植入的各个模型导入 ANSYS 软件

以医学数字成像和通信格式进行储存,以便后期对数据进行三维重建和测量。由于 CBCT 的精度有限,可利用口内扫描仪获得牙列及咬合的精确数据。在以修复为导向的原则下,利用牙科计算机辅助设计进行修复体设计,形成合理的咬合接触点^[8]。完成修复体设计后,将 CBCT 数据导入到 Mimics 软件中进行三维重建,呈现出颌骨解剖结构。对于种植体系统而言,可通过逆向工程方式构建模型,从而允许学生在软件中对种植体系统连接方式、表面结构进行更细致的观察及精确的测量,见图 1。在教学过程中,可利用 3D 打印设备将虚拟三维模型实体化,同时还可选择多种比例制造实体教学模型^[9]。

中进行模型处理,然后在牙冠特定的咬合点位置施加一定大小、方向的咬合力,运行三维有限元分析的计算环节^[12-13](图 4)。获取三维空间内的应力-应变分布图后,学生即可在完全可视的情况下对不同方案进行对比分析。种植体周围的应力-应变分布会影响骨组织的改建,而改建的可能结果包括维持现有状况、骨密度降低、骨密度增加或骨疲劳而吸收等^[5]。当种植体周围骨内微应变峰值超过 $6.7 \times 10^3 \mu\epsilon$ 的阈值时,种植体周围骨的改建会朝着吸收的方向进行^[14]。学生进行三维有限元分析更加有临床实际意义,在相同的情况下能够提示何种手术方案设计最佳,让种植体和术式的选择有迹可循。



A: 远中观; B: 颊侧观。

图 3 模拟种植体植入

1.2.2.4 不同术式对种植体周围骨内应力-应变分布的

影响

临床诊疗过程中患者的具体情况各不相同,而患者自身的骨质条件和术式的选择对种植牙成功率有重要影响。为了模拟不同的植入深度,此部分教学根据临床真实患者建立三维模型,而后模拟不同的植入深度来总结一般规律。教师分别设置 3 种不同的植体颈部植入深度组别(图 5),通过分析发现骨下 1.0 mm 植入时往往会导致植体与皮质骨的结合面积大幅度降低,同时引起较大数值的应力值和较大范围的应力集中;骨下 0.5 mm 以内的植入深度显示出临床可接受的效果;平齐皮质骨展现出最小的应力值^[15]。通过全程参与,让学生在可视化指引下,对于如何选择种植体和术式将获得更加准确和形象的认识。

1.2.3 教学评价

两组学生完成相应的课程学习后,统一组织 1 次卷面考核。考核的内容主要分为种植手术器械盒及器械的辨认(分值占 20%)、种植体系统结构与形貌的阐述(分值占 20%)、术式选择的原理及方法(分值占 30%)、修复方案的设计(分值占 30%)。此外,设计调查问卷收集两组学生对于各自所接受教学模式的满意度及意见反馈。满意度=(非常满意+满意)/总人数 $\times 100\%$ 。

1.3 统计学处理

采用 SPSS20.0 统计学软件进行数据处理。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用两独立样本 t 检验;计数资料以例数或百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

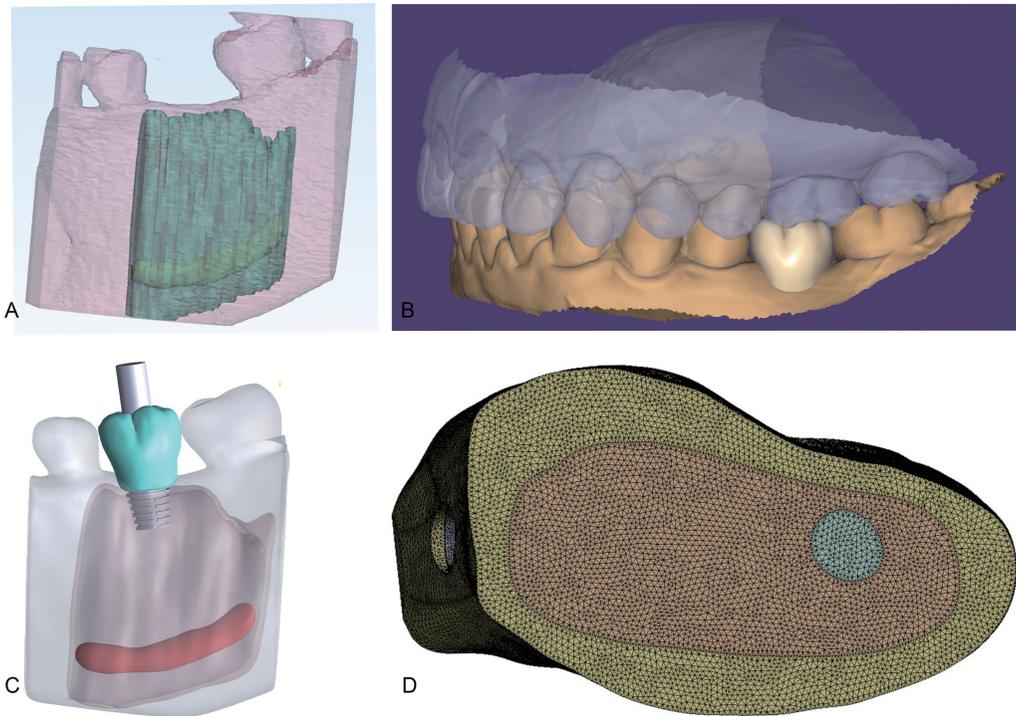


图 4 三维有限元分析过程
A:通过 Mimics 软件分离密质骨、松质骨及下牙槽神经管等解剖结构;B:术前虚拟设计上部修复体;C:术前虚拟修复体指导植体虚拟植入;D:三维模型进行网格划分,以进行运算。

图 4 三维有限元分析过程

2 结 果

2.1 两组学生的考核成绩比较

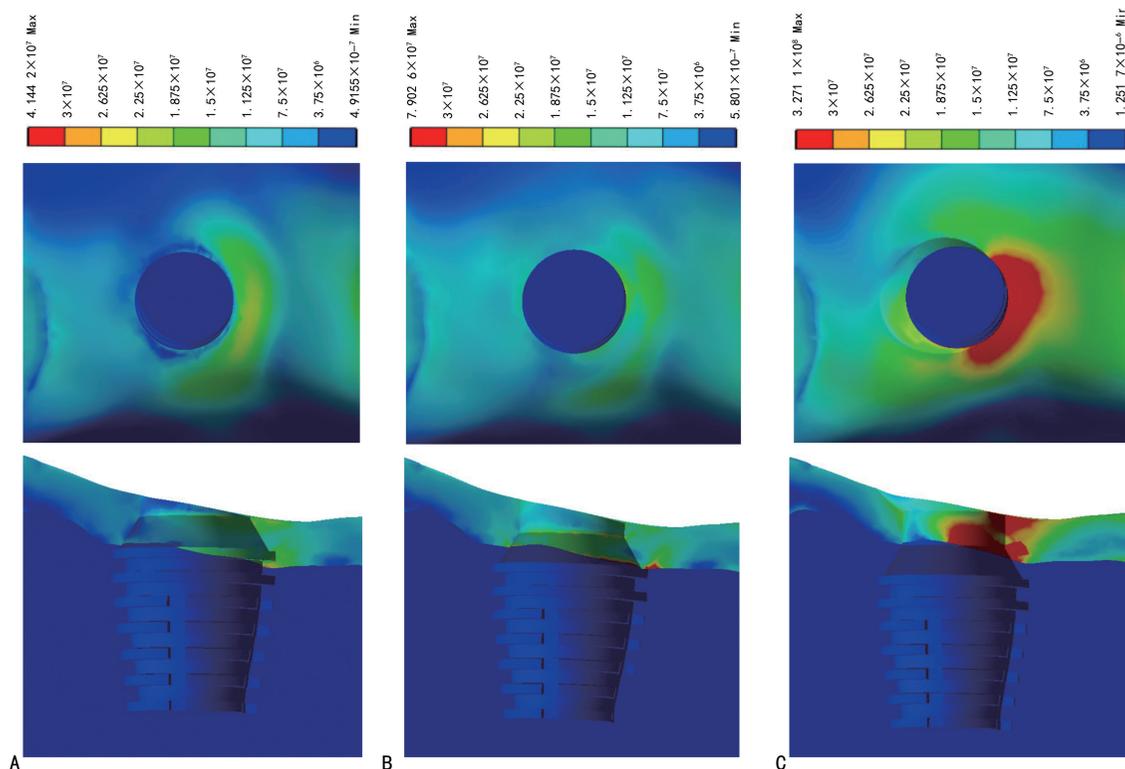
两组学生同期完成考核,结果显示对照组平均得分为(77.43 \pm 6.32)分,低于试验组的(86.54 \pm 4.90)分,差异有统计学意义($P < 0.05$),见表 1。

2.2 两组对教学模式的评价比较

问卷调查结果显示,试验组满意度为 92.9%,对照组的满意度为 67.9%,差异有统计学意义($P < 0.05$),具体评价见表 2。

表 1 两组学生的考核成绩比较($\bar{x} \pm s$,分)

项目	试验组($n=28$)	对照组($n=28$)	t	P
总分	86.54 \pm 4.90	77.43 \pm 6.32	6.028	<0.001
种植手术器械盒及器械的辨认	17.04 \pm 1.57	15.71 \pm 1.61	2.891	<0.001
种植体系统结构与形貌的阐述	17.82 \pm 2.02	14.75 \pm 1.88	5.809	<0.001
术式选择的原理及方法	26.04 \pm 2.03	24.29 \pm 2.02	3.154	0.003
修复方案的设计	25.68 \pm 2.07	22.68 \pm 3.09	4.262	<0.001



A: 植体颈部平齐皮质骨组; B: 植体颈部置于骨下 0.5 mm 组; C: 植体颈部置于骨下 1.0 mm 组。

图 5 有限元分析结果

表 2 两组对教学模式的评价比较 (n=28)

调查项目	非常满意(n)		满意(n)		不满意(n)		满意度[n(%)]		χ^2	P
	试验组	对照组	试验组	对照组	试验组	对照组	试验组	对照组		
总体评价	20	14	6	5	2	9	26(92.9)	19(67.9)	4.073	0.044
利于掌握三维解剖结构	25	10	2	7	1	11	27(96.4)	17(60.7)	8.591	0.003
对实际病案的指导作用	18	16	5	3	5	9	23(82.1)	19(67.9)	1.524	0.217
对教学模式的接受程度	17	11	8	9	3	8	25(89.3)	20(71.4)	1.181	0.178
提高病案的分析能力	22	9	3	12	3	7	25(89.3)	21(75.0)	1.096	0.295

3 讨论

我国人口基数大,人口老龄化加剧,缺失牙的患者数量多,而种植治疗是恢复缺失牙的首选方案^[16-18]。但在种植修复医生的培养过程中,传统的教学模式往往只是将基本知识、原理及准则灌输给学生,学生在课程结束后较难形成相应的三维空间构想能力,不能独立处理临床案例^[19]。本研究利用数字化技术,实现了种植体系统、颌骨及各类术式下的种植牙远期临床效果的可视化教学。以此,在教学过程中能够实时地引导学生认识种植体系统及细微结构,预测种植牙远期预后,使学生在教学过程不再仅仅依赖教课老师的经验及抽象描述。当学生多次参与整个过程的可视化教学活动后,能够在不同类型病案的分析过程中形成某些自我见解,总结规律,最终实现教育目标。

以三维有限元分析为引导实现口腔种植全过程可视化教学的教学模式,充分利用了医学影像资料,使用一系列数字化手段服务于教育教学,从而提升学生对每一环节的掌控程度,避免其在手足无措的想象

中错失掉课程知识点、关键点。本研究表明,试验组的考核成绩(86.54±4.90)分高于对照组的(77.43±6.32)分,差异有统计学意义(P<0.05);试验组满意度为92.9%,对照组的满意度为67.9%,差异有统计学意义(P<0.05)。表明试验组的学生对种植术整个过程中的多个环节具有更好的理解和三维虚拟构造能力,全过程的可视化更是增强了其对术式设计的理解。除此之外,通过全过程可视化教学,包括对结果的预测,能够服务于医患沟通过程,增加患者对整个过程的理解程度,不仅可以提高患者的配合度,也有助于避免某些不必要的医患纠纷。

在口腔种植修复临床实践中,特别是对于某些特殊病例,使用三维有限元分析可在一定程度上预测术前各种可能的术式,以及完成后骨内及植体系统内相应部位的最终微应变应力分布,协助临床医生制订治疗方案^[20]。在未来的临床治疗中,通过互联网上传图片,进行有限元计算,并向医生提供分析数据予以参考,可辅助确定治疗方案。本研究以三维有限元为引入口,实现了教学和临床实际病案的全过程可视化,

结合 3D 打印技术制作手术导板,可以使每例患者的治疗过程更具保障,确保长期效果,促进循证医学的发展。

参考文献

- [1] LOMBARDO G, SIGNORIELLO A, MARINCOLA M, et al. Survival rates of ultra-short (<6 mm) compared with short locking-taper implants supporting single crowns in posterior areas: a 5-year retrospective study[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2021, 23(6):904-919.
- [2] LOMBARDI T, BERTON F, SALGARELLO S, et al. Factors influencing early marginal bone loss around dental implants positioned subcrestally: a multicenter prospective clinical study[J]. *J Clin Med*, 2019, 8(8):1168.
- [3] 段丁瑜,李妍熹,姚洋. 口腔种植学教育的现状[J]. *重庆医学*, 2022, 51(6):1070-1073.
- [4] 王俊成,吴昊,时权,等. 口腔种植病例汇报与讨论在继续医学教育中的作用初探[J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2020, 21(2):112-114.
- [5] LEE H, PARK S, NOH G. Biomechanical analysis of 4 types of short dental implants in a resorbed mandible[J]. *J Prosthet Dent*, 2019, 121(4):659-670.
- [6] VAN STADEN R C, GUAN H, LOO Y C. Application of the finite element method in dental implant research[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2006, 9(4):257-270.
- [7] 吴越琳,刘加荣. 三维有限元分析在口腔医学领域的研究进展[J]. *口腔医学*, 2021, 41(7):659-663.
- [8] CHEN S, LI R, WU Z, et al. An implant-supported overdenture for a mandibular defect after tumor resection guided by 3-dimensional finite element analysis: a clinical report [EB/OL]. (2022-06-25)[2023-02-18]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022391322003523>.
- [9] 胡杉杉,王剑. 3D 打印技术在口腔修复学实验教学中的应用初探[J]. *北京口腔医学*, 2019, 27(3):171-172.
- [10] BHATTACHARJEE B, SANEJA R, SINGH A, et al. Peri-implant stress distribution assessment of various attachment systems for implant supported overdenture prosthesis by finite element analysis: a systematic review [J]. *J Oral Biol Craniofac Res*, 2022, 12(6):802-808.
- [11] LISIAK-MYSZKE M, MARCINIAK D, BIELINSKI M, et al. Application of finite element analysis in oral and maxillofacial surgery—a literature review [J]. *Materials*, 2020, 13(14):3063.
- [12] TRIBST J P M, PIVA A M O, GIUDICE R, et al. The influence of custom-milled framework design for an implant-supported full-arch fixed dental prosthesis: 3D-FEA study [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(11):4040.
- [13] JOERN D, KOHORST P, BESDO S, et al. Three-dimensional nonlinear finite element analysis and microcomputed tomography evaluation of microgap formation in a dental implant under oblique loading [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2016, 31(3):e32-42.
- [14] MELSEN B, LANG N P. Biological reactions of alveolar bone to orthodontic loading of oral implants [J]. *Clin Oral Implants Res*, 2001, 12(2):144-152.
- [15] GATTI C, GATTI F, SILVESTRI M, et al. A prospective multicenter study on radiographic crestal bone changes around dental implants placed at crestal or subcrestal level: one-year findings [J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2018, 33(4):913-918.
- [16] 赵玉峰,杜飞轮,孔伟艳. 我国人口老龄化的区域分布特点[J]. *中国经贸导刊*, 2022, 33(6):83-85.
- [17] JOHANNSEN A, WESTERGREN A, JOHANNSEN G. Dental implants from the patients perspective: transition from tooth loss, through amputation to implants—negative and positive trajectories [J]. *J Clin Periodontol*, 2012, 39(7):681-687.
- [18] KANAZAWA M, TANOUE M, MIYAYASU A, et al. The patient general satisfaction of mandibular single-implant overdentures and conventional complete dentures: study protocol for a randomized crossover trial [J]. *Medicine*, 2018, 97(20):e10721.
- [19] 周艺群, 姒蜜思, 程志鹏. 数字化口腔种植临床实践教学模式的探讨[J]. *继续医学教育*, 2022, 36(6):45-48.
- [20] KRENNMAIR S, HUNGER S, POSTL L, et al. Edentulous mandible with four splinted interforaminal implants exposed to three different situations of trauma: a preliminary three-dimensional finite element analysis [J]. *Dent Traumatol*, 2020, 36(6):607-617.