DOI: 10.14188/j.1671-8852.2026.0608

数字化印模多学科诊疗的临床效能与经验代偿

高文玲[1]　蔡善明[2]　宋　静[1]　陈国新[1]
[1]武汉大学口腔医院　湖北　武汉　430079；
[2]枝江市口腔医院正畸科　湖北　枝江　443200

摘要　目的：探讨数字化印模技术在多学科联合诊疗中的三维精度，及其对操作者经验差异的临床代偿效应。方法：构建包含三维均方根误差（*RMSE*）、师生操作耗时差（技能鸿沟，ΔT）及多维主观评价体系，对比医师与初学者在普通正畸/伴牙周病场景及单/双植体种植修复场景下的印模效能。结果：数字化3D打印模型总体*RMSE*（0.076 9±0.019 5）mm优于传统石膏模型（0.108 8±0.026 4）mm。正畸与伴牙周病组中，师生操作的ΔT分别显著降低55.39%、46.41%；同时种植场景下双植体组操作耗时离散度显著降低。多维主观评价显示，数字组的患者接受度、操作便捷性优于传统组（$P<0.01$），医护人员偏好数字化流程并支持分级授权。结论：数字化印模三维重建精度更高，其经验代偿效应具有显著的场景特异性。在正畸与牙周病治疗中可提升临床操作稳定性，在复杂种植修复中经验代偿作用较弱。本研究为该技术临床推广、完善多学科诊疗分工与分级授权管理提供实践依据。

关键词　数字化印模；经验代偿；临床效能；三维精度；多维主观评价；多学科诊疗
中图分类号　R783　　**文献标志码**　A

Clinical efficacy and experience-dependent compensatory effect of digital impressions in multidisciplinary treatments

GAO Wenling[1], CAI Shanming[2], SONG Jing[1], CHEN Guoxin[1]
[1]*Hospital of Stomatology, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China*;
[2]*Department of Orthodontics, Zhijiang Stomatological Hospital, Zhijiang 443200, Hubei, China*

Abstract

Objective: To assess the three-dimensional accuracy and experience-dependent compensatory effect of digital impressions in multidisciplinary dental treatments. **Methods:** An evaluation system including accuracy (Root Mean Square Error, *RMSE*), expert-novice operation time difference (skill gap, ΔT), and multidimensional subjective evaluation was established to compare impression efficacy in conventional orthodontic, periodontal, and single and double implant scenarios. **Results:** The overall *RMSE* of digital 3D-printed models (0.076 9±0.019 5) mm was significantly lower than that of conventional plaster models (0.108 8±0.026 4) mm. In the orthodontic and periodontal groups, the skill gap ΔT was significantly reduced by 55.39% and 46.41%, respectively ($P<0.01$). In the double implant group, the variability of operation time decreased significantly. Multidimensional subjective evaluation showed better patient acceptance and convenience in the digital group ($P<0.01$), with clinicians preferring tiered digital workflows. **Conclusion:** Digital impressions present higher 3D re-

课题来源：武汉大学口腔医院新业务新技术立项项目。
作者简介：高文玲，女，1983—，哲学博士（PhD），主治医师，主要从事口腔修复、种植及数字化诊疗与多学科临床研究，E-mail：66166936@qq.com。
通信作者：陈国新，E-mail:chenguoxin919@whu.edu.cn。

construction accuracy and scenario-specific experience compensation. They enhance clinical operational stability in orthodontic and periodontal treatments, but have a weaker compensatory effect in complex implant cases. These results provide a practical reference for clinical promotion, multidisciplinary division of labor, and task delegation management.

Key Words Digital Impression; Experience Compensation; Clinical Efficacy; Three-Dimensional Accuracy; Multidimentional Subjective Evaluation; Multidisciplinary Treatment

以口内扫描(Intraoral Scanning,IOS)为核心的数字化印模技术是当前口腔临床数字化转型中应用最成熟、普及度最高的技术之一[1-3]。数字化印模技术的研究已从早期单学科的体外精度测试,拓展至多学科联合诊疗的体内临床验证,并延伸到医疗资源统筹配置乃至全链条医疗管理、服务效益等宏观层面[4-5]。大量研究[2,4,6]已证实,该技术在口腔常规修复、种植与正畸治疗中具备优异的准确性和稳定性。然而针对数字化印模技术的复杂种植修复、特别是伴牙周病正畸等多学科治疗中,体内临床应用效果、操作效能以及医患双端实际获益的临床系统性评价,目前仍缺乏数据支撑与系统性评价报道[3,7-8]。

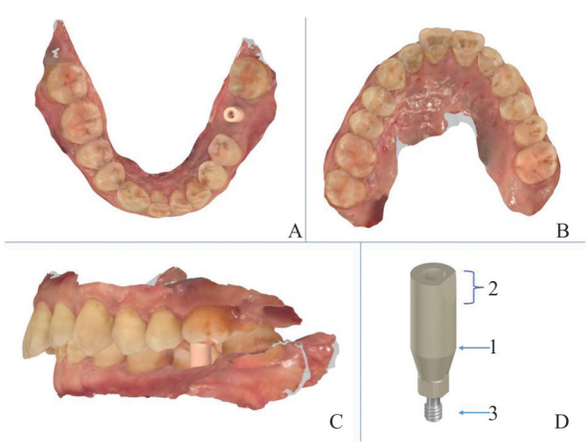
为此,本研究纳入正畸与种植双学科病例,旨在从客观精度、操作耗时及多维主观评价三个维度,综合评估该技术的临床应用效能,并进一步探讨其经验差异的代偿作用,为中小型诊所优化诊疗流程、教学医院完善多学科数字化诊疗规范与教学体系提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象 本研究选取2024年1—12月于我院就诊的正畸及种植患者95人,本院医师、实习学生、护士各10名。其中种植组30例(后牙区单植体20例,双植体10例)、正畸组65例(牙周健康者45例,合并牙周病者20例),各组基线资料具有可比性($P>0.05$)。本研究经武汉大学口腔医院伦理审查委员会批准,伦理号:[WDKQ2026]伦审字(B37)号。

1.2 印模与模型制作 种植组在缺失区植入1~2颗Straumann骨水平种植体(直径3.3~4.8 mm,长度8~10 mm)后,骨结合稳定后分别制取传统及数字化印模。传统印模采用3M Impregum™ Penta™ Soft机混型聚醚印模材料取工作印模,藻酸盐取对颌印模,灌注石膏模型。数字化印模使用iTero Element扫描仪(Align Technology,USA)配合专用扫描杆(CARES® RC Mono Scanbody-D 4.1 mm,H 10 mm,PEEK,TAN,Straumann Institute)依次扫描杆、邻牙、对颌牙列,记录咬合关系,打印3D模型(图1)。将IOS数据经CAD/CAM制作全瓷冠,以35 N扭力将其分别固位于传统石膏模型与3D打印模型上。正畸组同一患者分别进行硅橡胶二次法制取传统印模及使用iTero获取数字化印模。

1.3 模型精密度分析 本研究仅针对种植组修复模型开展三维偏差评价。将原始IOS的STL数据,石膏及3D打印模型及就位后修复体分的石膏及打印模型的STL数据导入Geomagic Control X(2018.1.0)。以修复位点为中心截取5~7个牙位硬组织作为感兴趣区域完成配准,计算三维均方根误差(Root Mean Square Error, *RMSE*)评价模型精度。



A. 数字化印模上颌牙列扫描视图;B. 数字化印模下颌牙列扫描视图;C. 数字化印模口内咬合视图;D. 专用扫描杆组件(1:扫描杆主体,2:定位斜面,3:种植体连接端)。

图1 数字化种植印模获取及专用扫描杆示意图

1.4 数字化印模的操作效能与经验代偿效应分析 95例患者均由医师完成两种方式印模。抽取60例患者由10名接受过标准化培训的学生进行重复操作,分组详情见表1。同时记录椅旁操作总耗时(t_4),数字化组记录建档耗时(t_1)、核心操作耗时(t_2)及渲染上传耗时(t_3),定义同场景下医师和学生的操作时间差为“技能鸿沟”(ΔT)。

表1　临床效能与经验代偿评估的样本分组设计

组别	亚组	医师扫描例数	学生扫描例数
种植组	单植体	20	10
	双植体	10	10
正畸组	常规正畸	45	20
	牙周病	20	20
合计		95	60

1.5　多维主观评价与临床决策倾向　应用改良Likert 5点量表评价患者舒适度与接受度、操作者便捷度及易学性，以及护理配合便捷度，同步调查双方医患印模偏好与临床决策倾向。

1.6　统计方法　所有数据使用SPSS 27.0软件进行统计分析，计量资料以均数±标准差（$\bar{x}\pm s$）表示，独立样本组间比较采用独立样本t检验，配对数据采用配对t检验；不完全配对数据，采用线性混合效应模型（LMM）分析。等级资料采用中位数（四分位数间距）[$M(P_{25},P_{75})$]或百分比表示，采用Wilcoxon符号秩检验，计数资料采用χ^2检验。以$P<0.05$为差异具有统计学意义。

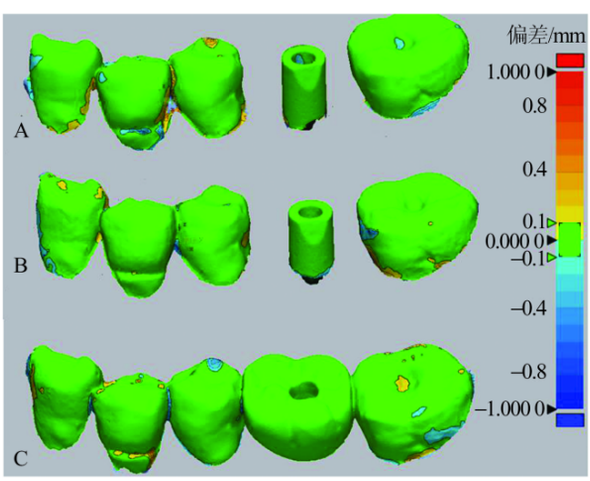
2　结果

2.1　模型与修复体三维精密度评价　数字化模型总体*RMSE*显著低于传统石膏模型，差异有统计学意义（$P<0.01$，表2），且在单、双植体亚组中均保持精度优势（$P<0.01$及$P<0.05$）。传统组模型误差随着种植跨度增大上升（$t=-2.086$，$P<0.05$），而数字化组受跨度影响极小，单、双植体组间无统计学差异（$t=-1.082$，$P>0.05$）。

尽管两类模型精度存在差异，但对单、双植体全瓷冠就位的模型间偏差无统计学差异（$P>0.05$，图2）。

表2　两种印模技术下种植体模型的*RMSE*三维偏差比较　（$\bar{x}\pm s$）

组别	传统石膏组*RMSE*/mm	数字化组*RMSE*/mm	t	P值
单植体组（$n=20$）	0.102 1±0.022 5	0.0740±0.018 0	5.26	<0.01
双植体组（$n=10$）	0.122 2±0.029 6	0.0825±0.022 1	2.90	<0.05
总体样本（$n=30$）	0.108 8±0.026 4	0.0769±0.019 5	5.57	<0.01



A. IOS与传统石膏模型间三维偏差；B. IOS与数字化3D打印模型间三维偏差；C. 种植体上部修复体三维偏差。

图2　种植模型及修复体就位精度的三维RMSE色谱偏差图

2.2　操作效能与经验代偿效应的场景特异性分析　种植数字化建档（t_1）（294±22）s与渲染上传耗时（t_3）（89±7）s显著高于正畸流程。本研究以核心操作时间（t_2）评估技术效率，以椅旁总耗时（t_4）评估整体临床稳定性，正畸流程则采用t_4综合评价。数字化技术随种植跨度变化存在差异（表3），单植体组医师及学生核心耗时（t_2）均显著短于传统组（$P<0.01$）；但双植体组，医师组数字化t_2显著长于传统组（$P<0.01$），而学生组差异无统计学意义（$P>0.05$），但数字化组数据分布更为集中。受“掩蔽效应”影响，单植体组医师和学生数字化组t_4与传统组差异无统计学意义（$P>0.05$），而在双植体时医师和学生总耗时的差异显著（$P<0.01$），但学生的总耗时标准差SD低于传统组。所有正畸病例数字化印模t_4更短，合并牙周病组的增效更显著（$P<0.01$，表3）且显著减小数据离散度（$P<0.01$，表3）。

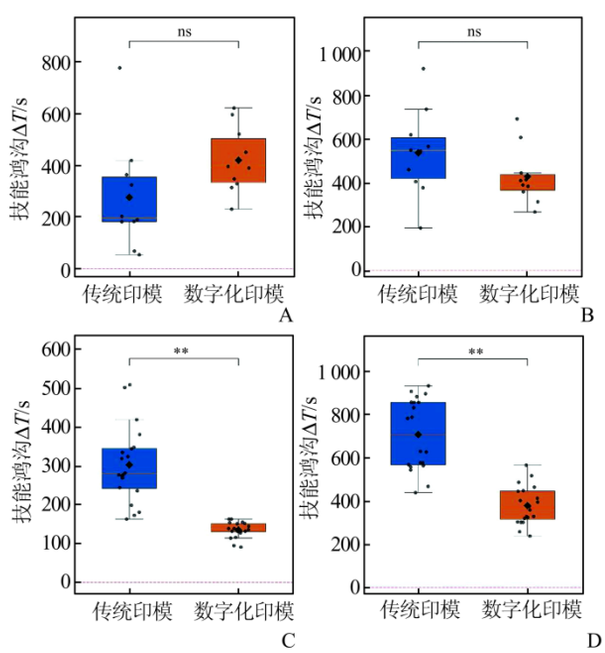
场景特异性分析显示，种植组学生核心操作时间（t_2）与总耗时（t_4）、正畸组学生总耗时（t_4），均显著长于同组医师（均$P<0.01$，表3）。单、双植体组的技能鸿沟ΔT在两种取模方式间的差异均无统计学意义（$P>0.05$，图3）。但双植体数字化组数据离散度更低。而数字化技术使普通正畸组与正畸牙周联合组的技能鸿沟ΔT分别显著缩减55.39%和46.41%（均$P<0.01$，图3）。

2.3　多维主观评价与临床决策倾向　本研究回收有效问卷125份，其中患者问卷95份、医护问卷30份。种植与正畸场景评分无统计学差异（$P>0.05$）。合并分析，结果显示患者对数字化印模的舒适度与接受度显著优于传统组（$P<0.01$），满意率达100%，传统组仅为11.58%。96.84%的

表3 种植与正畸临床效率及耗时多维分析 $(\bar{x}\pm s)$

类别			医师		学生	
			核心操作(t_2)/s	总耗时(t_4)/s	核心操作(t_2)/s	总耗时(t_4)/s
种植	单植体组	传统组	785±88	785±88	1 130±166††	1 130±166††
		数字化组	546±74**	839±77^{ns}	909±111**††	1 206±107^{ns††}
	双植体组	传统组	955±112	955±112	1 492±171††	1 492±171††
		数字化组	1 143±119**	1 433±125**	1 565±115^{ns††}	1 861±117**††
正畸	普通正畸组	传统组	—	660±39	—	966±138††
		数字化组	—	331±33**	—	471±54††
	牙周病组	传统组	—	973±91	—	1 679±239††
		数字化组	—	424±44**	—	802±129††

注:与同操作者的传统组相比,$^{*}P<0.05$,$^{**}P<0.01$,ns表示无统计学差异;与同方法的医师组相比,$^{\dagger}P<0.05$,$^{\dagger\dagger}P<0.01$。



A.单植体场景;B.双植体场景;C.常规正畸场景;D.正畸合并牙周病场景。$^{**}P<0.001$,ns.无统计学差异。

图3 两种印模技术对临床经验差异(师生ΔT)的代偿效应分析

患者首选或接受数字化技术,仅3.16%倾向传统方法。在操作端,数字化的便捷与易学满意度均达95.00%,显著高于传统组的15.00%与10.00%(均$P<0.01$)。修复体边缘密合度及咬合精度的主观评价更佳($P<0.01$)。96.67%的医护人员首选数字化流程,同时全部护理人员偏好配合数字化工作流程,90.00%的操作者有向低年资人员或第三方进行"授权"操作意愿。

3 讨论

当前,口内数字印模技术的临床优势已获广泛共识[1,6]。但在复杂临床场景下的技术边界与经验代偿效应仍缺乏多维度证据。本研究从精度、时效及多维主观评价三方面评估其真实效能。

临床研究难以直接获取患者牙列的三维"绝对真值",IOS是目前最接近真实解剖形态的无创数据[1,9]。本研究以此为基准量化$RMSE$[7,10]。结果显示,数字化模型的总体精密度显著优于传统石膏模型,并且随着种植跨度增加,传统印模误差显著放大而数字化印模则展现出优异的稳定,这也印证了复杂解剖条件会加剧传统材料的脱模形变风险的既往结论[4,11]。我们体外研究发现在常规短跨度种植中两类模型修复体具备"临床等效性",这不仅提升了修复结果的可预期性,还保障了系统容错率[12-13]。相较于种植对印模精密度要求严苛,正畸临床更侧重拓扑结构还原,天然牙的生理动度可抵消微小印模误差,故本研究将评价重心转向临床操作效能及医患综合体验[2,13-14]。

操作耗时是评估印模技术临床效能的核心指标。既往研究多以绝对耗时评价经验代偿效应[8,15]。本研究在此基础上引入技能鸿沟ΔT剔除固有耗时干扰。结果显示数字化技术经验代偿效应存在显著的学科差异。在种植修复中数字化无法弥补经验效率差距。建档与渲染形成的系统掩蔽效应掩盖了扫描优势,单植体椅旁耗时与传统方式接近;双植体病例甚至出现效能倒挂,这可能与解剖标志不足、唾液干扰易出现反复补扫与拟合误差有关[16]。两组模技术ΔT无明显差异提示单纯更换技术尚不能完全抹平经验操作差距[15]。但双植体组ΔT的离散度收窄,意味着数字化印模技术能改善无经验初学者的操作稳定性,降低取模失败极端值,这与既往观点一致[15,17]。

在正畸治疗中数字化印模技术兼具了临床高效,操作稳定性及经验代偿优势,印证了LIMONES等的最新结论[8]。正畸相较种植口腔解剖环境无需繁杂的前期建档,并且单次连续采集模式免去多步

拟合流程。同时天然牙列提供了丰富、连续的三维参照点，使算法拼接极其顺畅，渲染也极为迅速。显著压缩非临床耗时，弱化了系统掩蔽效应，使扫描提速充分传导至整体椅旁流程[6]。在牙周-正畸联合病例上述优势中进一步放大，避免了传统印模制取的托盘就位困难、硅橡胶嵌塞、松动牙意外脱落等临床风险，提升了初学者的操作效率，高度契合《口腔正畸数字化检查和测量分析专家共识》所倡导的安全、高效、标准化理念[2,7,18]。国内牙周-正畸联合场景下数字化印模效能的定量研究不足，本研究一定程度上填补了该领域证据的空白。本研究明确了数字化印模经验代偿的学科特异性可弥补初学者经验不足，但仅为横断面观察，未追踪学习曲线变化，其长期掌握规律仍需大样本纵向研究进一步明确[19-20]。

多维主观评价结果显示，数字化印模可显著改善患者操作舒适度与就诊体验，与既往多项系统评价及专家共识的结论高度一致[1,6,12]。操作简便、易于掌握，对修复体边缘密合度与咬合精度的评价，均获得操作者高度认可，并且90%操作者支持数据采集分级授权，96.67%的医护人员首选数字化诊疗流程。不仅如此，在综合门诊的实际运行中，单一多功能IOS设备可同步完成正畸、种植、修复多专业印模采集、方案评估及后续加工对接，可提升临床效率，降低学习与流程成本，兼具良好经济性，同时也适配教学医院优化诊疗分工、弱化经验差异，为院内任务分层管理提供依据[5,20]。

综上所述，数字化3D打印模型的三维精度优于传统石膏模型，其经验代偿作用具有临床场景特异性。该技术患者接受度与医护对诊疗满意度俱佳，其诊疗、流程规范统一，可实现扫描分级授权，优化医护技诊疗分工，在综合门诊与教学医院中具备良好的临床推广价值。

参考文献

[1] 黄翠，刘峰，满毅，等．口内数字印模技术[J]．实用口腔医学杂志，2023，39(6)：689-695.
HUANG C，LIU F，MAN Y，et al. Intraoral digital impression technique[J]. J Pract Stomatology，2023，39(6)：689-695.

[2] 中华口腔医学会．口腔正畸数字化检查和测量分析专家共识：T/CHSA 078－2024[S]．北京：中华口腔医学会，2024.
Chinese Stomatological Association. Expert consensus on orthodontic digital examination and measurement analysis：T/CHSA 078－2024[S]. Beijing：Chinese Stomatological Association，2024.

[3] REVILLA-LEÓN M，GÓMEZ-POLO M，KOIS J C. A guide for selecting the intraoral scan extension when fabricating tooth- and implant-supported fixed dental prostheses[J]. J Esthet Restor Dent，2024，36(1)：85-93.

[4] ALFARAJ A，ALQUDAIHI F，KHURSHID Z，et al. Comparative analyses of accuracy between digital and conventional impressions for complete-arch implant-supported fixed dental prostheses：A systematic review and meta-analysis[J]. J Prosthodont，2026，35(3)：252-274.

[5] 叶年嵩，房兵．数字化正畸发展现状[J]．实用口腔医学杂志，2022，38(6)：707-712.
YE N S，FANG B. The state of art of digital orthodontics[J]. J Pract Stomatology，2022，38(6)：707-712.

[6] CHRISTOPOULOU I，KAKLAMANOS E G，MAKRYGIANNAKIS M A，et al. Intraoral scanners in orthodontics：A critical review[J]. Int J Environ Res Public Health，2022，19(3)：1407.

[7] LIN W C，LEE C C，LEE S Y，et al. Influence of operator experience on the complete-arch accuracy and time-based efficiency of three intraoral scanners[J]. J Dent Sci，2025，20(1)：620-625.

[8] LIMONES A，MORTON D，SALLORENZO A，et al. Impact of operator experience on intraoral digital scanning：A systematic review，meta-analysis，and meta-regression. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics[J]. J Prosthet Dent，2026，135(2)：297. e1-297. e13.

[9] RUTKŪNAS V，AUŠKALNIS L，PLETKUS J. Intraoral scanners in implant prosthodontics. A narrative review[J]. J Dent，2024，148：105152.

[10] SICILIA E，LAGRECA G，PAPASPYRIDAKOS P，et al. Effect of supramucosal height of a scan body and implant angulation on the accuracy of intraoral scanning：An *in vitro* study[J]. J Prosthet Dent，2024，131(6)：1126-1134.

[11] LYU M Y，DI P，LIN Y，et al. Accuracy of impressions for multiple implants：A comparative study of digital and conventional techniques[J]. J Prosthet Dent，2022，128(5)：1017-1023.

[12] BANDIAKY O N，LE BARS P，GAUDIN A，et al. Comparative assessment of complete-coverage，fixed tooth-supported prostheses fabricated from digital scans or conventional impressions：A systematic review and meta-analysis[J]. J Prosthet Dent，2022，127(1)：71-79.

[13] PARK J S，ALSHEHRI Y F A，KRUGER E，et al. Accuracy of digital versus conventional implant impres-

sions in partially dentate patients: A systematic review and meta-analysis[J]. J Dent, 2025, 160: 105918.

[14] WANG Y, LONG H, ZHAO Z H, et al. Expert consensus on the clinical strategies for orthodontic treatment with clear aligners[J]. Int J Oral Sci, 2025, 17: 19.

[15] RESENDE C C D, BARBOSA T A Q, MOURA G F, et al. Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans[J]. J Prosthet Dent, 2021, 125(2): 294-299.

[16] TAWFIK M H A, EL TORKY I R, EL SHEIKH M M. Effect of saliva on accuracy of digital dental implant transfer using two different materials of intraoral scan bodies with different exposed lengths[J]. BMC Oral Heal, 2024, 24(1): 1428.

[17] 李敬谦, 朱子璐, 焦剑, 等. 隐形矫治重度牙周炎患者前牙区病理性移位患牙的临床疗效[J]. 北京大学学报(医学版), 2025, 57(1): 51-56.
LI J Q, ZHU Z L, JIAO J, et al. Clinical efficacy of clear aligner treatment for pathologically migrated teeth in the anterior region of patients with severe periodontitis[J]. J Peking Univ Heal Sci, 2025, 57(1): 51-56.

[18] 赖文莉. 隐形矫治技术在多学科复杂病例中的应用[J]. 华西口腔医学杂志, 2026, 44(1): 9-16.
LAI W L. Discussion on the application of clear aligner treatment in multidisciplinary complex cases[J]. West China J Stomatology, 2026, 44(1): 9-16.

[19] REVELL G, SIMON B, MENNITO A, et al. Evaluation of complete-arch implant scanning with 5 different intraoral scanners in terms of trueness and operator experience[J]. J Prosthet Dent, 2022, 128(4): 632-638.

[20] RÓTH I, HERMANN P, VITAI V, et al. Comparison of the learning curve of intraoral scanning with two different intraoral scanners based on scanning time[J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1): 267.

(2026-04-15 收稿)
编辑 沈建国