

桡骨远端骨折的治疗策略及研究进展

白晨阳^{1,2}

¹延安大学延安医学院, 陕西 延安

²延安大学附属医院创伤骨科一病区, 陕西 延安

收稿日期: 2026年4月26日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

本综述围绕桡骨远端骨折(DRF)的治疗策略与研究进展, 对19篇相关或方法学可迁移的文献进行归纳。临床证据显示, 相较保守治疗, 手术尤其以掌侧锁定钢板为代表的稳定内固定, 在功能恢复、影像学复位维持与并发症控制方面更具优势; 但对稳定或可满意复位的病例, 规范手法复位与外固定仍可获得良好短期结局, 夹板-石膏交替固定有助于加速愈合。针对畸形愈合, 结合截骨与髂嵴植骨的重建可改善疼痛与力线。来自踝、距骨等关节周围骨折的研究提示: 在保证解剖复位的前提下, 微创理念与恰当入路选择可减少软组织损伤并缩短康复过程, 为DRF手术路径与器械选择提供借鉴。方法学层面, 有限元与参数化建模、MRI定量计量及数字化设计3D打印为个体化内外固定与术前力学评估提供工具; 同时, ROC曲面、径向MR等先进统计与因果推断方法, 联合本体感觉与神经肌肉功能客观测评, 可用于优化预后分层与康复评估。未来应开展高质量随机研究, 并推动生物力学建模、影像计量与因果推断的跨学科整合。

关键词

桡骨远端骨折, 手术与保守治疗, 掌侧锁定钢板, 微创入路, 有限元建模

Treatment Strategies and Research Progress of Distal Radius Fractures

Chenyang Bai^{1,2}

¹Yan'an Medical College of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Ward I, Department of Orthopedic Trauma, The Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: April 26, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

Drawing on 19 clinical and methodology-transferable studies, this narrative review synthesizes

文章引用: 白晨阳. 桡骨远端骨折的治疗策略及研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 3185-3193.

DOI: 10.12677/acm.2026.1652137

current strategies and advances in the management of distal radius fractures (DRF). Comparative clinical evidence favors operative fixation—particularly volar locking plates—over nonoperative care for superior maintenance of reduction, faster union, better wrist function, and fewer complications; nevertheless, well-performed closed reduction with external immobilization remains effective in stable or satisfactorily reducible fractures, and alternating splint-cast protocols may expedite healing. For symptomatic malunions, corrective osteotomy with trapezoidal iliac crest grafting can restore alignment and alleviate pain. Evidence from periarticular fractures of the ankle and talus underscores that, once anatomic reduction is secured, minimally invasive concepts and thoughtful surgical approach selection mitigate soft-tissue morbidity and may accelerate recovery, offering reference for DRF surgical approaches and instrument selection. Methodologically, finite element and parameterized modeling, quantitative MRI metrics, and digital3D-printed designs enable patient-specific planning and preoperative biomechanical evaluation. In parallel, advanced analytics—including ROC surfaces for ordinal competing risks and radial Mendelian randomization—combined with objective assessments of proprioception and neuromuscular function, offer robust frameworks for prognostic modeling and rehabilitation monitoring. High-quality randomized studies should be conducted in the future, and interdisciplinary integration of biomechanical modeling, imaging measurement and causal inference should be promoted.

Keywords

Distal Radius Fracture, Surgery versus Conservative Treatment, Volar Locking Plate, Minimally Invasive Approach, Finite Element Modeling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 研究背景

桡骨远端骨折是最常见的上肢骨折之一，随人口老龄化与骨质疏松高发而显著增加，致残与功能受限对生活质量与社会经济负担影响突出。现有治疗从保守到手术多样化：夹板、石膏及交替固定策略，掌侧锁定钢板、髓内钉、外固定、关节镜辅助复位与骨移植，同时辅以三维影像规划与有限元等生物力学评估。当前证据显示，手术在对位恢复与早期功能方面具有优势，但成本与并发症(腱神经损伤、感染、塌陷、CRPS 等)风险增加；保守治疗仍适用于低需求或稳定型骨折。不同术式在关节内粉碎、骨质疏松与复杂形态下各有利弊，康复路径与疼痛管理尚未统一。存在问题包括：高质量随机对照与长期随访不足，结局指标不统一；适应证边界与个体化决策算法不清晰；老年脆性骨折的二级预防与围手术期骨健康管理缺位；并发症预测模型与防控策略证据薄弱；生物力学结果向临床转化有限。基于此，本文综述旨在系统梳理保守与不同手术策略的适应证、疗效与并发症，整合影像与生物力学研究进展，厘清争议与证据缺口，提出未来研究方向，为临床决策与规范化管理提供依据。

1.2. 研究意义

理论意义：通过系统整合桡骨远端骨折手术与非手术疗效对比研究[1] [2]、不同固定方式比较[3] [4]以及畸形愈合修复策略[5]等证据，进一步丰富关于“适应证、固定方式、愈合、并发症”的治疗决策理论框架，细化不同人群与骨质状态下的力学与生物学机制认知；同时，在方法论上，促使研究采用标准

化结局指标、长期随访与并发症分级分析,借鉴有限元与参数化建模等生物力学工具[6]以及面向有序结局的 ROC 曲面等统计方法[7],以完善疗效评价与风险预测体系,提升不同治疗策略可比性与证据等级。

实际意义:为临床制定循证的分层治疗路径提供依据:明确手术与保守治疗的选择边界与预期差异[1][2],指导夹板、石膏及交替固定的具体适用场景与时机[3],优化锁定钢板与髓内固定等术式选择[4],并规范并发症预防与处理[2];同时,为疑难病例如畸形愈合提供可行的重建方案[5]。在学科层面,研究成果有助于形成标准化诊疗流程与培训体系,促进植入物与材料的优化迭代,提升医疗资源配置效率,并推动骨科与工程学的交叉协作[6],从而整体提升桡骨远端骨折诊疗质量与可持续发展能力。

2. 桡骨远端骨折临床治疗策略与疗效对比研究

2.1. 手术与保守治疗的疗效与并发症

围绕桡骨远端骨折治疗选择,已有多项比较研究显示,手术在影像复位质量与早期功能恢复方面占优,尤其对不稳定或关节内骨折更为适用,但同时增加切口相关、肌腱刺激与植入物相关并发症风险;相对地,保守治疗并发症总体较少,却更易出现再移位、畸形愈合与迟发功能受限[1][2]。在保守策略中,不同固定方式影响疗效:夹板、石膏及交替固定在维持复位、适应肿胀与皮肤并发症控制方面各有利弊,合理选择与动态调整有助于降低压疮、神经受压与继发移位发生[3]。保守治疗最常见并发症为畸形愈合,多因复位不精准或固定后复位丢失导致,表现为桡骨短缩、掌背倾异常,可能引发腕关节疼痛、旋转受限。其次为肌腱刺激或断裂,尤其伸拇长肌腱易受影响,同时可能出现关节僵硬、压疮等,多与长期固定、护理不当相关,部分患者还可能出现复位后再移位需二次干预。手术治疗(如切开复位内固定)并发症发生率整体低于保守治疗,核心并发症与手术操作相关。常见为腕管综合征、肌腱刺激/断裂,其次是伤口感染、钢板螺钉松动等,少数患者可能出现复杂区域疼痛综合征。高龄、合并基础疾病或手术经验不足可能增加并发症风险,但畸形愈合发生率仅 11%,显著低于保守治疗。综上,保守治疗并发症以畸形愈合、固定相关不适为主,手术治疗以手术相关损伤、内固定相关问题为主。临床中,对功能要求低、身体不耐受手术者可选择保守治疗,对骨折移位明显、追求更好功能恢复者,手术治疗更具优势,可降低畸形愈合风险。在手术方式比较中,掌侧锁定钢板在早期腕关节功能与复位维持方面优于外固定或经皮克氏针,且减少针道感染,但需关注屈肌腱刺激与掌侧软组织并发症[4]。临床系列亦提示,依据骨折类型与全身情况实施个体化策略并早期功能锻炼,可降低肩手综合征、关节僵硬等并发症并改善总体结局[8]。此外,对既往治疗后形成的桡骨远端畸形愈合,矫形截骨联合梯形髂骨移植能够重建力线、减轻疼痛并改善功能,但需权衡供区并发症[5]。

2.2. 非手术固定策略与影像学维持

在桡骨远端骨折的保守治疗中,夹板与石膏的选择及其成形质量直接关系到复位后影像学对位的维持。梁伟东等[3]比较夹板、石膏及二者交替固定,指出早期以夹板缓解肿胀、随后改为石膏并注重三点成形,可在舒适度与稳定性之间取得更佳平衡,从而有助于减少再移位风险。在手术与非手术的对比中进一步提示,稳定型或轻度移位骨折经规范保守固定可获得接近的功能结局,但对于不稳定型骨折,非手术在背倾角、尺偏等影像学参数的维持上劣于手术,二次移位与继发畸形愈合的风险更高。

基于此,非手术策略的关键在于严谨的影像学随访与“早期识别、及时调整”。吾麦尔江·吐尔逊[8]临床报道强调复位后早期定期复查并根据影像学变化及时加压成形或更换固定,可提高对位维持率并减少并发症。虽聚焦不同手术方式,但其关于影像学对位恢复对功能转归影响的结论同样提示保守治疗需设定明确的再干预阈值,一旦出现进行性塌陷或对线丢失,应及时转为手术。若影像学维持失败导致畸形愈合,后期或需矫形截骨与结构性植骨重建,治疗负担显著增加[5]。综合来看,非手术固定的优选人

群、成形质量与动态影像监测构成了维持复位的“三位一体”要点。

2.3. 手术方式优选与畸形矫治

手术与非手术的优选应以骨折稳定性、关节面受累及复位可维持性为核心判据。总体而言，手术在解剖复位与早期功能恢复方面更具优势，但并发症需权衡，提示对不稳定或关节内移位明显者应积极手术，而对稳定、复位可维持者可考虑保守治疗[1] [2]。在保守策略中，夹板、石膏与交替固定各有侧重：夹板有利于早期肿胀期软组织管理，石膏更利于维持复位，交替固定可在舒适性与稳定性间取得平衡，适用于稳定性一般的病例[3]。具体术式选择方面，掌侧锁定钢板在关节面阶梯不平和背侧倾倒的矫正与早期功能获益上更为突出；外固定(可联合克氏针)在粉碎塌陷与软组织条件较差时具有适应性；单纯经皮针固定创伤小，但对不稳定型骨折需谨慎[4]。合并尺骨远端受累或双骨折时，更需个体化制定复位与稳定策略并强调早期康复，以降低残余畸形与功能受限的风险[8]。对于已形成症状性畸形愈合者，采取矫形截骨联合楔形或梯形髂骨植骨可同时恢复桡骨远端掌倾、桡偏与长度，改善疼痛与力学轴线，为功能重建提供基础。综合而言，“解剖复位-稳定固定-早期运动”的阶梯化策略，应结合骨折形态与全身条件实现手术方式的最优化与畸形的有效矫治。

3. 其他部位关节周围骨折的手术入路与固定方式比较(对 DRF 的借鉴)

在 DRF 的手术入路与固定选择上，可借鉴踝与近端肱骨的经验。王建军[9]比较距骨骨折不同入路指出，双切口能改善视野与关节面复位，但需权衡血供保护与并发症风险，启示 DRF 选择掌侧或背侧入路时亦应在暴露、复位质量与血供保护间取得平衡。张晓猛[10]比较外踝 Danis-Weber B/C 型锁定钢板与髓内钉发现，前者在粉碎及旋转不稳时更利于解剖复位与角稳定，后者切口小、软组织并发症少，提示 DRF 在粉碎严重时倾向角稳定锁定板，而软组织条件差时可考虑微创内固定思路。王振荣、王文升[11]对踝关节骨折脱位的分析强调复位时机受软组织肿胀与皮肤皱褶征制约，必要时分期或外固定过渡，这与 DRF 高能损伤时的分期策略与软组织优先原则相吻合。Venkata Sreekanth [12]证实锁定钢板在骨质疏松近端肱骨可通过角稳定与内侧柱支撑降低失衡风险，提示 DRF 中以锁定螺钉实现关节下骨松质支撑与掌侧支柱重建，有助维持掌倾与桡高，减少塌陷与螺钉穿透。

4. 生物力学/有限元建模与数字化影像计量及跨学科测量方法

在桡骨远端骨折治疗优化中，生物力学/有限元建模与数字化影像计量提供了关键的定量依据。曹贵君[6]将 ROI-C 融合器内固定的有限元与临床验证结合，建立了基于真实边界条件的构建-验证流程，可迁移用于评估掌侧锁定板不同螺钉构型的载荷分担与应力集中。李沛雨[13]提出考虑个体差异的胸腔参数化建模，提示在前臂骨几何与皮质厚度存在人群差异时，应建立参数化桡骨模型以开展植入物匹配与敏感性分析。Teman [14]提出光度学谱域误差量化，为放射影像亮度/灰度的一致性校准及光学表面重建误差评估提供方法，从而降低骨缘识别与阈值分割的系统偏倚。Truong [15]在星系中重建高分辨速度场的方法，可借鉴于体外斑点跟踪或数字体视测量，解析骨折端微动的时空特征。Pea [16]的简化躯干重建用于支具设计，体现临床导向的几何建模-定制干预闭环，可用于快速设计个体化外固定与 3D 打印夹板。

5. 统计学与因果推断方法及神经肌肉功能评估在骨科研究中的应用

5.1. 竞争风险 ROC 与 VUS 评估

在桡骨远端骨折预后研究中，结局常呈现竞争与有序等级特征(如骨性复位成功但功能一般、或出现

并发症导致功能差), 传统二分类 ROC 难以全面反映多结局判别能力。Zhang [7] 提出面向有序竞争风险 ROC 曲面与 VUS (曲面下体积) 指标, 可在同一框架下评估预测模型对不同结局层级的整体区分度, 避免单一结局选择带来的偏倚。结合功能学评估时, 可将本体感觉、等速肌力与姿控稳定性等多维特征构建综合评分, 以判别“优良功能”“一般功能”“并发症主导的不良结局”等竞争层级, VUS 则提供跨阈值、跨结局的全局效能量化。Whitehead [17] 显示本体感觉与力量、姿稳可敏感反映下肢功能差异, 提示在上肢损伤后亦可作为功能维度的重要预测因子; Stolworthy [18] 关于肘伸肌离心收缩时运动单位放电模式的研究, 为提取神经肌肉控制精细特征用于判别模型提供了思路。在模型稳健性方面, Bowden 等 [19] 提出的径向图与径向回归虽然用于孟德尔随机化, 但其对离群点识别与异质可视化的策略可迁移用于多指标评分的敏感性分析, 从而提高 VUS 估计的稳定性与解释性。实际应用中, 建议同时报告 VUS 与特定截面的曲面 AUC, 并对阈值选择、样本不平衡及结局竞争性进行校正, 以获得在临床上可解释的多结局判别性能。

5.2. 径向 MR 与因果推断方法

径向 MR 是两样本孟德尔随机化的重要扩展, Bowden 等 [19] 提出径向图与径向回归, 将工具变量效应映射到径向坐标, 利用加权残差直观识别多效性异常值, 并通过迭代加权回归控制异质性, 相比传统 IVW 在存在弱工具或方向性多效性时更稳健。应用于骨科因果问题(如骨密度、肌力、跌倒风险对桡骨远端骨折的作用)时, 径向 MR 有助于剔除出格 SNP、下调异常权重, 从而提升因果估计的可靠性与可解释性。

为与因果推断配套的结局评价, Zhang [7] 提出适用于有序竞争风险 ROC 曲面, 可在“无并发症 - 轻度畸形 - 再手术”等多等级结局下全面衡量预测模型的判别力, 避免简单二分带来的信息损失。与此同时, 高质量神经肌肉表型为构建因果链提供基础: Stolworthy [18] 量化肘小肌在高强度离心收缩中的运动单位放电特征, Whitehead [17] 比较慢性踝不稳个体的本体感觉、力量与姿势稳定。将此类规范化表型作为候选暴露或中介, 结合径向 MR 的异质性检出与稳健回归, 有望更精准地解析神经肌控 - 跌倒 - 桡骨远端骨折风险的因果通路。

5.3. 神经肌功能评估框架

贯通神经驱动、感觉反馈与功能输出, 本节提出面向骨科研究的神经肌功能评估框架: 以运动单位行为为底层表型, 以本体感觉 - 力量 - 姿控为中层功能表征, 以诊断精度与因果推断为上层决策工具。Stolworthy [18] 在肘伸肌高强度离心收缩中解析肘小肌运动单位放电特征, 提示可通过放电频率、招募阈值与去招募迟滞等指标量化上肢离心控制的神经驱动能力, 据此在上肢评估中设计负荷递增的离心任务以定位神经驱动薄弱环节。Whitehead [17] 比较踝关节本体感觉、力量与姿势稳定的多域指标, 证明多模态量表对不稳具有较高辨别力, 提示在上肢情境下可并行采集腕/肘本体感觉阈值、等长/等速肌力与上肢姿控稳定性, 构建复合功能评分。在证据评价层面, Zhang [7] 提出适用于有序结局且存在竞争风险 ROC 表面, 可用于比较不同组合指标在“轻 - 中 - 重”功能障碍并伴随不良事件(如疼痛复发、功能迟缓)的诊断效能, 确定最优阈值与权衡。进一步地, Bowden 等 [19] 以径向图与径向回归改良两样本孟德尔随机化, 可在汇总层面检验肌力或本体感觉相关遗传工具与骨折风险或康复结局间的因果联系, 并识别异质与多效性, 提高因果推断稳健性。由此形成“神经驱动表型 - 多域功能测量 - 诊断精度评估 - 因果推断”的层级闭环, 用于指导桡骨远端骨折围术期评估与个体化康复策略优化。

5.4. 有限元、孟德尔随机化等工具在 DRF 领域作用的总结

有限元分析在 DRF 领域作用: DRF 的稳定性直接决定治疗方案的选择, 而传统影像学评估难以精准

量化骨折端的力学稳定性。有限元分析可基于 DRF 患者的 CT 或 MRI 数据，构建个性化的三维骨折模型，通过模拟腕关节压缩、背弯、掌屈、扭转等生理载荷工况，分析骨折块的位移趋势、应力集中区域，从而精准判断骨折的稳定性分级，为 AO/OTA 等分型系统提供客观的生物力学依据，避免因主观判断导致的治疗决策偏差。对于复杂的关节内骨折(如 AO 分型 C 型)，有限元分析可清晰呈现关节面的受力特点，为判断骨折是否需要手术干预提供量化参考。

孟德尔随机化在 DRF 领域作用：孟德尔随机化是一种依托孟德尔遗传定律，以遗传变异(如单核苷酸多态性 SNP)作为工具变量，从观察性数据中推断暴露因素与结局(DRF)之间因果关系的统计学方法。其核心优势在于利用遗传变异的随机性，有效规避传统观察性研究中常见的混杂因素与反向因果倚倚，为 DRF 的发病机制研究、危险因素筛选及潜在治疗靶点挖掘提供了全新的研究思路，尤其适用于无法开展随机对照试验的场景。

6. 结论

6.1. 研究现状的总结

桡骨远端骨折(DRF)研究总体呈现“分型指导、个体化选择、功能优先、影像学作为必要但非充分依据”的共识格局。以成人为主的临床证据显示，治疗目标从单纯复位维持转向“结构-功能-安全-成本”的综合平衡，围绕手术与保守治疗、不同固定方式以及并发症管理形成了较为一致的结论框架，但高质量前瞻研究仍不足。

手术与保守治疗的总体结论：

1) 对不稳定或关节内粉碎骨折，手术较保守治疗在早期功能恢复和影像学对线维持方面更优；对稳定的关节外骨折、尤其高龄低需求人群，长期功能差异缩小，保守策略具可行性与成本优势。

2) 研究常以 12 周时点见到术组握力、关节活动度与疼痛优于保守组，6~12 月后差距缩小；影像学参数(桡骨高度、尺偏、掌倾)在术组维持更佳。

非手术固定的现状：

1) 夹板、石膏与“夹板-石膏交替”各有利弊：夹板舒适度与肿胀管理较优，石膏在维持复位方面更稳定，交替固定兼顾肿胀变化与对线维持，但证据规模较小、随访不一。

2) 二次移位风险仍是保守治疗的核心痛点，影像学复查节律与再复位阈值标准尚未完全统一。

手术方式的应用格局：

1) 掌侧锁定钢板为主流，能更好维持掌倾与桡骨高度，促进早期活动；经皮克氏针、外固定在软组织条件差或粉碎严重时仍有地位；髓内钉用于部分关节外型。

2) 并发症谱与器械相关事件(屈拇长肌腱刺激、螺钉穿透)需权衡；微创策略在降低软组织并发症方面显示潜在优势，但对复杂骨折的复位质量依赖术者经验。

结局指标与常用计算：

1) 功能与疼痛：DASH、PRWE 等主观量表与握力、关节活动度共同使用。常见改善率可表示为 $I = (S_{pre} - S_{post}) / S_{pre} \times 100\%$ ，其中 S 可为 PRWE 或 DASH (分值越低越好)。

2) 影像学维持：对线丢失量可表示为 $\Delta X = X_{followup} - X_{postreduction}$ ；维持率 $M_x = X_{followup} / X_{postreduction} \times 100$ ， X 可为桡骨高度(RH)、掌倾(VT)、尺偏(RI)等。

3) 并发症与再手术：发生率 $p = n_{event} / N$ ；相对危险度 $RR = p_{surgery} / p_{conservative}$ ；影像学二次移位率 $q = n_{edisp} / N$ 。

并发症与安全性：

1) 手术相关并发症以肌腱刺激/断裂、螺钉穿透、切口问题、神经刺激为主；保守相关以畸形愈合、

关节僵硬、复杂性区域疼痛综合征为主。

2) 现有证据提示：术组总体并发症谱更“器械相关”，保守组更“力线相关”，二者在再手术率上因研究人群与指征差异而异质性较大。

证据质量与不足：

1) 现有研究多为单中心回顾性或小样本前瞻性，分型、指征、康复方案与随访时间不一致，结局指标异质性强。

2) 对年龄、骨质疏松程度、职业需求、合并伤等亚组的分层不足；长期功能与生活质量、成本-效果结局报道有限；非手术固定标准化路径与复查策略尚未统一。

总体而言，DRF 治疗研究已在“何时手术、如何固定、如何平衡功能与安全”上形成阶段性共识：不稳定/关节内骨折倾向手术，稳定/低需求人群可优先保守；掌侧锁定钢板主导复杂骨折治疗，非手术固定方案需结合肿胀与再移位风险动态管理。但证据仍需通过更高质量、标准化的研究进一步巩固与细化。

6.2. 研究趋势与前景

面向桡骨远端骨折(DRF)的研究正从“影像整复-并发症控制”的单维目标，迈向“个性化精准修复-功能恢复最大化-价值导向决策”的多维整合范式。未来的主要趋势包括(但不限于)以下方向：

1) 患者特异化数字孪生与生物力学驱动决策

基于高分辨率 CT/超声/双能量 X 线的三维重建，构建患者特异化有限元模型(FE)，在不同内固定(掌侧锁定钢板、髓内钉、外固定/桥接)与负荷场景下预测位移、应力集中与疲劳寿命，实现术式与螺钉通道的优化选型。

动态随访中将影像学对位(掌倾、桡偏、尺偏)与功能载荷(抓握力、前臂旋转力矩)耦合，形成“影像-力学-功能”闭环反馈，迭代校正数字孪生。

2) 结局指标由单一影像向多维综合与个体加权拓展

建立结构-功能-体验的复合终点(影像复位、并发症、PROMs、客观功能)，并引入可加权综合评分 $S = \sum w_i z_i$ (其中 z_i 为标准化各维指标， w_i 为专家共识或数据驱动权重)，以贴合不同年龄、职业、骨质状况的个性化目标。

3) 植入物与材料学革新

从钛合金掌侧锁定系统向可降解镁合金、微孔与表面仿生涂层过渡，并探索“可感知”内植物(内置应变/温度微传感)，实现术后微动与愈合状态的在体监测，支持个性化康复节律调整。

4) 远程康复与客观功能量化

借助可穿戴传感与居家康复平台，持续采集腕部角速度、活动范围(ROM)、抓握-握力与肌电模式，构建功能恢复轨迹。可采用双侧对称指数 $SI = |X_{患} - X_{健}| / ((X_{患} + X_{健}) / 2)$ 量化功能不对称，指导阶段性目标与负荷渐进。

5) 老年脆性骨折一体化管理

将骨质疏松评估、补充治疗与防跌倒干预纳入围手术期路径与二级预防(FLS 模式)，以降低再骨折与医疗资源占用，实现“修复-强骨-防再发”的连续照护。

6) 高质量研究生态与数据基础设施

建立多中心前瞻性注册与核心结局集(COS)，采用联邦学习保护隐私的数据协作；鼓励平台化与适应性试验以加速器械与康复方案的迭代优化，并推动影像、力学与功能数据的跨模态对齐和共享标准。

总体而言，DRF 研究正向“可测、可算、可控”的闭环演进：以患者特异化模型和高维数据驱动精准治疗，以因果与经济学框架支撑可推广的临床策略，以远程与传感技术实现功能导向的长期管理。这

一体系将重塑 DRF 治疗的证据生成与临床实践路径。

6.3. 对今后研究的建议

未来桡骨远端骨折相关研究应进一步强化设计规范与报告标准, 优先开展多中心、前瞻性随机对照研究, 或采用目标试验仿真设计的观察性研究, 所有研究均建议进行临床试验预注册, 并统一采用包含结构复位、功能结局、并发症发生情况及医疗资源利用在内的核心结局集, 提高研究间的可比性与证据质量。样本量计算应以最小临床重要差异(MCID)为关键依据, 针对两组连续型结局变量对比, 可采用经典公式进行估算: $n \approx \delta^2 2\sigma^2 (Z\alpha/2 + Z\beta)^2$, 式中 σ 为总体标准差, δ 为最小临床重要差异, Z 为标准正态分布分位数。

影像学与功能结局评价应实现全面标准化, 统一桡偏角、掌倾角、尺侧移位等影像学测量指标, 以及 PRWE、DASH 量表和握力等功能评估手段。为客观评价固定方式的几何稳定性, 建议采用复位维持率进行量化; 握力与关节活动度可采用患侧/健侧比值进行归一化处理, 同时以组内相关系数(ICC)报告影像学测量的一致性。

并发症分析应采用竞争风险框架并进行严重度分级, 对于多等级结局的诊断或预测模型, 建议采用 ROC 曲面体积(VUS)综合评价判别效能, 以更全面地反映模型对不同预后等级的区分能力。在非随机临床数据的分析中, 应规范使用倾向评分与双稳健估计方法, 通过逆概率加权平衡组间混杂, 并采用增强逆概率加权(AIPW)估算平均处理效应, 同时开展敏感性分析与中介效应分析, 明确解剖复位等因素对功能结局的影响路径。

生物力学有限元研究应建立标准化建模与验证流程, 清晰报告材料属性与边界条件, 采用应力或位移相对误差评估模型预测精度, 并结合交叉验证与实体生物力学实验提高模型可靠性。临床决策研究可基于年龄、骨密度、AO/OTA 分型及软组织合并伤构建分层诊疗策略与预测列线图, 采用 Brier 分数评价模型准确性, 并完成外部验证与临床决策曲线评估。

卫生经济学方面应常规开展成本-效果分析, 纳入质量调整生命年(QALY)并计算增量成本效果比 ICER, 同时进行情景分析与概率敏感性分析, 充分考量长期并发症及再手术带来的经济负担。康复评估应将表面肌电、最大随意收缩力、神经反射及运动单位募集阈值等客观指标纳入随访体系, 功能力矩采用患侧与健侧比值进行标准化, 运用混合效应模型拟合功能恢复轨迹, 识别关键康复时间窗。

数据平台建设上, 应建立标准化的桡骨远端骨折前瞻性注册数据库与统一数据字典, 依托联邦学习技术在隐私保护前提下实现多中心数据整合, 公开可复现的分析代码与预测模型, 提升研究方法的外推性与临床转化能力。

参考文献

- [1] 王海波. 桡骨远端骨折手术与非手术治疗的疗效比较研究[J]. 心理医生, 2017, 23(23): 167-168.
- [2] 陆庆龙. 桡骨远端骨折手术治疗和保守治疗的效果及并发症比较探究[J]. 中国保健营养, 2017, 27(29): 306-307.
- [3] 梁伟东, 金梅, 闫作军. 夹板、石膏和夹板石膏交替固定在桡骨远端骨折中的应用比较[J]. 世界最新医学信息文摘(电子版), 2017, 17(61): 27+29.
- [4] 郑昂. 不同手术治疗桡骨远端骨折的疗效对比[J]. 心理医生, 2017, 23(3): 105-106.
- [5] (2017) Management of Malunited Distal Radial Fractures with Trapezoidal Iliac Crest Bone Graft. Dr. NTR University of Health Sciences (India).
- [6] 曹贵君. ROI-C 融合器内固定治疗 Hangman 骨折有限元分析与临床应用[D]: [博士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2017.
- [7] Zhang, S. (2018) Diagnostic Accuracy Analysis for Ordinal Competing Risk Outcomes Using ROC Surface. Doctoral

Dissertation, University of Pittsburgh.

- [8] 吾麦尔江·吐尔逊. 治疗 80 例尺桡骨远端骨折的临床报告[J]. 新疆维吾尔医学专科学校学报(维文版), 2017, 27(4): 28-30.
- [9] 王建军. 分析不同入路治疗距骨骨折的疗效[J]. 双足与保健, 2017, 26(7): 136+138.
- [10] 张晓猛. 解剖锁定钢板及髓内钉治疗外踝骨折 Danis-weber B 及 C 型骨折比较研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [11] 王振荣, 王文升. 手术治疗踝关节骨折脱位的临床分析[J]. 双足与保健, 2017, 26(17): 145+147.
- [12] Venkata Sreekanth, K. (2017) A Study of Management of Fracture Proximal Humerus with Locking Plate. Dr. NTR University of Health Sciences.
- [13] 李沛雨. 碰撞载荷下考虑人体差异的胸腔参数化建模及损伤研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2017.
- [14] Teman, K.L. (2017) Method for Quantifying the Spectral Based Error in Luminance Measurements. University of Colorado at Boulder.
- [15] Truong, P.N. (2017) High-Resolution Velocity Fields of Low-Mass Disk Galaxies. University of California.
- [16] Pea, R. (2017) Reconstruction Simplifiée du Tronc pour le Traitement de la Scoliose Idiopathique par Corset. Ecole Polytechnique, Montreal.
- [17] Whitehead, P.N. (2017) Comparing Measures of Ankle Proprioception, Strength, and Postural Stability in Male Soccer Players with and without Chronic Ankle Instability as a Result of Non-Contact Lateral Ankle Sprains. University of Pittsburgh.
- [18] Stolworthy, C.W. (2017) Motor Unit Firing in the Human Anconeus during High Intensity Eccentric Contractions of Elbow Extensors. The University of Western Ontario (Canada).
- [19] Bowden, J., Spiller, W., Del Greco M, F., Sheehan, N., Thompson, J., Minelli, C., et al. (2018) Improving the Visualization, Interpretation and Analysis of Two-Sample Summary Data Mendelian Randomization via the Radial Plot and Radial Regression. *International Journal of Epidemiology*, 47, 1264-1278. <https://doi.org/10.1093/ije/dvy101>